



Sementer med flygeaske og slagg: Lab- og felterfaringer

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 517



Tittel

Sementer med flygeaske og slagg: Lab- og felterfaringer

Undertittel

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

Forfatter

Bård Pedersen

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

Seksjon

Tunnel og betong

Prosjektnummer

603246

Rapportnummer

Nr. 517

Prosjektleder

Synnøve A. Myren/ Sølvi Austnes

Godkjent av

Øyvind Bjøntegaard

Emneord

Varige konstruksjoner, betong, sement, flygeaske, slagg, frostbestandighet, kjemisk bestandighet, kloridmotstand, alkalireaksjoner

Sammendrag

Denne rapporten inngår i en serie rapporter fra Statens vegvesens etatsprogram Varige konstruksjoner, 2012-2015.

Rapporten gir en oversikt over effekt av sementer med flygeaske og slagg på bestandighet av betong basert på gjennomgang av internasjonal litteratur. Flygeaske og slagg gir generelt god motstand mot kloridinntrengning, god kjemisk bestandighet, motstand mot alkalireaksjoner og redusert herdevarme. Høye doseringer av flygeaske og slagg kan gi redusert frostmotstand. Det er spesielt gunstig å kombinere Portlandsement og silikastøv med enten flygeaske eller slagg som trepulverblandinger

Title

Cements with fly ash and slag: Experiences from lab and field

Subtitle

Durable structures 2012-2015

Author

Bård Pedersen

Department

Traffic Safety, Environment and Technology Department

Section

Tunnel and concrete

Project number

603246

Report number

No. 517

Project manager

Synnøve A. Myren/ Sølvi Austnes

Approved by

Øyvind Bjøntegaard

Key words

Durable structures, concrete, cement, fly ash, slag, frost resistance, chemical attack, chloride resistance, ASR

Summary

This report belongs to a series of reports from the R&D-programme Durable structures 2012-2015, carried out by the Norwegian Public Roads Administration.

The report gives an overview of the effects of fly ash and slag on durability of concrete based on available international literature. Fly ash and slag in general give increased resistance against chloride ingress, increased chemical resistance, mitigation against alkali-silica reactions and reduced heat of hydration. High volumes of fly ash and slag may cause reduction in freeze/thaw resistance. It is highly favourable to combine Portland cement and silica fume with either fly ash or slag in ternary mixes.

Forord

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

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

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

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

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

Varige konstruksjoner ledes av Synnøve A. Myren. Mer informasjon om prosjektet finnes på vegvesen.no/varigekonstruksjoner

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

Rapporten er utarbeidet av Bård Pedersen, Statens vegvesen Vegdirektoratet.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	6
1.1	Bakgrunn og historiske tilbakeblikk.....	6
1.2	Miljøkonsekvenser	9
1.3	Litt om forbruk og tilgjengelighet av sement, flygeaske og slagg	10
1.3.1	Portlandsementer og blandingssementer	10
1.3.2	Tilgjengelighet og bruk av flygeaske og slagg.....	13
2	Standarder og formelle rammer.....	16
2.1	Innledning.....	16
2.2	Sementstandarden NS-EN 197-1.....	16
2.3	Regler for bruk av ulike sementtyper	18
2.4	Regler for separat tilsetning av flygeaske, slagg og silikastøv i betong.....	19
2.5	Standarder for flygeaske, slagg og silikastøv	21
2.6	Krav gitt av Statens Vegvesen.....	22
2.6.1	Innledning.....	22
2.6.2	Tillatte sementer	22
2.6.3	Regler for betongsammensetning	22
3	Sammensetning og reaktivitet av flygeaske og slagg.....	24
3.1	Innledning.....	24
3.2	Produksjon, kjemiske egenskaper og fysisk struktur.....	25
3.2.1	Flygeaske.....	25
3.2.2	Slagg.....	28
3.3	Reaktivitet	29
3.3.1	Flygeaske.....	29
3.3.2	Slagg.....	30
3.4	Reaksjoner og reaksjonsprodukter	32
3.4.1	Flygeaske.....	32
3.4.2	Slagg.....	34
3.5	Avsluttende kommentarer om flygeaske og slagg.....	36
4	Alkalireaksjoner	37
4.1	Innledning.....	37
4.2	Reaksjonsmekanismer for alkalireaksjoner	37
4.3	Effekter av flygeaske og slagg	39
4.3.1	Innledning.....	39
4.3.2	Om akselererte prøvingsmetoder.....	39
4.3.3	Resultater fra laboratorieforsøk.....	41
4.3.4	Litt om mekanismer og effekt av kjemisk sammensetning	48
4.3.5	Felterfaringer og korrelasjon mellom lab og felt.....	50
4.4	Konklusjoner	54

5	Armeringskorrosjon.....	56
5.1	Innledning.....	56
5.2	Initieringsfasen	57
5.2.1	Karbonatisering	57
5.2.2	Kloridinntrengning	63
5.3	Depassivering av armering.....	74
5.3.1	Innledning om kritisk kloridnivå	74
5.3.2	Kritisk kloridnivå – effekter av flygeaske og slagg.....	75
5.3.3	Kritisk pH ved karbonatisering	77
5.4	Propageringsfasen	77
5.4.1	Innledning.....	77
5.4.2	Resistivitet.....	77
5.4.3	Øvrige forhold	80
5.5	Konklusjoner og avsluttende kommentarer.....	80
5.5.1	Initieringsfasen	80
5.5.2	Depassivering av armering:	81
5.5.3	Propageringsfasen.....	81
6	Motstand mot frostnedbrytning	82
6.1	Innledning – generelt om frostnedbrytning	82
6.2	Spesifikasjon og dokumentasjon av frostbestandig betong	84
6.3	Luftporer – stabilitet og effekt på frostmotstand	86
6.4	Laboratorieforsøk flygeaske og slagg	87
6.5	Laboratorieresultater fra prosjekter i Statens vegvesen.....	92
6.6	Feltforsøk og kombinerte lab- og feltforsøk.....	96
6.6.1	Erfaringer fra Sverige	96
6.6.2	Erfaringer fra USA og Canada	100
6.6.3	Nederlandske felt- og lab- erfaringer.....	102
6.7	Avsluttende diskusjon	105
6.8	Konklusjoner	107
7	Kjemisk bestandighet	108
7.1	Innledning.....	108
7.2	Sulfatangrep.....	108
7.2.1	Innledning.....	108
7.2.2	Beskyttelse mot sulfatangrep.....	109
7.3	Syreangrep og kombinasjoner av syre- og sulfatangrep.....	115
7.4	Konklusjoner	118
8	Norske erfaringer.....	119
8.1	Innledning.....	119
8.2	Kloridbestandig betong, Fase I.....	119

8.2.1	Innledning.....	119
8.2.2	Resultater fra lab- og feltundersøkelser.....	121
8.3	Kloridbestandig betong, Fase II	123
8.3.1	Innledning.....	123
8.3.2	Resultater fra lab- og feltundersøkelser.....	124
8.4	Kloridinntrengning i ressursvennlig kvalitetsbetong.....	125
8.5	Bjørvikprosjektet	128
8.5.1	Innledning.....	128
8.5.2	Trinn 1 laboratorieundersøkelser.....	128
8.5.3	Videre utviklingsarbeid i forkant av byggeprosjektet	132
8.5.4	Spesifikasjon og erfaringer fra bygging av senketunnelen, entreprise sjødelen.....	133
8.6	Anlegg FA samarbeidsprosjektet	134
8.6.1	Innledning.....	134
8.6.2	Fasthetsutvikling	135
8.6.3	Kloriddiffusjon og elektrisk motstand.....	135
8.6.4	Tidlig overflatebehandling av betong med høy mengde flygeaske	137
8.6.5	Varmeutvikling.....	137
8.7	Møllenberg betongtunnel – FoU bestandighet	137
8.7.1	Innledning.....	137
8.7.2	Kloriddiffusjon og resistivitet.....	138
8.8	Aursundbrua	138
8.9	Sammendrag fra kapittel 8.....	139
9	Referanser.....	141

Sammendrag

Flygeaske og slagg, som er biprodukter fra henholdsvis kullfyrte kraftverk og råjernsproduksjon, brukes for å erstatte deler av Portlandsementen. Materialene inngår enten som delkomponent ved produksjon av blandingssementer, eller tilsettes separat på betongstasjon. I Norge er betonger med opp mot 20 % flygeaske dominerende i markedet, men sementer med slagg har også tatt betydelige markedsandeler. Rene Portlandsementer har vært på vikende front i Norge lenge, som i mange andre Europeiske land.

Slagg og flygeaske har ulike reaksjonsmekanismer, men har likevel noen av de samme effektene når det kommer til bestandighetsegenskaper. Denne rapporten gir en gjennomgang av internasjonal litteratur, og omhandler primært bestandighetsegenskaper for sementer med flygeaske og slagg.

Hovedfunnene fra litteraturstudien kan oppsummeres som følger:

- Flygeaske og slagg gir gjennomgående svært tette betonger, som over tid utvikler god motstand mot inntrengning av klorider og andre aggressiver.
- Flygeaske gir langsom egenskapsutvikling, betongene får lav fasthet og er relativt diffusjonsåpne i ung alder. Slaggbetonger er betydelig raskere, selv om de er noe langsommere enn betonger med ren Portlandsement.
- Det er knyttet noe uklarhet til kritisk kloridnivå hvor armeringskorrosjon kan initieres, men flere funn i litteraturen tyder på at terskelverdien reduseres ved innblanding av flygeaske og slagg.
- Både slagg og flygeaske motvirker alkalireaksjoner, hovedsakelig som følge av redusert alkalinitet i betongens porevæske. Det fordres generelt flygeaskemengder > ca. 25 % eller slaggmengder > ca. 40 % for å gi tilstrekkelig sikkerhet. Nødvendige mengder vil imidlertid avhenge av tilslagets reaktivitet samt av alkaliinnhold både i Portlandsement og i slagg og flygeaske.
- Både flygeaske og slagg gir forbedret bestandighet mot sulfatangrep og syreangrep.
- Høye doseringer av flygeaske og slagg gir redusert frostmotstand, spesielt i nærvær av salt.
- Ved å erstatte deler av Portlandsementen med flygeaske vil herdevarmen i betydelig grad reduseres, noe som vil gi redusert risiko for opprissing i tidlig fase. Også innblanding av slagg kan gi betydelig reduksjon av herdevarme.
- Det er spesielt gunstig å kombinere slagg og flygeaske med silikastøv, det er flere eksempler fra litteraturen på at man da oppnår en synergieffekt. Silikastøv er en svært rask pozzolan som i stor grad bidrar til både mekaniske og bestandighetsmessige egenskaper i tidlig fase, og vil dermed oppveie for noe av den langsommere egenskapsutviklingen til flygeaske og slagg.

I tillegg til gjennomgang av internasjonal litteratur gir rapporten også en oppsummering av sentrale forskningsaktiviteter om flygeaske og slagg som har vært gjennomført i Norge. Norske aktiviteter og erfaringer er omhandlet i eget kapittel.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn og historiske tilbakeblikk

Moderne **Portlandsement** ble utviklet i løpet av første halvdel av 1800-tallet. Joseph Aspdin tok i 1824 patent på en prosess og innførte navnet «Portlandsement» som er avledet av «Portland stone» fra Portland i England. Isaac Johnston utviklet i 1845 prototypen på moderne sementproduksjon, ved å brenne en blanding av leire og kalk ved høy nok temperatur til at det ble dannet "klinker". (Neville, 1995). Det brukes i moderne sementproduksjon temperaturer på ca. 1450°C. Ved denne temperaturen dannes de velkjente klinkermineralene ved reaksjoner mellom råmelets ulike oksider, og partiklene sintres sammen til små kuler som kalles **sementklinker**. Ved produksjon av sement males sementklinker ned til et finmalt pulver, sammen med korreksjonsmaterialet gips til såkalt Portlandsement.

Portlandsement er et såkalt **hydraulisk bindemiddel**, i sementstandarden (NS-EN 197-1) definert som «*et finmalt uorganisk materiale som blandet med vann danner en pasta som størkner og herder gjennom hydratisering og etter herding beholder sin fasthet og stabilitet også under vann*».

Flygeaske og råjernsslagg¹ brukes i stor utstrekning i en rekke land enten som tilsetningsmateriale i betong, eller som bestanddel i blandingssementer. De kan også inngå som råmateriale ved produksjon av Portlandsement. Både flygeaske og slag er biprodukter fra industrielle prosesser, henholdsvis fra kullfyrte kraftverk og produksjon av råjern. Selv om materialene har en del likheter når det kommer til egenskaper i betong, tilhører de to materialene prinsipielt ulike grupper av tilsetningsmaterialer:

- Flygeaske er primært et **pozzolant** materiale, dvs. det reagerer med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (kalsiumhydroksid) og vann og danner C-S-H (kalsium-silikat-hydrat) tilsvarende C-S-H fra hydratisert Portlandsement. Noen typer flygeasker (primært kalkholdige flygeasker) har i tillegg **hydrauliske** egenskaper.
- Råjernsslagg er et latent **hydraulisk** materiale. Ved kjemisk aktivering har slag hydrauliske egenskaper og danner C-S-H tilsvarende C-S-H fra hydratisert Portlandsement. Slagg har i tillegg til hydrauliske egenskaper også et begrenset element av pozzolan reaktivitet.

Rapporten omhandler primært effekter av flygeaske og slag. Men også effekten av **silikastøv** vil i betydelig grad bli omtalt. Dette gjelder spesielt kombinasjoner av slag/flygeaske og silikastøv som er svært aktuelle i Norge. Silikastøv tilhører gruppen pozzolane materialer, og er det mest effektive av alle pozzolaner vi kjenner til. Dette er en konsekvens av at silikastøv er nesten ren amorf silika (SiO_2) med ekstrem finhet, ca. 100 ganger finere enn ordinær Portlandsement. For en mer detaljert gjennomgang av egenskaper silikastøv gir i betong henvises det til en state-of-the-art rapport fra 1985 av Sellevold et al. (1987).

Pozzolaner defineres som «*uorganiske materialer, naturlige eller kunstig fremstilte, som herder sammen med vann og kalsiumhydroksid, eller med materialer som frigir kalsiumhydroksid*» (Massazza, 1998).

Bruk av naturlige pozzolane bindemidler i form av vulkansk aske og tuff blandet med lesket kalk har en lang historie, og daterer seg minst tilbake til grekerne 500-400 år f.Kr (Blezard 1998). Teknologien ble tatt opp og videreutviklet av romerne. Bruk av slike «Romerske sementer» er beskrevet i litteraturen av arkitekten og byggmesteren Marcus Vitruvius Pollio i perioden 30-20 f. Kr. i hans verk "*De Architectura Libri Decem*", (Ti bøker om arkitektur), hvor han beskriver de ulike aspekter av romersk arkitektur og byggekunst. I bok nr. 2 "Byggematerialer" beskrives forekomsten og bruken av naturlige

¹ Råjernsslagg, eller egentlig granulert råjernsslagg, vil for enkelhets skyld i hovedsak bli omtalt som slag videre i rapporten.

pozzolaner sammen med kalk som bindemiddel i betong. Følgende utdrag er hentet fra engelsk oversettelse i kapittel 6, bok 2: «Pozzolana for concrete masonry»: (Rowland & Howe 1999):

“There is also a type of powder that brings about marvellous things naturally. It occurs in the region of Baiae and in the countryside that belongs to the towns around Mount Vesuvius. Mixed with lime and rubble, it lends strength to all the other sorts of construction, but in addition, when moles are built into the sea, they solidify under water.”

Dette er en av de tidligste historiske beskrivelsene av pozzolan sement. Selve begrepet pozzolan har fått navn etter byen Puzzuoli² i Napoli-provinsen. Den vulkanske asken fra dette området var historisk sett en av de viktigste kildene for naturlige pozzolaner for romerne.

Bruk av naturlige pozzolaner er fortsatt vanlig, og spesielt Italia og Hellas har store forekomster av naturlige pozzolaner (Massazza, 1998). Den europeiske sementstandarden EN 197-1 har en egen klasse for pozzolansementer (CEM IV), hvor det kan tilsettes henholdsvis naturlig pozzolan, naturlig kalsinert pozzolan eller silikatholdig flygeaske opptil 55 %. De «kunstige» pozzolanene silikastøv og spesielt flygeaske har i dag globalt sett større betydning enn naturlige pozzolaner.

Flygeaske er et biprodukt fra kullfyrte kraftverk. Den ikke forbrente resten av kullet blir dratt ut av forbrenningssonen av forbrenningsgassene, og blir deretter nedkjølt og utfelt som flygeaskepartikler. Det er store forskjeller mellom ulike typer av flygeaske, noe som i stor grad styres av hvilken type kull som er utgangspunkt. Egenskaper og hydratasjonsmekanismer vil bli behandlet i Kapittel 3. All flygeaske som brukes i Norge er såkalt silikatholdig flygeaske, som omtrent tilsvarer klasse F i USA iht. ASTM C 618.

En av de første store konstruksjonene med bruk av flygeaske som er beskrevet i litteraturen er bygningen av Hungry Horse Dam i USA i perioden 1948-1953. (Malhotra og Ramezaniyanpour, 1994). Potensialet for å bruke flygeaske i betong var imidlertid kjent allerede fra 1914 (Anon, referert av Thomas 2007). Flygeaske har siden blitt brukt i en rekke dammer, i stor grad for å redusere hydratasjonsvarme. I følge ACI Committe 233 (2003) er det i Upper Stillwater Dam i USA (1987) brukt flygeaskenivåer fra 30-75 %.

De vanligste tilsetningsnivåene for flygeaske for konstruktiv betong ligger mellom 15 og 25 % (masse av totalt bindemiddel), mens det altså for massive konstruksjoner har vært benyttet langt høyere doseringer. Det har i løpet av de siste tiårene kommet flere eksempler på bruk av relativt høye doseringsnivåer på 40-50 % også for ordinære konstruksjonsbetonger (Malhotra og Mehta 2005). Betonger med 50 % eller mer flygeaske går ofte under betegnelsen “High volume fly ash concrete” i engelskspråklig litteratur. I Norge ble det i Bjørvika -prosjektet benyttet flygeaskedoseringer opp mot 40 %. Slike doseringsnivåer har også blitt brukt i andre norske veiprosjekter de siste årene.

Den europeiske sementstandarden EN 197-1 tillater produksjon av sement med inntil 55 % flygeaske, i klassen «Pozzolansement» CEM IV/B. Slike sementer har i flere år vært i kommersiell bruk i Storbritannia. Se ellers kapittel 2 for nærmere beskrivelse av de ulike klassene gitt av sementstandarden.

Det kan også nevnes at flygeaske kan brukes som en komponent i såkalte geopolymere bindemidler sammen med natriumsilikat. Slik bruk av flygeaske vil ikke bli behandlet i denne rapporten.

Råjernslag er et biprodukt fra produksjon av jern. Ved hurtig kjøling ved bruk av vann dannes det et granulært som i hovedsak er amorft (glassfase). Slagg er et **latent hydraulisk** materiale, med begrenset pozzolansk reaktivitet. Når slagg betegnes somt «latent hydraulisk» innebærer det at slagg ikke reagerer

² Byen het tidligere Puteoli, og pozzolan har på latin navnet «pulvis puteolanus».

kjemisk med rent vann, men må aktiveres ved høy pH for å bryte ned glassfasen. En av de vanligste måtene å bruke slagg på er å blande det med Portlandsement, da alkalihydroksider og kalsiumhydroksid fra hydratasjonen av Portlandsement fungerer som kjemisk aktivator for slagget. Innblandingsgraden av slagg ligger vanligvis mellom 30 og 70 % (masse av totalt bindemiddel). Slagg kan også aktiveres ved andre metoder, dvs. det trenger ikke nødvendigvis å brukes i kombinasjon med Portlandsement. Se Kapittel 3 for mer detaljer rundt kjemiske reaksjoner og reaksjonsprodukter av slagg.

I følge ACI Committee 233 (2003) skriver den første dokumenterte bruken av slagg som bindemiddel i mørtel seg helt tilbake til 1774. Starten på industriell utnyttelse av slagg som bindemiddel regnes for å være i Tyskland i 1862. Emil Lange oppdaget at «granulert slagg», dvs. slagg som ble bråkjølt i vann hadde latente hydrauliske egenskaper (Bijen 1998, ACI Committee 233 2003). Det har vært brukt slagg-kalk sementer kommersielt i Tyskland siden 1865, og produsert slaggsement ved sammaling av slagg, gips og Portlandsement i Tyskland siden 1888 (Bijen 1998) (angis til 1892 av ACI Committee 233, 2003). Tidlig forskning i Tyskland viste at betong av slaggsement hadde gode bestandighetsmessige egenskaper, spesielt i forhold til bruk i sjøvann. Bijen (1998) angir at slaggsement i 1917 hadde oppnådd samme status som Portlandsement, basert på forskning utført ved Materialprüfungsamt i Berlin. I USA ble det startet opp produksjon av blandingssement av slagg og Portlandsement i 1896 (ACI Committee 233, 2003). Bruk av slaggsementer har siden starten spredd seg til en rekke land.

Den europeiske sementstandarden EN 197-1 tillater slaggsementer med mengde slagg opp til 95 % i klassen CEM III/C.

Det kan nevnes at terminologien for slagg og slaggsementer internasjonalt kan være noe forvirrende. I USA og internasjonalt var begrepet «Ground Granulated Blast-furnace Slag» (GGBS) tidligere vanlig (og er vel i stor grad fortsatt vanlig i engelskspråklig litteratur), mens anbefalt kategori nå er «slag cement» (ACI Committee 233, 2003). Slaggsementer (CEM III) omtales som «blastfurnace cements» iht. engelsk terminologi (gitt i sementstandarden EN 197-1), men vil i amerikansk terminologi hete «Portland blast furnace slag cement». Bruk av «slag cement» i USA viser altså til granulert malt slagg og ikke til blandingssementer.

I Tysk terminologi brukes «Eisenportland cement» om slaggsementer med mengde slagg opp til 40 %, mens det for slaggsementer med slaggmengde fra 41-85 % slagg brukes begrepet «Hochofen cement».

En historisk årsak til at bruk av tilsetningsmaterialer som slagg, flygeaske og silikastøv har blitt brukt i stor utstrekning er at de i utgangspunktet har erstattet det dyrere materiale Portlandsement. Materialene i denne kategorien er alle biprodukter fra industrielle prosesser. Neville (1995) påpeker at fra 1970-tallet ble energi betydelig dyrere, noe som medførte økt fokus på alternative tilsetningsmaterialer som silikastøv, flygeaske og slagg i betong. Det hører videre med i bildet at sementproduksjon er en av de største bidragsyterne til CO₂-utslipp, se kapittel 1.2 Miljøkonsekvenser for nærmere omtale.

I tillegg til miljømessige og kostnadmessige fordeler med slike tilsetningsmaterialer har det vist seg at flygeaske og slagg har en rekke andre positive fordeler. Spesielt vil riktig bruk av slike materialer i mange tilfeller gi forbedrede bestandighetsmessige egenskaper og/eller redusert varmeutvikling i massive konstruksjoner. Statens Vegvesen har i løpet av de siste årene vært en pådriver for bruk av betonger med høye volumer flygeaske. For Bjørvika-prosjektet ble det valgt en bindemiddelløsning som var en tre-pulverblanding av Portlandsement, silikastøv og flygeaske. Beskrevet mengde flygeaske var 25-40 % av totalt bindemiddel. Hovedårsaken til dette valget var flygeaskens positive effekt på reduksjon i betongens herdevarme, og derigjennom muligheten til å oppnå begrenset rissutvikling i betongens tidlige herdefase (Larsen et al. 2004).

Etterhvert som materialene har vunnet popularitet på grunn av sine positive egenskaper har også markedsprisen økt. Dette er spesielt tilfellet for silikastøv, som i dagens marked kan være opp til 4-5 ganger dyrere enn Portlandsement. Slagg og flygeaske som separate tilsetningsmaterialer vil på den annen side generelt være billigere enn Portlandsement, mens blandingssementer i stor utstrekning prises omtrent som rene Portlandsementer. Som et eksempel på prisvariasjoner for flygeaske og slagg har

Bouzoubaa & Fournier (2005) i sin oversikt for Canada vist at prisene for flygeaske varierer fra 38 til 80 % av prisen for Portlandsement, avhengig av lokalt marked i de ulike provinsene. Tilsvarende oppgis prisen for slagg å være 80-85 % av prisen for Portlandsement i Canada.

I tillegg til flygeaske og slagg finnes det flere andre alternative tilsetningsmaterialer til betong, f.eks. ulike naturlige og industrielt framstilte pozzolaner. Den europeiske sementstandarden EN 197-1 åpner for hele 27 sementfamilier og gir svært mange muligheter. Justnes (2007) gir i sin state-of-the-art rapport en oversikt over mulighetene som finnes for å lage blandingssementer innenfor rammene av den europeiske sementstandarden.

1.2 Miljøkonsekvenser

Sementbransjen har høyt fokus på å minimere utslipp til luft og vann, samt å minimere mengde avfall til deponi. Utslipp fra sementindustrien omfatter blant annet saltsyre, svovel, nitrogenoksider og tungmetaller. I tillegg har sementindustrien vært forbundet med utslipp av støv til luft. Hovedfokus er likevel på sementindustriens utslipp av CO₂, som er en av de viktigste av de såkalte drivhusgassene. Grunnen til dette er at sementindustrien globalt sett er en av de viktigste bidragsyterne til CO₂-utslipp. Det verserer ulike tall for omfanget. I følge Malhotra (2010) står sementproduksjon for ca. 7 % av totalt utslipp av CO₂ i verden i dag, mens tall fra Heidelberg Cement indikerer et noe lavere omfang på ca. 5 % (HCNE 2012).

Produksjon av Portlandsement genererer i området 0,8 – 1,1 tonn CO₂ per tonn produsert sement (Malhotra 2010). For Heidelberg Cements sementproduksjon i region Nord-Europa (Norge, Sverige og Estland) rapporteres CO₂-utslippet til å være 867 kg per tonn klinker (og 736 kg per tonn sement) for året 2011 (HCNE 2012). Brevik, som er største fabrikk i Norge, ligger på et CO₂-utslipp på i underkant av 800 kg per produsert tonn klinker, og like under 700 kg CO₂ per tonn sement (HCNE 2010).

Isolert sett står selve kalsineringen³ av kalkstein for 0,54 tonn CO₂ per tonn produsert Portlandsement (Malhotra 2010, Cahn et al. 1997). Denne delen er i utgangspunktet vanskelig å gjøre noe med, men det må påpekes at blant annet Norcem har ulike teknologier for såkalt «karbonfangst» under utprøving. Resterende del av CO₂-utslippet er knyttet til forbrenningen av fossilt brennstoff som brukes i produksjonsprosessen. Sementbransjen jobber globalt med å redusere CO₂-utslippet. For sementfabrikker som Brevik som har jobbet med dette i en årrekke, og bruker store mengder alternativt brennstoff, vil det videre potensialet for å redusere CO₂-utslipp per tonn produsert klinker være relativt begrenset (hvis vi ser bort fra mulig fremtidig «karbonfangst» og eventuelle nye klinkertyper som krever mindre kalksteinsmel og lavere ovnstemperaturer). Den viktigste veien videre til redusert utslipp er da ved redusert bruk av sementklinker. Med dagens materialteknologi innebærer dette økt bruk av erstatningsmaterialer som eksempelvis flygeaske, slagg eller kalksteinsfiller. Flygeaske og slagg kan i denne sammenheng betraktes som "miljønøytrale" hvis vi ser bort fra elementer knyttet til transport og nedmaling.

Miljøaspektet ved å erstatte Portlandklinker med flygeaske og slagg er at man da utnytter disse avfallsmaterialene til høyverdig bruk, og samtidig reduserer bruken av Portlandklinker. Alternativet er at materialene legges på deponi (spesielt aktuelt for flygeaske) eller brukes til mindre krevende formål. Hvor hensiktsmessig det er å generere økende mengder flygeaske ved å produsere elektrisk kraft av kull er en egen diskusjon. Forbrenning av kull generer store mengder CO₂. I følge Wang & Cui (2007) er f.eks. kull fra Kina karakterisert ved et høyt svovelinhold, noe som medfører store mengder utslipp av SO₂ til atmosfæren. Dette gir igjen store problemer med sur nedbør over store deler av Kina. Men når flygeaske først er tilgjengelig i store mengder ligger det uten tvil en stor miljømessig og ressursmessig gevinst i å utnytte materialet til sement og betong. Den største miljøgevinsten ligger altså på redusert

³ Kalsinering er prosessen hvor kalksteinen (som hovedsakelig består av mineralet kalsitt CaCO₃) blir varmet opp og splittet til brennt kalk CaO under frigivelse av CO₂ til atmosfæren.

CO₂-forbruk. I tillegg har f.eks. Malhotra & Mehta (2005) påpekt at deponier av flygeaske kan medføre en fare for utlekking av tungmetaller til grunnvann, mens ved bruk i betong vil tungmetallene bindes opp i stabile kjemiske forbindelser.

I miljøssammenheng fokuseres det ofte på reduserte utslipp i byggefasen. Det som imidlertid er riktigst, er å vurdere det hele i et livsløpsperspektiv. Da kommer levetid og behov for reparasjoner i konstruksjonens levetid inn som sentrale elementer. Hovedmålsettingen med denne rapporten er nettopp å belyse aspektene rundt bestandighet og levetid, og hvilken effekt tilsetningsmaterialer har i så måte.

1.3 Litt om forbruk og tilgjengelighet av sement, flygeaske og slagg

1.3.1 Portlandsementer og blandingssementer

Globalt forbruk av sement har økt dramatisk i den siste 10-års perioden, se Tabell 1. Isolert sett står Kina for hoveddelen av økningen, og produserte ifølge tall fra Cembureau (2012) mer enn 57 % av all sement i verden i 2011. Samme kilde oppgir at total mengde produsert sement for året 2011 var 3600 millioner tonn. Den prosentvise fordelingen for regioner og de største landene vises i Figur 1.

For å sette dette i relasjon til norske forhold så produserte Norcem på sine fabrikker i Brevik og Kjøpsvik 1,55 millioner tonn sement i 2011 (HCNE 2012). Det totale norske forbruket av sement er høyere enn dette fordi det også importeres sement. For tiden importerer og selger Cemex sement til det norske markedet, mens Unicon importerer sement til eget bruk. Importert volum av sement utgjør i størrelsesorden 25 % av totalt sementvolum i dagens norske marked (2015). Det norske sementforbruket utgjør rundt regnet 0,05 % av verdens totale sementproduksjon. Til sammenligning utgjør befolkningen i Norge omtrent 0,07 % av verdens befolkning.

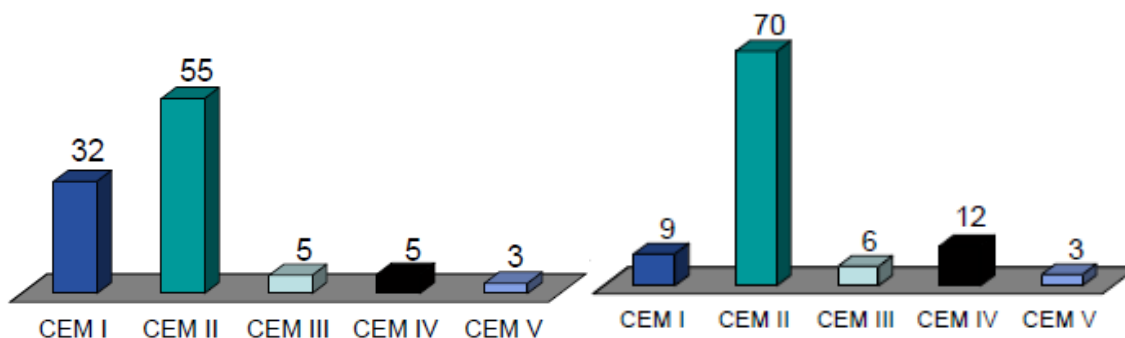
Tabell 1 Utvikling av sementforbruk i perioden 2001 til 2011 for «G-20-gruppen». (Cembureau 2012)

Country	Cement production ^o (Million tonnes)							
	2001	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011 ^p
China	661.0	1 068.8	1 236.8	1 361.2	1 388.4	1 644.0	1 881.9	2 063.2
India	102.9	142.7	159.0	170.5	183.3	186.9	213.9	223.5 e
European Union	225.9	248.0	264.8	271.0	251.8	201.0	190.9	195.3
USA	88.9	99.3	98.2	95.5	86.3	63.9	65.5	67.7
Brazil	39.4	38.7	41.4	45.9	51.6	51.7	59.1	63.9
Turkey	30.0	42.8	47.4	49.3	51.4	54.0	62.7	63.4
Russian Federation	28.7	48.7	54.7	59.9	53.5	44.3	50.4	56.1
Japan	75.9	68.7	69.9	67.8	63.0	54.9	51.7	51.5
Korea, Rep. of	52.0	47.2	49.2	52.2	51.7	50.1	47.4	48.3
Saudi Arabia	20.0	26.1	27.0	30.3	37.4	37.8	42.5 e	47.0 e
Indonesia	31.1	33.9	33.0	35.0	38.5	36.9	39.5	45.2
Mexico	30.8	36.0	38.8	39.5	38.3	37.1	38.9	39.8 e
Germany	32.1	31.0	33.6	33.4	33.6	30.4	29.9	33.5
Italy	39.8	46.4	47.8	47.4	43.0	36.4	34.4	33.1
France	19.1	20.9	22.0	22.1	21.2	18.1	18.0	19.4
Canada	12.1	13.5	14.3	15.1	13.7	11.0	12.4	12.3 e
Argentina	5.5	7.6	8.9	9.6	9.7	9.4	10.4	11.6
South Africa *	8.4	12.1	13.1	13.7	13.4	11.8	10.9	11.2
Australia	6.8	9.1	9.2	9.5	9.7	8.7	9.1	9.6 e
United Kingdom	11.9	11.6	12.1	12.6	10.5	7.8	7.9	8.3

Notes: ^o Cement production including cement produced with imported clinker
^p: Preliminary – e: Estimation – *: Estimation including cementitious

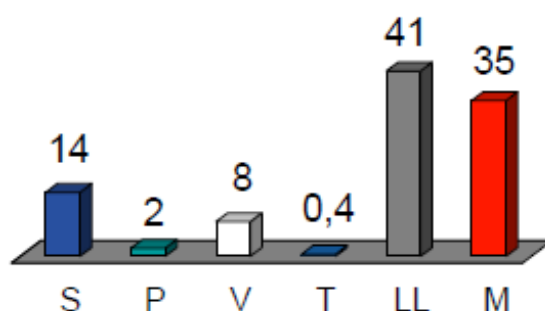
Figur 1 Global prosentvis fordeling av verdens sementproduksjon fordelt på land og regioner. Fra Cembureau 2012.

Bruken av ren Portlandsement CEM I er generelt på vikende front i Europa, dog med store forskjeller fra land til land. Det er også store forskjeller for de ulike fasthetsklassene av sement. I den høyeste klassen 52,5 var CEM I fortsatt dominerende i 2003, mens det i klassene 42,5 og 32,5 var høye andeler blandingssementer. Figur 2 viser prosentvis forbruk av de 5 ulike sementklassene (tall fra 2003) for henholdsvis alle styrkeklasser (venstre figur) og for sementer i fasthetsklasse 32,5 (høyre figur).



Figur 2 Europeisk sementproduksjon, fordeling mellom ulike sementklasser. Venstre figur; alle fasthetsklasser, Høyre figur; kun fasthetsklasse 32,5. Alle tall fra 2003. (Eco-serve 2006).

CEM II er den klart mest “populære” klassen sement. Denne klassen omfatter både Portland-slaggssement og Portland-flygeaskesement i tillegg til 5 andre varianter, se detaljert beskrivelse i Kapittel 2. I klassen CEM II tillates tilsetninger opp til 35 % av total sementvekt. I Figur 3 vises fordeling av ulike typer CEM II i fasthetsklasse 32,5. Figuren viser at kalksteinsfillersement (klasse LL) dominerer, etterfulgt av Portland-komposittsement (klasse M). Samtidig viser figuren at andelen Portland-slaggssement (klasse S) og Portland-flygeaskesement (klasse V) ligger relativt lavt.



Figur 3 Fordeling av ulike typer CEM II i fasthetsklasse 32,5. Tall fra 2003. (Eco-serve 2006).

De nasjonale forskjellene er store. Eco-serve rapporten (2006) oppgir eksempelvis at Tyskland hadde et høyt forbruk av CEM I på mer enn 50 %, mens et land som Hellas hadde et CEM I forbruk på mindre enn 10 % (tall for 2003). Slike tall, dvs. salgsvolumer av ulike typer sement i de forskjellige land oppgis for tiden ikke fordi Europeiske myndigheter mener at dette kan være konkurransesensitiv informasjon. Cembureau har derfor ikke samlet inn eller publisert data som dette på flere år (Rønning 2016). Norcem oppgir derfor heller ikke lengre prosentvis fordeling mellom de ulike produserte sementtypene. Tilgjengelige tall fra 2005 viser imidlertid at flygeaskesementer (CEM II/A-V) da hadde en

markedsandel på 38 % i Norge (Eco-serve 2006). Andelen har økt betraktelig siden da, men eksakte tall er altså ikke tilgjengelige.

I Heidelberg Cement region Nord-Europa, som omfatter sementfabrikkene i Norge, Sverige og Estland, var i 2009 gjennomsnittlig mengde klinker i solgt sement 84 % (HCNE 2010). Målet for denne regionen i Heidelberg Cement var å redusere gjennomsnittlig mengde klinker til 80 % i løpet av 2014 (HCNE 2012). Det langsiktige målet for hele konsernet Heidelberg Cement er å redusere gjennomsnittlig klinkermengde for all produsert sement til 75 % (HCNE 2010). Denne dreiningen mot bruk av lavere andel Portlandsklinker er en generell trend også for andre store sementprodusenter.

I Norge har Norcem siden 1980-tallet i varierende grad brukt flygeaske som erstatning for klinker, i de tidligere MP-sementene⁴ og i de nåværende FA-sementene. Norcem Anleggsement FA og inntil nylig også Norcem Standardsement FA er i klasse CEM II/A-V som tillater opp til 20 % flygeaske. Ny Norcem Standardsement FA har imidlertid en tilsetning av 4 % kalksteinsfiller i tillegg til ca. 18 % flygeaske, og deklarerer i klasse CEM II/B-M. De gamle CEM I-typene Norcem Standardsement og Norcem Anleggsement er i stor grad faset ut, og leveres i svært begrenset omfang. Den tidligere SR-sementen er faset ut. Som erstatning for denne kan Norcem levere Cementa-produktet «Anlægningssement». I tillegg til Norcems FA-sementer har vi også på det norske markedet en importert CEM II/B-S som inneholder 33 % råjernslag, denne markedsføres og selges i Norge av Cemex under navnet «Miljøsement».

Følgende sementer er dermed i «ordinær» bruk i Norge i dag:

• Norcem Standard FA	18 % FA, 4 % kalkmel	CEM II/B-M 42,5 R
• Norcem Anlegg FA	17 % flygeaske	CEM II/A-V 42,5 N
• Norcem Industrisement	Finmalt, ren Pc	CEM I 42,5 R
• Cemex Miljøsement	33 % råjernslag	CEM II/B-S 52,5 N
• Cemex Rapid	Finmalt Pc	CEM I 52,5 R
• Aalborg Rapid	Høyfast Pc	CEM I 52,5 N (LA)

I tillegg til de opplistede sementene produserer Norcem en spesialsement til bruk i oljebrønner (Norwell oilwell), samt en egen mursement. Norcem leverer også hvitsementen Aalborg White fra Danmark, og som nevnt også sulfatresistent sement fra Sverige (Cementa Anlægningssement). Cemex kan i tillegg til de opplistede sementer levere slaggsement (CEM III/A eller CEM III/B) til spesielle prosjekter etter nærmere avtale.

Volumfordelingen mellom de ulike sementene er ikke tilgjengelig, men flygeaskesementene er de dominerende i Norge i dag. I Sverige har man i en periode valgt en annen strategi hvor man bruker kalksteinsfiller i den såkalte «Byggement» som er en CEM II/A-LL. I 2005 var markedsandel av denne sementen i Sverige på hele 70 % ifølge Eco-serve (2006). Det er imidlertid nå kommet flygeaskesement under navnet «Bacement», som er deklarerert i kategorien CEM II/A-V 52,5 N.

Statens vegvesen tillater per i dag (2016) følgende sementer til generell bruk i sine konstruksjoner: Norcem Standard FA, Norcem Anlegg FA, Aalborg Rapid og Cemex Miljøsement.

⁴ MP30-1 fra Brevik og Slemmestad hadde 10 % flygeaske fra ca. 1983-1985. MP30-2 fra Brevik og Slemmestad hadde fra 1985 20 % flygeaske. Den «moderne» Standard FA med 20 % FA ble produsert fra ca. 1995 i Brevik, og fra slutten av 1990-tallet i Kjøpsvik. (I perioden 1990-1995 var det begrenset produksjon av sementer med flygeaske.) Det ble i en relativt kort periode fra ca. 1983-1987 produsert MP30-1 fra Kjøpsvik med 10 % slagg (Zachariassen 2016).

1.3.2 Tilgjengelighet og bruk av flygeaske og slagg

Tall for totale mengder tilgjengelig flygeaske og slagg i verden er relativt usikre. Malhotra (2010) har publisert en oversikt basert på publiserte data og personlig kommunikasjon. Han anslår i sin oversikt at tilgjengelig mengde flygeaske var ca. 900 millioner tonn i 2006. Han anslår videre at mengden flygeaske vil øke til ca. 2000 millioner tonn i 2020. Mesteparten av tilgjengelig flygeaske i verden stammer fra forbrenning av antrasitt og bituminøst kull, og gir dermed opphav til silikatholdige flygeasker (type V iht. EN 197-1, type F iht. ASTM C 618). Flygeasker fra lignitt eller sub-bituminøst kull som gir opphav til kalkholdige flygeasker (klasse C) har historisk sett vært mindre brukt, men brukes nå i land som USA og Canada og enkelte europeiske land som Polen og Hellas (Malhotra 2010). Kjemisk sammensetning og reaksjonsmekanismer for de ulike typene av flygeaske vil bli videre behandlet i Kapittel 3.

Det er mye som tyder på at tilgangen av flygeaske globalt sett vil være svært god i årene som kommer. Dette illustreres av artikkel i Aftenposten 23. november 2011, som har følgende overskrift: "*Vestlige utslippskutt hjelper ikke når Kina og India satser på kull*" Følgende informasjon fremkommer i artikkelen:

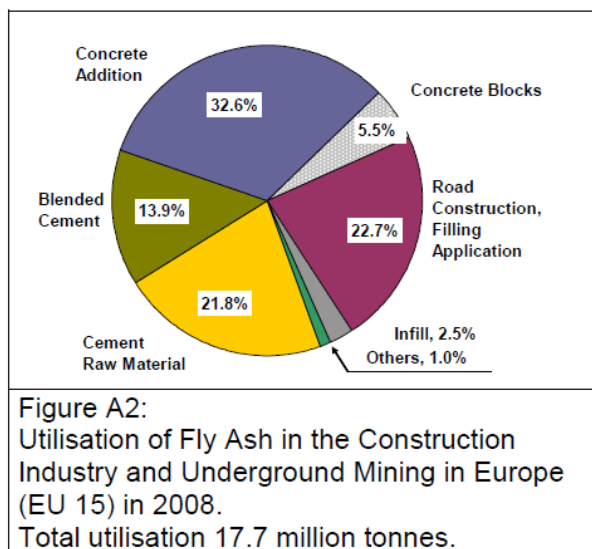
- I følge Det internasjonale energibyrået **IEA** vil verdens kulletterspørsel øke med 25 prosent det neste tiåret, hvis dagens planer blir fulgt.
- Kull er verdens nest viktigste energikilde etter olje, og sto i 2010 for 28 prosent av den globale energibruken og hele 40 prosent av elektrisitetsproduksjonen.
- Kinas andel av verdens kullforbruk økte fra en fjerdedel i år 2000 til halvparten i 2010.
- Kull er den "skitneste" av de fossile energikildene, og kullkraftverk slipper ut opptil 70 prosent mer CO₂ enn gasskraftverk
- I tillegg til Kina står India for størst økning i kullfyrte kraftverk.
- Det åpnes nye kullfyrte kraftverk hver uke i India og Kina!

De miljømessige aspektene av å bruke flygeaske i betong er diskutert i Kapittel 1.2 Miljøkonsekvenser.

Det er store kvalitetsforskjeller på flygeaske, og langt fra all generert flygeaske tilfredsstillende kravene som stilles for bruk i betong. Brennan (2012) påpeker imidlertid at det finnes tilgjengelig teknologi for såkalt «fly ash beneficiation», dvs. prosesser for å forbedre kvaliteten til flygeasker som i utgangspunktet ikke tilfredsstillende kravene gitt av den europeiske flygeaskestandard EN 450-1. Kvalitetsforbedringen går ofte på reduksjon av mengde karbon, men kan også omfatte justering av partikkelstørrelsesfordeling ved hjelp av sikting og eventuelt også nedmaling av flygeaske. Wang & Cui (2008) rapporterer at en stor andel av flygeaske i Kina ikke oppfyller nasjonale krav som settes for at asken skal brukes til betong, og dermed må gjennom en foredlingsprosess. For høy mengde karbon og/eller svovel er de viktigste årsakene til dette.

I følge tall fra Ecoba (2011) genereres det ca. 38 millioner tonn flygeaske per år for EU-15⁵, mens tall som inkluderer hele Europa (EU-25) viser en årlig mengde i størrelsesorden 65-70 millioner tonn per år (2008 tallene er her lagt til grunn). Det er langt fra all denne flygeasken som oppfyller kravene som stilles for bruk i sement og betong. Av de 38 millioner tonn flygeaske som i 2008 ble generert i EU 15, ble 17,7 tonn brukt i bygg- og anleggsbransjen, se Figur 4. Som vist i figuren ble totalt ca. 68 % av de 17,7 millioner tonn (eller ca. 32 % av hele volumet på 38 millioner tonn) brukt sementrelatert, enten i form av råmateriale til sementproduksjon, som del i blandingssementer eller som tilsetningsmateriale til betong. Av de 38 millioner tonn generert i EU 15 var det altså bare drøye 8 millioner tonn som ble brukt i blandingssement eller som tilsetning i betong, altså i overkant av 20 % av generert flygeaske. Det er ellers verdt å merke seg at det i 2008 ble brukt over dobbelt så mye flygeaske direkte tilsatt i betong som det ble benyttet i blandingssementer.

⁵ EU-15 refererer til de 15 medlemsland som EU bestod av etter utvidelsen i 1995 (det var opprinnelig 12 land fra 1993). EU-25 viser til antall land etter utvidelsen i 2004. Fra 2013 består EU av 28 land.



Figur 4 Bruk av flygeaske i EU 15 i 2008. (ECOBA 2011)

I Nord-Amerika brukes det ifølge tall fra Thomas (2007) flygeaske i 54 % av betongen som leveres fra ferdigbetong-leverandørene. Dette dreier seg i all hovedsak om flygeaske direkte tilsatt i betong. Generert mengde flygeaske i USA har i de siste årene variert i intervallet 60-70 millioner tonn, hvor ca. 40-45 % av volumet blir utnyttet industrielt og resterende volum deponert. Av flygeasken som blir utnyttet brukes om lag halvparten til betongrelaterte formål. For året 2011 oppgis at ca. 12 millioner tonn ble brukt som tilsetning i betong, mens ca. 2 millioner tonn ble brukt i blandingssementer (ACCA 2012). I Canada er produsert årlig mengde flygeaske i underkant av 5 millioner tonn, hvorav ca. 45 % oppgis å være egnet til bruk i betong (Bauzobaa & Fournier 2005).

Kina har som tidligere omtalt et stort og økende antall kullfyrte kraftverk. I følge Wang & Cui (2007) kommer ca. 80 % av den elektriske kraften i Kina fra kullfyrte kraftverk. Denne kraftproduksjonen genererte i 2006 i størrelsesorden 300 millioner tonn flygeaske (inklusive ca. 10 % bunnaske). Det er usikkerhet knyttet til størrelsen på dette tallet. Malhotra (2010) har rapportert tall for 2006 som ligger ca. 3 ganger over disse tallene, dvs. 900 millioner tonn aske, hvorav ca. 20 % blir brukt i betong.

I Japan står kullfyrte kraftverk for ca. 16 % av elektrisk kraft, og mengde generert flygeaske fra kraftverkene er omtrent 8 millioner tonn per år. Hoveddelen av dette rapporteres å bli bruk i betong (Ishikawa, 2007).

Når det gjelder slag fra produksjon av råjern er tilgangen langt mer begrenset enn flygeaske. Malhotra (2010) har anslått global årlig tilgang på råjernsslag til kun 25 millioner tonn. Disse tallene viser seg imidlertid å være alt for lave. Mengde tilgjengelig råjernsslag i Europa var 23,5 millioner tonn i 2010, mot 28,1 og 28,9 millioner tonn tilgjengelig slag henholdsvis i 2008 og 2006 (Euroslag 2012). Ca. 80 % av volumet er tilgjengelig i granulert⁶ form, og resterende mengde luftkjølt og i krystallin form. Av tilgjengelig mengde slag brukes i størrelsesorden 70 % enten som bestanddel i blandingssement, eller som tilsetning i betong. Resterende volum av råjernsslag i Europa er stort sett relatert til bruk som vegbyggingsmateriale. Normalt brukes nærmere 100 % av tilgjengelig mengde råjernsslag i Europa. Ut fra tallene rapportert av Euroslag (2012) kan vi lese at bruken av slag i sement eller betong er i

⁶ Ved bråkjøling av slag dannes granuler av hovedsakelig amorf (glassaktig) karakter, se Kapittel 3.

størrelsesorden 15-20 millioner tonn per år i Europa for perioden 2006-2010. Til sammenligning ble det i 2011 brukt 16,7 millioner tonn slagg til sement/betong i Japan (Nippon slag Association 2012), mens det i USA (2007-tall) ble brukt 3,4 millioner tonn slagg (SCA 2012).

I følge ACI Committee 233 (2003) brukes i USA slagg i all hovedsak som tilsetning i betong, og i langt mindre grad i form av blandingssement. Nyere tall fra Slag Cement Association (2012) viser imidlertid at bruken i de seneste årene har dreid noe mot økt bruk av slagg i form av blandingssementer. Tallene for 2007 viser at slagg brukt i form av blandingssementer utgjorde ca. en tredjedel av totalt slaggforbruk, mens resterende del ble benyttet som tilsetning på betongfabrikk.

Gjennomgangen har vist at tilgangen på flygeaske globalt sett er langt høyere enn tilgangen på slagg. For USA viser tallene at forbruket av flygeaske er 8-10 ganger høyere enn forbrukt mengde slagg i betong. Tallene viser imidlertid store regionale forskjeller. Ut fra det tilgjengelige tallmaterialet kan vi lese at generert mengde flygeaske er 3-4 ganger høyere enn generert mengde slagg i Europa. Til tross for dette er mengde slagg brukt i betong omtrent dobbelt så høyt som mengde flygeaske brukt i betong i Europa.

Selv om det globalt sett vil være god tilgang på flygeaske i uoverskuelig framtid, vil det være store forskjeller fra region til region. I Europa har det i de seneste årene vært mangel på flygeaske av god nok kvalitet, noe som er forventet å endre seg i løpet av få år ved oppstart av nye store kullfyrte kraftverk. Gjennomgangen har vist at det globalt sett er store forskjeller mht. hvor stor andel av tilgjengelig flygeaske og slagg som faktisk utnyttes i betong. Tallene viser at andelen flygeaske som brukes i betong varierer fra noen få prosent i enkelte land til opp til ca. 25 % i andre land. Utnyttelsesgraden for slagg til betong varierer også i betydelig grad, fra ingen bruk i noen land til ca. 70 % i gjennomsnitt for Europa. En årsak til mangelfull utnyttelse er at kvaliteten i mange tilfeller ikke er god nok til å oppfylle kravene som er satt til bruk i betong i de ulike nasjonale regelverk. Globalt sett ser det ut til å være et stort potensiale for å øke utnyttelsesgraden av flygeaske ved i økende grad å ta i bruk tilgjengelig teknologi for å forbedre kvaliteten.

Norge har som kjent ingen kullfyrte kraftverk, og etter at råjernsproduksjonen i Mo i Rana ble lagt ned i 1989 heller ingen produksjon av råjern fra malm. All flygeaske og slagg til bruk i betong i Norge er derfor importert.

2 Standarder og formelle rammer

2.1 Innledning

I de følgende avsnitt gjengis de krav som gjelder for flygeaske og slagg ifølge norsk regelverk, i tillegg til de krav som Statens vegvesen stiller til sine betongkonstruksjoner. Slagg og flygeaske kan inngå som en definert del av sement i tråd med sementstandarden NS-EN 197-1. Alternativt kan flygeaske og slagg tilsettes separat som et tilsetningsmateriale etter retningslinjer gitt av betongstandarden NS-EN 206-1. Tilsvarende gjelder også for silikastøv.

2.2 Sementstandarden NS-EN 197-1

Den felleseuropeiske sementstandarden NS-EN 197-1, sammen med den felleseuropeiske betongstandarden EN-206, setter rammeverket for bruk av tilsetningsmaterialer i henholdsvis sement og betong.

Definisjonen på en såkalt **CEM**-sement iht. NS-EN 197-1 er følgende:

”Sement er et hydraulisk bindemiddel, dvs. et finmalt uorganisk materiale som blandet med vann danner en pasta som størkner og herdner gjennom hydratisering og etter herdning beholder sin fasthet og stabilitet også under vann”.

CEM-sementtypene kan i tillegg til Portlandsementklinker bestå av en rekke ulike materialer definert i sementstandarden. I det følgende listes bestanddelene som tillates i CEM-sement (med klassebetegnelser i parentes):

1. Portlandsementklinker (K)
2. Granulert råjernslag (S)
3. Pozzolane materialer
 - a. Naturlig pozzolan (P)
 - b. Naturlig kalsinert pozzolan (Q)
4. Flygeaske
 - a. Silikatholdig flygeaske (V)
 - b. Kalkholdig flygeaske (W)
5. Brent skifer (T)
6. Kalkstein (L og LL, avhengig av mengde organisk karbon)
7. Silikastøv (D)
8. Sekundære bestanddeler
9. Kalsiumsulfat (gips, anhydritt eller hemihydrat)
10. Tilsetninger

Den europeiske sementstandarden EN 197-1 åpner for hele **27 typer** i familien ordinær sement, hvor ren Portlandsement CEM I⁷ utgjør kun en av disse 27 klassene.

Sementstandarden skiller videre mellom 5 hovedklasser sement (engelsk terminologi i parentes):

⁷ Det har siden 1991 vært tillatt med inntil 5 % innblanding av såkalte ”sekundære bestanddeler” i CEM I, slik at terminologien ”ren Portlandsement” strengt tatt ikke lengre er helt korrekt.

- CEM I Portlandsement (Portland cement)
- CEM II Portland- blandingsement, totalt 7 undergrupper (Portland-composite cement)
- CEM III Slaggsement (Blastfurnace cement)
- CEM IV Pozzolansement (Pozzolanic cement)
- CEM V Blandingsement (Composite cement)

I Tabell 2 gjengis en oversiktstabell som viser et utdrag av sementtypene i NS-EN 197-1.

Tabell 2 Utdrag av de 27 sementtypene i familien «ordinære sementer». Fra Maage (2015).

Hoved- type	Betegnelse		Sammensetning (masseprosent ^a)					
			Hovedbestanddeler					Sekun- dære bestand- deler
			Klinker K	Råjern- slag S	Silika-støv D ^b	Flyge- aske V	Kalk- stein L og LL	
CEM I	Portland-sement	CEM I	95–100	–	–	–	–	0–5
CEM II	Portland- slagsement	CEM II/A-S	80–94	6–20	–	–	–	0–5
		CEM II/B-S	65–79	21–35	–	–	–	0–5
	Portland- silikastøvsement	CEM II/A-D	90–94	–	6–10	–	–	0–5
	Portlandflyge- askesement	CEM II/A-V	80–94	–	–	6–20	–	0–5
		CEM II/B-V	65–79	–	–	21–35	–	0–5
	Portlandkalk- fillersement	CEM II/A-L	80–94	–	–	–	6–20	0–5
		CEM II/A-LL	80–94	–	–	–	6–20	0–5
	Portland- blandingsement ^c	CEM II/A-M	80–88	12–20			–	0–5
		CEM II/B-M	65–79	21–35			–	0–5
	CEM III	Slaggsement	CEM III/A	35–64	36–65	–	–	–
CEM III/B			20–34	66–80	–	–	–	0–5
CEM III/B			20–34	66–80	–	–	–	0–5

a Verdiene i tabellen er gitt som prosent av summen av hovedbestanddeler og sekundære bestanddeler
b Andelen av silikastøv er begrenset til 10 %.
c I portlandblandingsement CEM II/A-M og CEM II/B-M skal hovedbestanddelene unntatt klinker angis ved betegnelse av sementen.

Merk at tabellen over kun viser 12 av de 27 ordinære sementtypene. Mange av CEM II-variantene er ikke vist i tabellen, heller ikke CEM IV og CEM V er vist.

I tillegg til de såkalte «ordinære» sementene inneholder sementstandarden også 7 typer sulfatresistent (SR) sement. Merk at både betongstandarden NS-EN 206 og R762 Prosesskode 2 gir regler for sammensetning av sulfatresistente bindemidler. Sulfatresistente betonger behandles i Kapittel 7 Kjemisk bestandighet.

Vi har i Norge hatt en egen nasjonal standard, NS 3086: "Sement med spesielle egenskaper". Denne omfattet følgende tre spesialsementer: Sulfatresistent sement (SR), lavalkalisement (LA) samt sement med høy tidligfasthet med betegnelse RR. Denne sementstandarden ble imidlertid trukket tilbake i desember 2015.

2.3 Regler for bruk av ulike sementtyper

Det er ulike nasjonale regelverk for hvilke sementtyper som er tillatt rundt omkring i Europa – og i den øvrige verden. Man må anta at de nasjonale regelverk i stor grad er en konsekvens av forskjellig tilgang på råmaterialer, samt ulike forhold i klimatiske forhold og miljøbelastning. Som en konsekvens av disse og andre faktorer har det utviklet seg forskjellige tradisjoner i de ulike land. Det er derfor svært store variasjoner i Europa mht. hvilke sementer som er på markedet. I tillegg er de nasjonale reglene for hvilke sementer som er tillatt brukt for ulike typer miljøbelastning varierende.

Norsk regelverk på området er gitt av nasjonalt tillegg til NS-EN 206, nærmere bestemt i Tabell NA.12 som gjengis nedenfor, se Tabell 3. Av tabellen kan vi lese at det for flere av sementene er knyttet strengere regler til øvre grenseverdi i bestandighetsklasse M60. Dette gjelder for alle Portland-flygeaskeementene CEM II/A-V og CEM II/B-V, hvor masseforholdet må reduseres fra 0,60 til henholdsvis 0,55 og 0,50. På tilsvarende vis er det satt strengere krav til masseforhold også for Portland-slaggsementer (klasse CEM II/A-S og CEM II/B-S), samt slaggsementene CEM III/A og CEM III/B. Denne innskjerpingen av masseforhold i klasse M60 er begrunnet ut fra at sementer med flygeaske og slagg har dårligere motstand mot karbonatisering. Karbonatisering behandles i Kapittel 5 Korrosjonsegenskaper.

Vi kan videre lese av Tabell 3 at for sementtyper med > 20 % slagg eller flygeaske gir ikke det nasjonale tillegget regler i klassene MF40 og MF45. Dette er begrunnet ut fra at bindemidler med moderate til høye mengder flygeaske og slagg vil kunne gi redusert frostmotstand. Motstand mot frost behandles i Kapittel 6.

For bindemidler hvor det nasjonale tillegg til NS-EN 206 ikke gir regler, eller hvor man ønsker å dokumentere andre grenseverdier enn de som er oppgitt i Tabell NA.12, gis det anledning til å dokumentere utvidede bruksegenskaper for sementer og bindemidler. Dette kan gjøres iht. regler gitt i NA.5.3.2, og spesielt i Tabell NA.14 i det nasjonale tillegget. Slik prøving er for eksempel gjennomført for sementene Cemex miljøsement (CEM II/B-S) og Norcem Standard FA sement (CEM II/B-M). Slik prøving vil dokumentere det enkelte produkt innenfor hver enkelt klasse.

Det er egne krav til sammensetning av betong i sulfatholdig miljø gitt av Tabell NA.13 i nasjonalt tillegg til NS-EN 206. Sulfatbestandighet gjennomgås i Kapittel 7.

Tabell 3 Grenseverdier for luftinnhold, bindemiddelmengde og masseforhold. Gjengivelse av Tabell NA.12 i nasjonalt tillegg til NS-EN 206.

Egenskap	Bestandighetsklasse					
	M90	M60	M45	MF45 ^{a, b, c}	M40 ^d	MF40 ^{a, b, c, d}
Minste luftinnhold i fersk betong				4 %		4 %
Minste effektive bindemiddelmengde ^e	225	250	300	300	330	330
Sementtype	Største masseforhold ^{f, g, h}					
CEM I	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/A-S, 6-20 % slagg	0,90	0,55	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/B-S, 21-35 % slagg	0,90	0,55	0,45	-	0,40	-
CEM II/A-D, 6-10 % silikastøv	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/A-V, 6-20 % flygeaske	0,90	0,55	0,45	0,45	0,40	0,40
CEM II/B-V, 21-35 % flygeaske	0,90	0,50	0,45	-	0,40	-
CEM II/A-L, 6-20 % kalkfiller L	0,90	0,50	- ⁱ	-	- ⁱ	-
CEM II/A-LL, 6-20 % kalkfiller LL	0,90	0,50	- ⁱ	-	- ⁱ	-
CEM II/A-M, 12-20 % diverse	0,90	- ^{j, k}	- ^{j, k}	- ^k	- ^{j, k}	- ^k
CEM II/B-M, 21-35 % diverse	0,90	- ^{j, k}	- ^{j, k}	- ^k	- ^{j, k}	- ^k
CEM III/A, 36-65 % slagg	0,90	0,50	0,45	-	0,40	-
CEM III/B, 66-80 % slagg	0,90	0,45	0,45	-	0,40	-

^a For bestandighetsklasse MF40 og MF45 skal det anvendes frostsikkert tilslag (se NA.5.1.3).

^b Standarden gir ikke regler for produksjon av frostsikker betong uten bruk av luftinnførende tilsetningsstoffer.

^c Standarden gir ikke anvendelsesregler for bestandighetsklassene MF45 og MF40 om den samlede mengden flygeaske og slagg (V + S) er større enn 20 vektprosent i forhold til bindemiddelmengde. Tilfredsstillende frostbestandighet kan likevel dokumenteres iht. NA.5.3.2(902) for sement eller bindemiddelkombinasjoner der samlet innhold (i sement + tilsatt) er over 20 %.

^d Bindemidlet skal minst inneholde 6 % silikastøv eller samlet minst 14 % flygeaske, silikastøv og slagg (V + D + S) i bestandighetsklassene MF40 og M40.

^e Betongens effektive bindemiddelmengde er: sement + (k * flygeaske) + (k * silikastøv) + (k * slagg).

^f Ved bruk av tilsetningsmaterialer gjelder grenseverdien for største masseforhold for den sementtypen som tilsetningsmaterialene tilsettes til.

^g Der flere sementtyper som det er gilt anvendelsesregler for blandes, kan største tillatte masseforhold fastsettes som et vektet middel av kravene til de enkelte sementtypene.

^h "-" i tabellen betyr at Norsk Standard ikke gir anvendelsesregler for denne kombinasjonen av sementtype og bestandighetsklasse. Det henvises også til NA.5.3.2(902).

ⁱ CEM II/A-L og CEM II/A-LL kan anvendes etter reglene for CEM I forutsatt at mengden kalkfiller L og LL ut over 5 % ikke tas med i beregningen av masseforholdet.

^j CEM II/A-M og CEM II/B-M kan benyttes med grenseverdier som for CEM I, CEM II/A-V og CEM II/A-S, dersom det ved beregning av masseforhold ses bort fra andelen materiale (hovedkomponenter) som bringer sementen over grenseverdiene for hhv. CEM I, CEM II/A-V og CEM II/A-S.

^k Det tillates kun sementer som ikke inneholder andre hovedkomponenter enn klinker (K), flygeaske (V), slagg (S) og kalkfiller (L og LL).

2.4 Regler for separat tilsetning av flygeaske, slagg og silikastøv i betong

Ved separat tilsetning av flygeaske, slagg eller silikastøv benyttes k-verdimetoden som beskrevet i NS-EN 206. I følge NS-EN 206 er k-verdimetoden:

«basert på sammenligning av bestandighetsegenskaper (eller fasthet som kriterium for bestandighet der det er hensiktsmessig) mellom en referansebetong med sement «A» og en betongprøve der en del av sement «A» er erstattet med et tilsetningsmateriale beskrevet med vann/sement-forholdet og innhold av tilsetningsmateriale»

Metoden gjør det altså mulig å ta hensyn til tilsetninger av type II ved å erstatte termen vann/semmentforhold med «masseforhold»:

$$\text{Masseforholdet} = \text{vann}/(\text{semment} + k \times \text{tilsetningsmateriale}) \quad (1)$$

På tilsvarende vis defineres effektiv bindemiddelmengde som:

$$\text{Effektiv bindemiddelmengde} = \text{semment} + k \times \text{tilsetningsmateriale} \quad (2)$$

NS-EN 206 angir regler for separat tilsetning av flygeaske og slagg på betongfabrikk. I Tabell 4 gjengis regler for hvilke k-faktorer som kan benyttes avhengig av bestandighetsklasse. K-faktor på 0,7 gjelder altså for alle bestandighetsklasser, bortsett fra M60 hvor en lavere k-faktor på 0,4 gjelder med bakgrunn i at flygeaske reduserer motstanden mot karbonatisering. Det gis imidlertid anledning til å dokumentere andre k-faktorer enn de som er gitt av Tabell 4 basert på utprøving og dokumentasjon etter regler gitt av NA 5.3.2. Dog kan ikke k-faktor dokumenteres til å være høyere enn 1,0.

Tabell 4. k-faktorer for innblanding av flygeaske, avhengig av semmenttype og bestandighetsklasse. Utdrag fra nasjonalt tillegg til NS-EN 206:2013.

Semmentype	Bestandighetsklasse ^{a, b, c}					
	M90	M60	M45	MF45	M40	MF40
CEM I						
CEM II/A-V, CEM II/A-S ^d , CEM II/A-L ^d , CEM II/A-LL ^d CEM II/A-D ^d , CEM II/A-M ^{e, d}	0,7	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7
CEM II/B-V, CEM II/B-S ^d , CEM II/B-M ^{e, d}				-		-
Øvrige sementer	-	-	-		-	

^a Innblanding av flygeaske kan medregnes ved beregning av masseforhold og minste effektive bindemiddelmengde i henhold til kravene i tabell NA.12.

^b "-" i tabellen betyr at Norsk Standard ikke gir regler for dette i denne kombinasjonen av semmenttype og bestandighetsklasse. Det henvises også til NA.5.3.2(902).

^c Verdiene gjelder for semment med en styrkeklasse på minst 42,5. For lavere styrkeklasser reduseres verdiene med 0,1.

^d k-verdien kan brukes for en mengde tilsatt flygeaske inntil andel Portlandsemmentklinker (K) er redusert til 65 % av total bindemiddelmengde.

^e Regelen omfatter semmenttypene CEM II/A-M og CEM II/B-M som kun er basert på hovedkomponentene klinker (K), flygeaske (V), slagg (S) og kalkfiller (L og LL).

Det er også gitt regler for største mengde tilsatt flygeaske som det kan tas hensyn til ved beregning av masseforhold, og også minste effektive bindemiddelmengde. Summen av flygeaske i semment + tilsatt flygeaske kan maksimalt være 35 % av totalt bindemiddel.

Det er på tilsvarende vis gitt regler for k-faktorer ved separat innblanding av slagg, disse er vist i Tabell 5. K-faktor er 0,8 for M(F)45 og M(F) 40, mens det er lavere k-faktorer i bestandighetsklassene M60 og M90. For noen av semmentene er det ikke gitt regler for innblanding av slagg, begrensningen gjelder spesielt i bestandighetsklassene MF40 og MF45.

Tabell 5 k-faktorer ved innblanding av slagg avhengig av sementtype og bestandighetsklasse. Utdrag fra nasjonalt tillegg til NS-EN 206:2013.

Sementtype	Bestandighetsklasse ^{a, b, c, d}					
	M90	M60	M45	MF45	M40	MF40
CEM I	0,7	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8
CEM II/A-V, CEM II/A-S, CEM II/A-L ^e , CEM II/A-LL ^e , CEM II/A-D ^e , CEM II/A-M ^{e, f}						
CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II/B-M ^{e, f}				-	-	
CEM III/A, CEM III/B						
Øvrige sementer	-	-	-	-	-	-

a Innblanding av slagg kan medregnes ved beregning av masseforhold og minste effektive bindemiddelmengde i henhold til kravene i tabell NA.12.

b "-" i tabellen betyr at Norsk Standard ikke gir regler for dette i denne kombinasjonen av sementtype og bestandighetsklasse. Det henvises også til NA.5.3.2(902).

c Verdiene gjelder for sement med en styrkeklasse på minst CEM 42,5. For lavere styrkeklasser reduseres verdiene med 0,1.

d Angitt k-verdi brukes for hele den tilsatte mengden slagg (ut over eventuelt innhold i sementen) inntil beregningsmessig grense for totalt slagginnhold er nådd, se under.

e k-verdien kan brukes for en mengde tilsatt slagg inntil andel Portlandsementklinker (K) er redusert til 40 % av total bindemiddelmengde.

f Regelen omfatter sementtypene CEM II/A-M og CEM II/B-M som kun er basert på hovedkomponentene klinker (K), flygeaske (V), slagg (S) og kalkfyller (L og LL).

Det er også gitt regler for største mengde tilsatt slagg som det kan tas hensyn til ved beregning av masseforhold, og også minste effektive bindemiddelmengde. Summen av slagg i sement + tilsatt slagg kan maksimalt være 60 % av totalt bindemiddel. Maksimal mengde kan økes til 80 % dersom det i sementen kun inngår slagg og sementklinker som hovedkomponenter.

Til sammenligning gjengis også regler for innblanding av silikastøv, hvor følgende k-faktorer tillattes avhengig av bestandighetsklasse

- Bestandighetsklassene M60 og M90 $k = 1,0$
- Alle andre bestandighetsklasser $k = 2,0$

Største mengde silikastøv det kan tas hensyn til ved beregning av masseforhold og minste effektive bindemiddelmengde er gitt av kravet:

$$(\text{tilsatt silikastøv} + \text{silikastøv i sement}) / \text{bindemiddel} = 0,11 \quad (3)$$

Statens vegvesen har omtrent tilsvarende regler for betongsammensetninger og k-faktorer, men avviker litt mht. tillatt mengde flygeaske og minimum mengde portlandsklinker, se kapittel 2.6.

2.5 Standarder for flygeaske, slagg og silikastøv

Kravene til flygeaske og slagg er gitt av standardene NS-EN 450-1 Flygeaske for betong, samt NS-EN 15167-1 Slagg for betong, mørtel og injiseringsmasse. Kravene for silikastøv er tilsvarende gitt av NS-EN 13263-1 Silikastøv for betong. Produktene slagg, flygeaske og silikastøv er underlagt et system for produksjonskontroll og sertifisering på tilsvarende måte som for sement.

Når det gjelder kjemiske og fysiske krav som stilles til henholdsvis flygeaske og slagg vil dette bli diskutert i Kapittel 3. Men vi kan merke oss at av de to typene flygeaske som sementstandarden NS-EN 197-1 viser til, nemlig **silikatholdig flygeaske** (klasse V) og **kalkholdig flygeaske** (klasse W) så tillater flygeaskestandarden NS-EN 450-1 kun silikatholdige flygeasker. Denne klassen (V) tilsvarer omtrent klasse F i USA, se nærmere beskrivelse i Kapittel 3. Flygeaskestandarden er styrende for hva som er tillatt brukt i betong (ved tilsetning på betongstasjon), men den er ikke styrende for hva som er tillatt brukt i blandingssementer. Det er altså et langt strengere regime for flygeaske tilsatt i betong enn flygeaske tilsatt i en blandingssement på sementfabrikk.

2.6 Krav gitt av Statens Vegvesen

2.6.1 Innledning

Statens vegvesen har egne regler for betongsammensetning og delmaterialer gjennom Prosesskode 2. I det følgende gjengis kravene fra Prosesskode 2 (Håndbok R762, 2015):

2.6.2 Tillatte sementer

Prosesskode 2 (2015) gir følgende regler for tillatte sementer:

Sement skal være i henhold til NS-EN 197-1 og av styrkeklasse 42,5 eller 52,5. Sement skal være godkjent som produkt. Det gis ikke generell godkjenning for sementtyper.

Godkjente sementer er (per mai 2016):

- Norcem Anleggsement FA, CEM II/A-V
- Cemex Miljøsement, CEM II/B-S
- Aalborg Rapidsement, CEM I
- Norcem Standardsement FA, CEM II/B-M

Andre sementprodukter kan gis godkjenning forutsatt demonstrert egnethet og dokumentert likeverdighet med godkjente sementprodukter for den aktuelle betongspesifikasjon. Søknad om aksept skal inneholde dokumentasjon av sementproduktets sammensetning og egenskaper, konsekvenser sementproduktet har for betongsammensetning og betongegenskaper, herunder bestandighet og mekaniske egenskaper, samt støpelighet og andre anleggsmessige bruksegenskaper.

Tillatelse til bruk av sement som har til hensikt å gi økt hydratasjonsvarme eller høyere tidligfasthet (tidligere benevnt RR) må innhentes i hvert enkelt tilfelle.

2.6.3 Regler for betongsammensetning

Statens vegvesen har tidligere hatt betongtypene SV-40 og SV-30. Fra 2015-versjonen av Prosesskode 2 er begge disse samlet til en og samme betongbenevnelse, nemlig **SV-Standard**. Det som er nytt fra de tidligere SV-40 og SV-30 betongene hvor sementer med flygeaske og slagg var tillatt, er at det nå alltid skal være en viss innblanding av slagg eller flygeaske, i tillegg til silikastøv. Reglene for SV-Standard gjengis nedenfor:

SV-Standard:

Alternativ 1: Norcem Anleggsement FA	Flygeaske 14 – 30 %	Silikastøv 3 – 5 %
Alternativ 2: Cemex Miljøsement		Silikastøv 3 – 5 %
Alternativ 3: Aalborg Rapid	Flygeaske 14 – 30 %	Silikastøv 3 – 5 %
Alternativ 4: Norcem Standardsement FA	Flygeaske 14 – 30 %	Silikastøv 3 – 5 %

Bestandighetsklasse skal tilsvare MF40, med øvre grenseverdi for masseforhold 0,40. Effektiv bindemiddelmengde skal minst være 350 kg/m³.

Betongspesifikasjonen **SV-kjemisk** skal iht. Håndbok N400 (2015) Bruprosjektering benyttes for:

«Konstruksjonsdeler utsatt for kjemisk angrep fra grunnvann i jord og berg, hvor konsentrasjonene av aggressive ligger innenfor grenseverdiene for eksponeringsklassene XA2 og XA3 i NS-EN 206:2013+NA:2014, tabell 2. Herunder regnes syregivende varianter av alunskifer og sulfidførende bergarter med $pH \geq 4$ ».

SV-Kjemisk

Alternativ 1: Norcem Anlegg sement FA	Flygeaske 14 - 25 %	Silikastøv 8 - 11 %
Alternativ 2: Cemex Miljøsement		Silikastøv 8 - 11 %
Alternativ 3: Aalborg Rapid	Flygeaske 20 - 25 %	Silikastøv 8 - 11 %
Alternativ 4: Norcem Standard sement FA	Flygeaske 14 - 25 %	Silikastøv 8 - 11 %

Tilslag til betong SV-Kjemisk skal være uten innhold av kalkstein eller kalkfiller. Krav for øvrig er som for SV-Standard.

Som en tredje betongspesifikasjon har Statens vegvesen innført betongen **SV-lavvarme**. Denne skal ifølge Håndbok N400 Bruprosjektering benyttes for:

«Konstruksjonsdeler hvor risikoen for gjennomgående fastholdingsriss på grunn av herdevarme og temperaturforskjeller er betydelig, og hvor slik opprissing er kritisk for funksjonsevnen».

SV-Lavvarme

SV-Lavvarme skal være av bestandighetsklasse MF45, med øvre grenseverdi for masseforhold 0,45. Effektiv bindemiddelmengde skal minst være 310 kg/m³.

For lavvarmebetongens sammensetning gjelder følgende forutsetninger:

- Sement skal være blant de godkjente sementproduktene
- Silikastøvinnholdet skal være 3 – 5 %
- Summen av totalt flygeaskeinnhold og eventuelt slagginnhold i sement skal ikke overstige 40 %
- Ekstra slag tilsatt på blandeverk aksepteres ikke

Spesifisert karakteristisk trykkfasthet skal være oppnådd seinest ved 56 døgn alder.

For alle 3 betongvariantene gjelder at k-faktor for tilsatt silikastøv skal være 2,0 og for tilsatt flygeaske 0,7.

Prosesskode 2 har i tillegg følgende bestemmelser om tilsatt flygeaske og silikastøv:

Flygeaske tilsatt som separat delmateriale i betongblanderen skal være i henhold til NS-EN 450-1:2012 klasse A⁸. For flygeaske og silikastøv som det ikke finnes erfaring med i Norge skal egenskapene for betong med det aktuelle tilsetningsmaterialet i kombinasjon med den aktuelle sementen dokumenteres. Egnethet for den aktuelle anvendelsen skal være demonstrert før flygeasken/silikastøvet tillates anvendt.

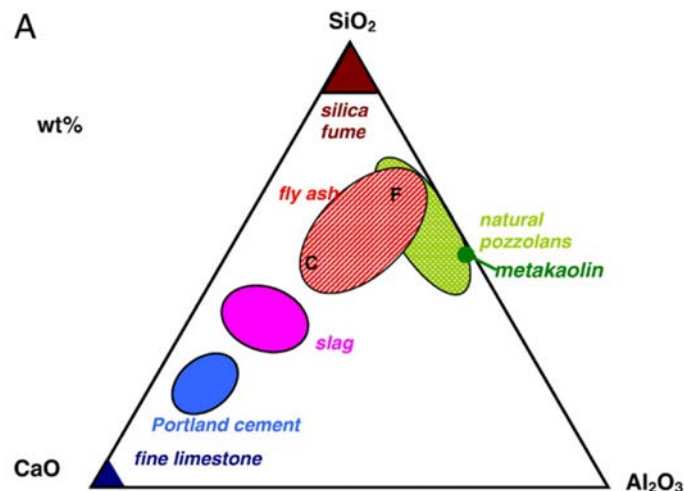
⁸ Klasse A refererer til krav om maksimal mengde ubrent karbon på 5,0 %, målt som LOI (Loss on ignition). Mengde ubrent karbon har primært betydning for luftinnføring av betong.

3 Sammensetning og reaktivitet av flygeaske og slag

3.1 Innledning

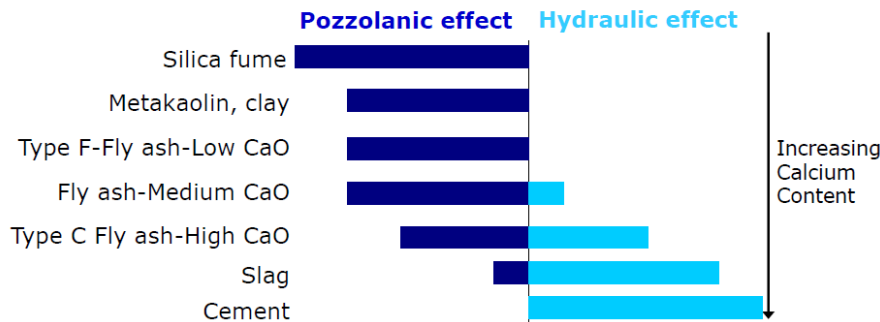
Vi vil i dette kapitlet belyse kjemiske og fysiske egenskaper hos slag og flygeaske, og se på hvilke effekter disse tilsetningsmaterialene gir for egenskapene til hydratasjonsproduktene.

Kjemisk sammensetning, og likeledes fysisk struktur for flygeaske og slag, avhenger av malmkilde for råjernsproduksjon, type kull (for flygeaske) og produksjonsprosess inkludert avkjølingsmetode. Det vil derfor være et ganske stort variasjonsspekter både for flygeaske og slag. Ved å plote kjemisk sammensetning av de viktigste oksidene SiO_2 , CaO og Al_2O_3 i et ternært fasediagram kan vi illustrere både variasjonsspekteret i kjemisk sammensetning for hvert materiale, og samtidig illustrere de kjemiske forskjellene mellom de ulike materialene. Figur 5 viser et slikt ternært fasediagram med kjemisk sammensetning for flygeaske, slag, Portlandsement og noen andre vanlige tilsetningsmaterialer i betong. Vi kan av diagrammet se at flygeaske av type F (silikatholdig flygeaske) har veldig lavt innhold av CaO og relativt høyt innhold av SiO_2 . Det har dermed en kjemisk sammensetning som ligner på naturlige pozzolaner og metakaolin. Flygeaske av type C (kalkholdig flygeaske) ligner kjemisk sett mer på slag.



Figur 5. Ternært fasediagram som viser innhold av CaO , SiO_2 og Al_2O_3 for Portlandsement og noen vanlige erstatningsmaterialer for sement. Fra Lothenbach et al. (2011).

Vi har allerede i Kapittel 1 påpekt at flygeaske primært har et pozzolant reaksjonsmønster, mens slag primært har hydrauliske (dvs. «selvsementerende») egenskaper. Dette illustreres i Figur 6 som viser prinsipielle reaksjonsmekanismer for Portlandsement og de vanligste tilsetningsmaterialene. Silikatholdig flygeaske er på tilsvarende vis som silikastøv et rent pozzolant materiale, mens økende kalsiuminnhold i flygeaskene gir et reaksjonsmønster som er sammensatt av pozzolan og hydraulisk reaksjon. Slagg er på den annen side primært et hydraulisk materiale, men med et visst element av pozzolan reaksjon.



Figur 6. Prinsipielle reaksjonsmekanismer for sement og tilsetningsmaterialer. Fra Kocaba & Scrivener (2009).

Egenskapene for slag og flygeaske styres langt fra bare av kjemisk sammensetning. Fysisk struktur har avgjørende betydning for materialenes egenskaper, hvor mengde glass er den viktigste parameteren. Aspektene rundt kjemiske og fysiske egenskaper vil bli videre belyst i de neste avsnittene.

3.2 Produksjon, kjemiske egenskaper og fysisk struktur

3.2.1 Flygeaske

Flygeaske er et biprodukt fra forbrenningsprosessen i kullfyrte kraftverk. Mer spesifikt er det den ikke forbrente resten av kullet som i smeltet form dras ut av forbrenningsgassen og ut av forbrenningssonen. Her vil den avkjøles og danne glassaktige og i stor grad sfæriske partikler. Disse partiklene blir så filtrert ved mekaniske eller elektrostatiske systemer. En mer detaljert beskrivelse av prosessene er rapportert av ACI Committee 232 (2003).

Mengde glass utgjør normalt > 90 masse %. Resterende del av den krystalline fasen består i hovedsak av mineralene kvarts, mullitt, hematitt og magnetitt (Malhotra & Ramezaniapour 1995).

I tillegg til flygeasken som altså dras ut med forbrenningsgassene, vil det også være en tyngre ubrent rest som vil legge seg i bunnen av ovnen. Denne benevnes bunnaske, og er i liten grad egnet til bruk i sement eller betong. Bruk av bunnaske omfattes hverken av NS-EN 197-1 eller NS-EN 206-1, og vil ikke behandles videre i rapporten.

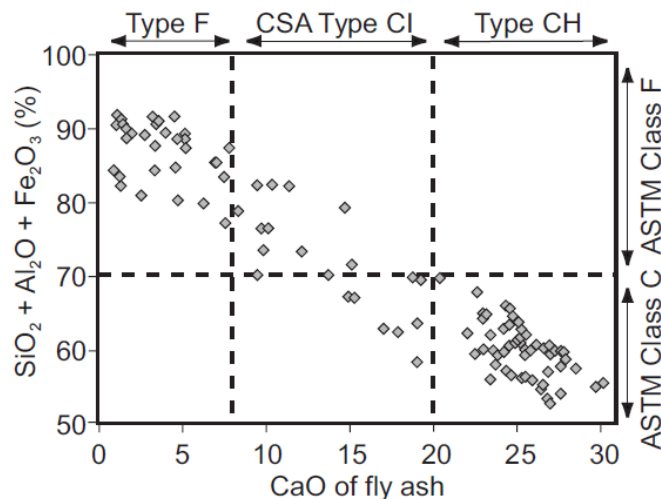
Flygeaskens kjemiske og fysiske egenskaper vil påvirkes av mange faktorer, som f.eks:

- Kullets kjemiske sammensetning
- Driftstekniske forhold i forbrenningsanlegget
- Nedkjøling av forbrenningsgassen og utfellingsprosessen av flygeaske. Rask avkjøling vil medføre høy glassandel.
- Eventuell nedmaling (separat eller sammen med Portlandsklinker)
- Eventuell videre prosessering (sortering, vindsikting, homogenisering etc.)

Spesielt har type kull stor betydning for flygeaskens egenskaper. Prinsipielt skiller vi mellom 2 hovedtyper av kull som gir opphav til flygeasker med ulike egenskaper (ACI Committee 232, 2003).

1. Bituminøst kull og antrasitt gir opphav til flygeasker med lavt innhold av CaO og høyt innhold amorft SiO₂. Slike flygeasker har høy grad av pozzolan reaktivitet, og begrenset hydraulisk reaktivitet. Flygeasken vil normalt bli klassifisert som **type F** etter klassifiseringssystemet i ASTM C 618, og i **klasse V silikatholdig flygeaske** iht. den europeiske sementstandarden EN 197-1.
2. Sub-bituminøst kull og lignitt (også kjent som brunkull) gir opphav til flygeasker med høyt innhold av CaO. Slike flygeasker reagerer også pozzolant, men i mindre grad enn ovennevnte type. Men i tillegg har denne klassen flygeaske hydrauliske egenskaper. Denne flygeasken vil normalt bli klassifisert som **type C** etter klassifiseringssystemet i ASTM C 618, og i **klasse W kalkholdig flygeaske** iht. den europeiske sementstandarden EN 197-1.

I Figur 7 vises kjemiske data for totalt 210 flygeasker fra Nord-Amerika, samt hvordan disse klassifiseres henholdsvis i USA og Canada. ASTM-systemet tar utgangspunkt i hvorvidt summen av oksidene SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ er over eller under 70 %, mens CSA-systemet bruker mengde CaO som klassifiseringsparameter. Merk at mange av flygeaskene klassifisert som type F etter ASTM vil være i klasse CI iht. CSA.

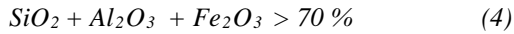


Figur 7. Klassifiseringssystem for flygeaske i USA (ASTM) og Canada (CSA). Fra Thomas (2007).

I europeisk sammenheng blir flygeaske på tilsvarende vis delt i to ulike kategorier i sementstandarden NS-EN 197-1:

- 1) Silikatholdig flygeaske, klasse V. Mengden reaktiv CaO skal her være mindre enn 10 masse %. Slik flygeaske svarer i store trekk til klasse F flygeaske etter ASTM, se foregående.
- 2) Kalkholdig flygeaske, klasse W. Reaktiv CaO skal være minst 10 masse %. Ved mengde reaktiv CaO mellom 10 og 15 % er det et tilleggskrav om minimum 25 masse % reaktiv SiO₂. Klassen svarer i store trekk til klasse C flygeaske etter ASTM.

Begge disse to typene flygeaske er tillatt brukt i CEM II-sementer. Derimot setter flygeaskestandardens NS-EN 450-1 begrensning på at mengde reaktiv CaO ikke skal overskride 10 masse %. I tillegg setter standarden følgende krav:

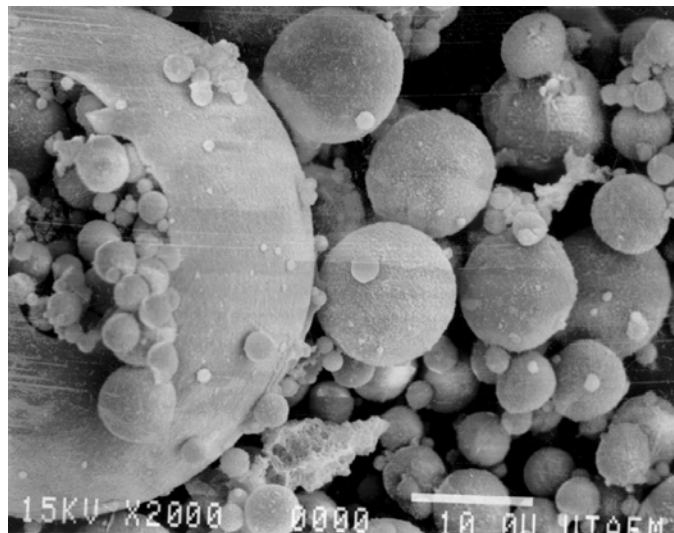


Dette innebærer at kalkholdig flygeaske klasse W ikke kan sertifiseres etter NS-EN 450-1, og dermed ikke kan brukes som separat tilsetningsmateriale til betong. Dette vil si at materialet er tillatt brukt til produksjon av sementtypene CEM II/A-W og CEM II/B-W, men ikke som separat tilsetning i betong. Dette står i kontrast til praksis i land som USA og Canada hvor kalkholdige flygeasker er tillatt brukt som separat tilsetning i betong.

NS-EN 450-1 opererer med ulike klasser (A, B og C) for glødetap. Glødetap detekterer i hovedsak mengde ubrent karbon. Normalt sett benyttes kun flygeaske i klasse A, som har glødetap lavere enn 5 masse %, ved produksjon av blandingssementer. Mengde fri karbon har stor betydning for luftinnføring i betong, hvor høye karbonmengder kan medføre problemer med å oppnå en stabil porestruktur. Dette vil bli behandlet videre i Kapittel 6 Motstand mot frostnedbrytning.

Øvrige krav til kjemisk sammensetning går i hovedsak på begrensninger i SO_3 , fri kalk, MgO og mengde alkalier. Se NS-EN 450-1 for flere detaljer.

Flygeaskepartikler har ofte sfærisk form. Enkelte partikler kan være hule, og kan i noen tilfeller ha innesluttede mindre partikler. Se eksempel i Figur 8 som viser flygeaskepartikler forstørret 2000 ganger.



Figur 8 Flygeaskepartikler ved 2000X forstørrelse. Den store partikkelen til venstre er en hul partikkel med åpning, fylt med mindre partikler. Fra ACI 232.2R-03.

Normalt sett vil median partikkeldiameter ligge i området 15-35 μm (ACI 232.2R-03). For å sikre at flygeasken ikke er for grov settes det krav til finhet i de ulike standardene. For eksempel setter ASTM C 616 krav om at maks 34 % av flygeaskepartiklene skal være større enn 45 μm . I NS-EN 450-1 opereres det med to kategorier for finhet, klasse N og S hvor det tillates at henholdsvis 40 % og 12 % av flygeaskens partikler er > enn 45 μm . Partikkelstørrelsesfordeling kan justeres ved å bruke vindsikteknologi, alternativt ved bruk av maling.

Det finnes også såkalte ultra-fine flygeasker på markedet i noen land, med median partikkelstørrelser i området 2-4 μm . Slike "ultra-fine" flygeasker kan gi spesielle egenskaper som høy fasthet eller kraftig reduksjon i vannbehov (Ferraris et al 2001).

Flygeaskens densitet kan variere innenfor ganske vide grenser. Middelverdi for "typiske" flygeasker ligger på ca. 2,35 kg/m³ ifølge Neville (1995).

3.2.2 Slagg

Slagg er et biprodukt fra produksjon av jern. Det dannes i størrelsesorden 300 kg slagg for hvert tonn råjern (Neville 1995). Slagget dannes som en flytende fase ved temperaturer i området 1350-1550°C, og er kjemisk sett i hovedsak en blanding av oksidene CaO, SiO₂ og Al₂O₃. Dette er de samme hovedbestanddelene som utgjør Portlandsement og flygeaske, se Kapittel 3.1.

Slaggets kjemiske sammensetning og fysiske struktur avhenger av produksjonsprosess, malmkilde og avkjølingsmetode. Sammensetningen kan dermed variere mye mellom fabrikker, samtidig som variasjonen for en gitt fabrikk regnes å variere i liten grad (Taylor 1990).

Kjemisk sammensetning for slagg ligger generelt innenfor følgende område (Moranville-Regourd 1998):

CaO:	30-50 %
SiO ₂ :	28-38 %
Al ₂ O ₃ :	8-24 %
MgO:	1-18 %
S:	1-2,5 %
MnO + Fe ₂ O ₃	1-3 %
TiO ₂ :	< 4%
Na ₂ O + K ₂ O:	< 2 %

Det er av avgjørende betydning å oppnå bråkjøling av slagg, dette gjør at slagget utfelles i hovedsak som glass. Slagget kjøles enten ved bruk av store mengder vann (100 m³/tonn slagg), eller ved hjelp av høytrykks vann-jet, hvor betydelig lavere vannmengder trengs til avkjøling. Vann-jet metoden gir svært hurtig kjøling til under vannets kokepunkt, noe som gir meget høyt glassinnhold. Slagget utfelles i form av granulater som er i størrelser på 4-5 mm og mindre (ACI-233R-03). Produktet som felles ut ved bråkjøling betegnes **granulert råjernslag** (granulated blast furnace slag på engelsk).

Ved langsom kjøling i luft vil det i all hovedsak felles ut krystalline partikler. Dette innebærer at luftkjølt slagg i svært begrenset grad har hydrauliske egenskaper, men kan derimot brukes til vegfyllinger og som betongtilslag (Moranville- Regourd, 1998). De krystalline fasene i slagg er i hovedsak mervinit, melilitt, kalsitt og kvarts.

Densitet for slagg er ca. 2,9 kg/dm³, dvs. noe lavere enn for Portlandsement (3,15 kg/dm³). Partikkelformen er kantete, dette i motsetning til silikastøv og flygeaske som i stor grad har sfæriske partikler (Neville 1995). Slagget males ned til ønsket finhet enten separat eller sammen med Portlandsklinker.

Noen krav til oksidsammensetning gitt av NS-EN 15167:

- Summen av oksidene CaO + MgO + SiO₂ ≥ 2/3
- Øvrige oksider skal være Al₂O₃, samt mindre mengder av øvrige forbindelser
- Forholdet CaO + MgO/SiO₂ > 1,0.

Det stilles i tillegg følgende kjemiske krav (i masse % av slagg):

- Magnesiumoksid MgO < 18 %
- Sulfid ≤ 2,0 %
- Sulfat ≤ 2,5 %
- LOI⁹ ≤ 3,0 %
- Klorider ≤ 0,1 (grenseverdien kan overstiges, men da skal en maksimal verdi angis)

Øvrige krav iht. NS-EN 15167:

- Finheten (Blaine) skal være minst 275 m²/kg.
- Mengde glass (amorf fase) skal være minst 2/3 av total masse

3.3 Reaktivitet

3.3.1 Flygeaske

Flygeaskenes reaktivitet avhenger både av kjemisk sammensetning, mengde glass og partikkelstørrelse. Økende mengde glass gir økt pozzolanitet, mens den krystalline fasen i liten grad vil bidra til reaktivitet. Tilsvarende gir reduksjon i partikkelstørrelse økt pozzolanitet (Malhotra & Ramezani pour 1994). Partikkelstørrelser mellom 5 og 30 µm er generelt veldig reaktive sammenlignet med grovere partikler i følge Malhotra & Mehta (2002). Analysedata for flygeaske som har vært benyttet i Norge de siste 2 årene har vist verdier for mengde glass fra 61 % til 72 % (EMPA 2015, Danner 2016).

Følgende formel er foreslått som en indikator på pozzolan reaktivitet for en gitt flygeaske (Locher 2006):

$$P = F8 \cdot G \cdot C \quad (5)$$

Hvor:

- F8 = fraksjonen (i volum %) med partikkelstørrelse < 8 mikrometer
- G = glassinnhold i masseprosent
- C = (Al₂O₃ x Na₂O_{eqv})/SiO₂

Flygeaskestandarden NS-EN 450-1 definerer en såkalt **aktivitetsindeks** som gir et mål på flygeaskens bidrag til fasthet. Prøvingen gjennomføres på tilsvarende måte som for standard sementprøving, dvs. med mørtelprøver med standardisert sand og masseforhold på 0,50. Fastheten for mørtel med bindemiddel av 25 % flygeaske og 75 % Portlandsement måles ved ulike aldre. Tilvarende måles fasthet for mørtel med bindemiddel av ren Portlandsement. Aktivitetsindekset er forholdet mellom fastheten for disse to variantene.

Følgende krav til aktivitetsindeks ved 28 og 90 døgn er gitt av flygeaskestandarden:

- 28 døgn: minst 75 %
- 90 døgn: minst 85 %

Aktivitetsindeksen kan testes ved å velge sement innenfor relativt vide grenser (C₃A-innhold i området 6-12 %, alkalimengde i området 0,5 – 1,2 %). Det er kjent at valg av sement har stor betydning for aktivitetsindeks, blant annet vil alkalinitet ha relativt stor betydning. Aktivitetsindeksen gir en indikasjon på hvor reaktiv en gitt flygeaske er, men vil ikke kunne brukes for å fastslå virkelig oppførsel i betong. Dette fordi type sement som nevnt spiller inn, men også andre forhold som masseforholdet og

⁹ LOI = Loss on ignition, som gir et mål på mengde uforbrent karbon.

forholdet flygeaske/sement kan ha stor betydning for hvilken effekt flygeasken har. I praksis må derfor effekten av enhver flygeaske verifiseres for den konkrete betongsammensetningen.

Merk at aktivitetsindeks per definisjon er koblet direkte mot fasthet, mens k-faktor rent prinsipielt er koblet mot bestandighetsegenskaper (eller «*fasthetsegenskaper der det er hensiktsmessig*» som det står i betongstandarden NS-EN 206), se også kapittel 2.4.

3.3.2 Slagg

Det er gjort en rekke forsøk på å relatere kjemisk sammensetning av slagg til reaktivitet. Et av de mest benyttede «hydrauliske indeks» er:

$$(CaO + MgO + Al_2O_3) / SiO_2 \quad (6)$$

I nasjonale regelverk i henholdsvis Tyskland og Japan er det satt krav om at denne indeksen må være henholdsvis 1,0 og 1,4 eller større (Moranville-Regourd 1998).

I tillegg til bulkkjemisk sammensetning er mengde glass av stor betydning. Scwiete og Dolbor fant i 1963 (referert i Moranville-Regourd 1998) en lineær sammenheng mellom mengde glass i slagget og oppnådd fasthet. Escalante et al (2001) fant i en studie med 2 slaggtypen med relativt lik bulkkjemisk sammensetning, men med glassinnhold på henholdsvis 97 og 54 % at mengde reagert slagg ved ulike tidspunkter i relativt stor grad sammenfaller med mengde glass. Andre studier har bekreftet viktighet av glass, men påpekt at glassfasen alene ikke bestemmer reaktivitet. Hooton & Emery (1983) modellerte effekten av glassmengde og kjemisk sammensetning på fasthet. De fant relativt god sammenheng med 7 døgns fasthet, men noe dårligere sammenheng ved 28 og 90 døgns fasthet. Pal et al (2003) har brukt datagrunnlaget fra Hooton & Emery (1983) sammen med supplerende forsøk og funnet at såkalte hydrauliske indeks (HI) for henholdsvis 7 og 28 døgn kan uttrykkes ved følgende forhold:

$$HI_{(7døgn)} = - 46,991 + 4,589(CaO) - 5,733(SiO_2) + 4,582(Al_2O_3) + 2,93(MgO) + 0,633(glass) + 3,5(Blaine\ finhet) \quad (7)$$

$$HI_{(28\ døgn)} = -36,908 + 3,112(CaO) + 2,989(Al_2O_3) + 2,425(MgO) + 0,966(glass) + 12,5(Blaine\ finhet) \quad (8)$$

Det hydrauliske indeks som er benyttet i ligning 7 og 8 er basert på 70/30 fordeling av slagg/Portlandsement, og er definert som følger:

$$HI_{70/30} = ((a-c)/(b-c)) \quad (9)$$

Hvor

a = fasthet for 70/30 blanding av slagg/portlandsement

b = fasthet for 100 Portlandsement

c = fasthet for blanding av 70 % knust kvarts og 30 % Portlandsement

Blaine finhet er uttrykt i enheter a 500 m²/kg. Modellene gir R på henholdsvis 0,941 og 0,815, dvs. klart best sammenheng ved 7 døgn.

Ved å ta i betraktning både mengde glass, kjemisk sammensetning og finhet kan man altså ifølge Pal et al. (2003) skaffe seg et overslag over forventet reaktivitet målt i fasthet uten å gå veien om å støpe ut prøver.

I ACI-guiden om slagg (2003) konkluderes det med at sammenhengene totalt sett er svært komplekse, og at reaktiviteten generelt er styrt av følgende forhold:

- Kjemisk sammensetning av slagg – sammen med kjemisk sammensetning av Portlandsement,
- Alkali-konsentrasjon i systemet
- Glassinnhold i slagg
- Finhet, både for slagg og Portlandsement
- Temperatur i tidlig fase av hydrasjonsprosessen

ACI-guiden (2003) har følgende konklusjon i forhold til å kunne forutsi reaktivitet basert på kjemisk/fysisk karakterisering:

“Due to the complexity of the influencing factors, it is not surprising that earlier attempts to relate the hydration of slag cement to simplified chemical models failed to provide adequate evaluation criteria.”

Bijen (1998) har tilsvarende konklusjon, og påpeker at det ikke finnes noen sikker sammenheng mellom slaggets kjemiske sammensetning og dets reaktivitet. Han påpeker videre at heller ikke karakterisering av mikrostruktur gir noen sikker informasjon om slaggets kvalitet. Han gir imidlertid noen retningslinjer for hvordan kjemisk sammensetning påvirker reaktivitet:

- Økende mengde SiO₂ har negativ effekt¹⁰
- Økende mengde CaO har positiv effekt
- Økende mengde MgO har positiv effekt opp til ca. 18 %, høyere mengder kan virke negativt
- Høy mengde Al₂O₃ virker positivt på tidlig fasthet

For å få sikker informasjon om reaktivitet for den konkrete blandingen av slagg og Portlandsement kommer man altså ikke utenom prøveblanding i betong. Informasjon fra såkalt aktivitetsindeks kan gi en god indikasjon på hvor reaktiv en gitt slaggtipe er i betong.

Aktivitetsindeks for slagg bestemmes på følgende vis iht. NS-EN 15167-1:

En mørtelblanding av 50 masse % slagg og 50 masse % sement med $w/(sement + slagg) = 0,50$ sammenlignes med en tilsvarende mørtel med ren Portlandsement med masseforhold 0,50. Aktivitetsindeksen defineres som forholdet mellom fasthet av sement/slagg-mørtelen og mørtel med ren Portlandsement.

Krav til aktivitetsindeks gitt i slagstandarden NS-EN 15167-1:

- Ved 7 døgn: ikke mindre enn 45 %
- Ved 28 døgn: ikke mindre enn 70 %

Merk at denne aktivitetsindeksen forutsetter en 50:50 blanding av slagg og Portlandsement, mens aktivitetsindeksen for flygeaske som tidligere er omtalt forutsetter en 25:75 blanding av flygeaske og Portlandsement. Dette gjenspeiler at slagg normalt sett brukes i større innblandingsgrad enn flygeaske, noe som igjen gjenspeiler at slagg primært er et hydraulisk materiale, mens flygeaske primært er pozzolant. Vær oppmerksom på at det også er andre aktivitetsindekser i bruk i Europa, blant annet blir det i noen land benyttet en «hydraulisk indeks» som forutsetter et 30:70 blandingsforhold mellom slagg og Portlandsement (Moranville-Regourd 1998), se eksempel på dette tidligere i avsnittet.

I USA benyttes en «slag activity index» som også forutsetter 50:50 blandingsforhold av slagg og Portlandsement tilsvarende som i den europeiske standarden. I ASTM C 989 defineres såkalte «grades» av slagg som vist i Tabell 6. En «grade 100» slagg gir en middelfasthet på minst 95 % av fasthet for

¹⁰ Ikke angitt i referansen om det er snakk om amorf eller krystallin silika. Man bør kunne forvente at amorf silika gir økt grad av pozzolan reaktivitet og dermed har positiv effekt

referanseblandingen. Tilsvarende gir en «grade 120» slag en middelfasthet på minst 115 % av referansefastheten etter 28 døgn, dvs. at slaggdelen i dette tilfellet gir et tilskudd til fasthet i forhold til blanding med ren Portlandsement.

Tabell 6 Krav til «slag-activity index» for slag av ulike «grades» i henhold til ASTM C 989.

Grade	Slag-activity index, minimum %	
	Average of last five consecutive samples	Any individual sample
	7-day index	
80	—	—
100	75	70
120	95	90
	28-day index	
80	75	70
100	95	90
120	115	110

Selv om aktivitetsindeks kan gi relevant informasjon om en gitt slaggs reaktivitet vil det på tilsvarende vis som for flygeaske være nødvendig med utprøving i betong for å få sikre svar.

3.4 Reaksjoner og reaksjonsprodukter

3.4.1 Flygeaske

I de følgende avsnitt vil vi ta for oss reaksjonsmønster og reaksjonsprodukter for silikatholdige flygeasker. Kalkholdige flygeasker har langt mindre relevans for norske forhold og vil ikke bli behandlet.

Den kjemisk aktive bestanddelen hos silikatholdig flygeaske er hovedsakelig amorf SiO_2 og Al_2O_3 . De krystalline fasene vil i liten grad være reaktive. Flygeasken reagerer med kalsiumhydroksid som frigjøres under hydratiseringen av Portlandsement. Reaksjonen medfører at mengde C-S-H øker og gir en tettere porestruktur. Mengden Al_2O_3 er relativt høy i flygeaske (fra 15-35 %), og vil medføre et betydelig opptak av aluminat i C-S-H fasen: C-(A)-S-H. I tillegg vil mengde ettringitt reduseres, og AFm fasene (monosulfat og monokarbonat) øker noe i forhold til i betonger med ren Portlandsement (Lothenbach et al. 2011).

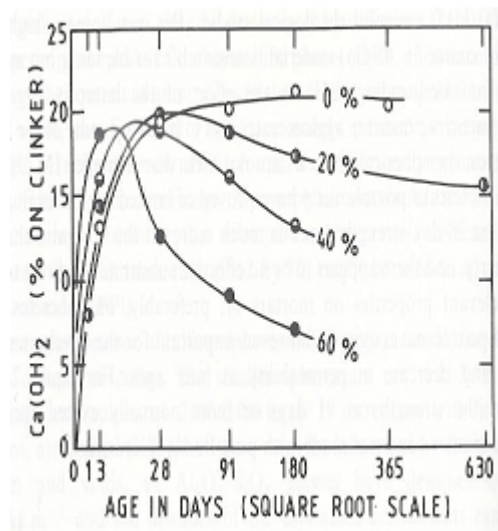
En forutsetning for at flygeaskens hydratasjon skal starte er at porevannets pH er høy nok til å bryte ned glassfasen. Dette fordrer ifølge Neville (1995) en pH på minst 13,2. For å oppnå en så høy pH må en relativt stor del av Portlandsementen være hydratisert. Porevannets alkalinitet i tidlig fase avhenger i hovedsak av sementens kjemiske egenskaper, hvor mengden lettløselige alkalier er en av de viktigste. I tillegg vil mer finmalte sementer føre til raskere økning i alkalinitet. Det kan ta flere dager før flygeaskens pozzolane reaksjon kommer i gang (Neville 1995). Sakai et al. (2005) påviste i forsøk med 2 flygeasker med veldig store forskjeller i mengde reaktivt glass at det tok mer enn 7 døgn før det kunne påvises at noen av flygeaskene hadde reagert kjemisk. Flygeaskens generelt sett sene reaksjon sammenlignet med Portlandsement er en meget viktig årsak til at flygeaske reduserer sementens hydratasjonsvarme og dermed betongens varmeutvikling i tidlig herdefase.

Økt mengde flygeaske vil på grunn av flygeaskens trege reaksjonsmønster medføre en langsommere tilvekst av fasthet og tetthet. Men en annen effekt går i motsatt retning: flygeaskepartiklene vil fungere som kjerner for utfelling av sementens hydratasjonsprodukter, en såkalt nukleeringseffekt. Denne effekten gir isolert sett økt hastighet for reaksjon av Portlandsementen og økt utfelling av CH i tidlig fase, noe som blant annet Sakai et al. (2005) har påvist, og som også illustreres i Figur 9. De utfelte

reaksjonsproduktene vil imidlertid skjerme flygeaskepartiklene og bidra til retardasjon av disse (Neville 1995).

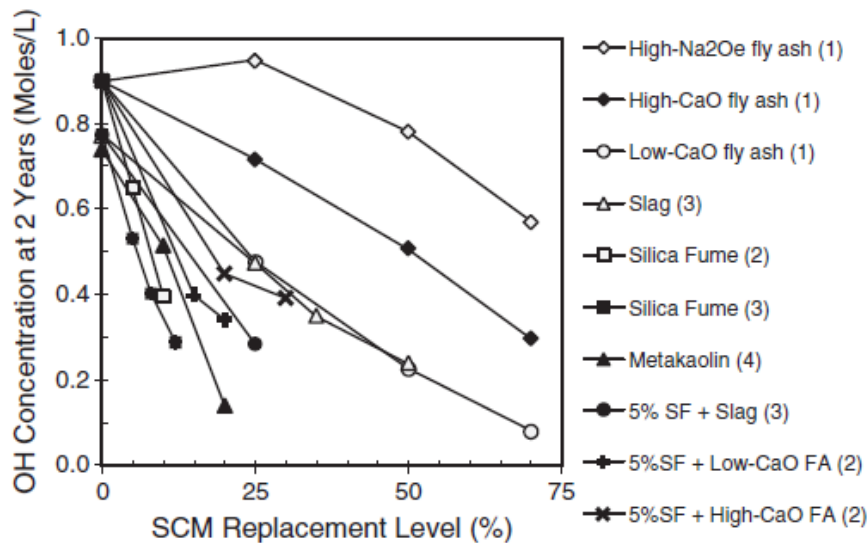
I tidlig fase (opp til noen måneder) vil betonger med flygeaske generelt ha en åpnere porestruktur og lavere fasthet. Men på lang sikt vil flygeaskebetonger få en tettere porestruktur pga. økt mengde C-S-H og en betydelig tettere porestruktur (Malhotra and Ramezani-pour, 1994, ACI Committee 232, 2003). Disse forholdene er av svært stor betydning mht. bestandighet på lang sikt, men kan altså medføre noen utfordringer mht. bestandighet i tidlig fase. Vi vil komme tilbake til en kvantifisering av denne effekten i forhold til bestandighetsmessige egenskaper i de etterfølgende kapitler.

Flygeaskens reaksjon skjer i all hovedsak som en ren pozzolan reaksjon, noe som innebærer at reaksjonen forbruker kalsiumhydroksid. Ved høye mengder flygeaske er denne reduksjonen i mengde kalsiumhydroksid svært stor. Ifølge Hanehara et al. (2001) kan flygeaskedoseringer på 60 % eller høyere medføre at all kalsiumhydroksid kan ha reagert etter 1 år. I Figur 9 vises effekten av økende mengde flygeaske på kalsiumhydroksid for ulike tidspunkter. Figuren illustrerer også et annet poeng: den såkalte nukleeringseffekten, se tidligere omtale. Dette kan ses av at økende mengde flygeaske medfører en raskere utfelling av CH i de første dagene. I denne tidlige fasen har ikke den pozzolane reaksjonen begynt.



Figur 9 Kalsiumhydroksid- innhold i sementpastaer av Portland-FA-sementer med andel FA lik 0-60% (Taylor, 1990).

I tillegg til den rene pozzolanreaksjonen vil løst silikat fra flygeasken kunne reagere direkte med C-S-H-fasen. Denne reaksjonen vil gi redusert Ca/Si-forhold i C-S-H-gelen i stedet for å redusere CH-innholdet i pastaen. C-S-H dannet av pozzolaner vil binde større mengde alkalier enn det som bindes i C-S-H som er dannet ved hydratasjon av Portlandsement (Neville 1995, Duchesne og Bérubé 1995). Den totale konsekvensen av redusert mengde kalsiumhydroksid og redusert mengde alkalier tilgjengelig i porevæsken er at pH synker med økende dosering flygeaske. Dette er illustrert i Figur 10 som viser effekten på OH^- konsentrasjon som funksjon av mengde tilsatt flygeaske (i tillegg til andre tilsetningsmaterialer som metakaolin, silikastøv og slagg). Flygeaske gir som figuren viser stor effekt, hvor lav-kalsium, dvs. silikatholdig flygeaske gir størst reduksjon. Unntaket fra regelen er lav dosering flygeaske (25 %) med høyt alkalinitivå.



Figur 10 Effekt av type og mengde tilsetningsmateriale på OH⁻ konsentrasjonen. Fra Thomas 2011, sammenstilling basert på 4 ulike studier.

Eksemplet over viser at dosering av flygeaske på 50 % kan redusere OH⁻ konsentrasjonen til ca. 0,2 mol/L. Dette tilsvarer en pH på ca. 13,3. Selv med en slik kraftig reduksjon i OH⁻ konsentrasjon er altså pH fortsatt langt over nivået hvor man forventer at stålets passivsjikt brytes ned, se Kapittel 5. Samtidig kan en redusert pH føre til redusert kloridbindingskapasitet og dermed senke terskelen for kloridinitiert armeringskorrosjon. Den økte tettheten som flygeaske gir på lang sikt forventes imidlertid å gi betydelig redusert kloridinntrengning, noe som går i motsatt retning. Den økte tettheten forventes normalt langt å overstige eventuelle negative effekter av flygeaske. Forholdene rundt kloridininitiert og karbonatiseringsinitiert armeringskorrosjon vil bli utførlig behandlet i Kapittel 5 Korrosjonsegenskaper.

Redusert mengde hydroksidioner i betongens porevæske har stor betydning for en annen viktig nedbrytningsmekanisme, nemlig alkalireaksjoner. Generelt vil reduksjon i mengde OH⁻ medføre redusert risiko for alkalireaksjoner fordi løseligheten av reaktiv silika reduseres ved synkende alkalinitet. Dette vil bli utførlig behandlet i Kapittel 4 Alkalireaksjoner.

3.4.2 Slagg

3.4.2.1 Kjemisk aktivering av slagg – ulike bruksområder

Slagg kan aktiveres kjemisk på følgende måter (Moranville-Regourd 1998):

- Alkaliske aktivatorer av typen: NaOH, Ca(OH)₂, Na₂CO₃
- Sulfat, for eksempel gips eller hemihydrat: CaSO₄·2H₂O, CaSO₄·0,5H₂O

Begge typer aktivatorer kan virke samtidig, noe som altså er tilfellet ved bruk av Portlandsement som aktivator. Denne rapporten tar for seg systemer med Portlandsement og slagg, hvor slagget enten kan være blandet inn i en ferdig sement (f.eks CEM III/A), eller ved separat tilsetning. Det finnes imidlertid andre typer slaggsementer på markedet basert på annen type aktivering:

- Såkalt «super-sulfated cement», som produseres av 80-85 % granulert slag, 10-15 % anhydritt eller brent gips, og ca. 5 % Portlandsement som males sammen. Denne typen sement forekommer i Belgia, Tyskland og Storbritannia (Moranville-Regourd 1998).
- Granulert slag som er blandet med lesket kalk (kalsiumhydroksid). Denne typen sement brukes blant annet i Belgia og Frankrike

I de følgende avsnitt vil kun systemet Portlandsement-slag bli behandlet videre.

3.4.2.2 Slag og Portlandsement

Ved innblanding av vann i slag-Portlandsement-systemet vil en liten del av slagget reagere umiddelbart og frigjøre kalsium- og aluminiumioner (Neville 1995, ACI Committee 233, 2003). Den videre reaksjonen av slag forutsetter imidlertid at pH er høy nok til å bryte ned glassfasen, noe som krever en pH på ca. 12 (Bijen 1998). Dette innebærer altså at en viss mengde Portlandsement har reagert slik at vi får etablert pH på dette nivået, noe som vil skje relativt raskt etter at man har tilsatt vann.

I systemet Portlandsement-slag-vann vil slagget først reagere med alkalihydroksider, etterfulgt av reaksjon med kalsiumhydroksid (Neville 1995, Roy & Idorn, 1982). Denne to-fase reaksjonen kan tydelig ses i kalorimetri-studier.

Reaksjonshastigheten for slag avtar generelt med økende slag/Portlandsement forhold som gir synkende pH (Taylor et al 2010). Dette innebærer at det ved økende mengde slag blir en dobbel negativ effekt som gjør at betonger med høy slagandel kan bli meget langsomme: a) lavere Portlandsementinnhold, og b) lavere reaktivitet for slag-delen pga. lav pH. Imidlertid kan noe av dette oppveies ved at Portlandsement-delen reagerer noe raskere pga. filler/nukleeringseffekt (Lothenbach et al. 2011).

Reaksjonshastigheten til slag er mer følsom for temperatur enn Portlandsement: Slag reagerer langsommere ved temperaturer lavere enn 15 C, men reaksjonshastigheten akselereres ved temperaturer over 27 C. Denne temperaturfølsomheten begrenser praktisk nivå av sementerstatning i kaldt v r og tillater høyere erstatningsniv er ved varmere v r (Lothenbach et al. 2011).

Slagbetonger f r betydelig økt mengde C-S-H og tettere porestruktur i forhold betong med Portlandsement (Roy & Parker 1983, Bijen 1998). I følge studier av Bakker (1983) er en av årsakene til at kapill rporositeten er kraftig redusert i slagbetonger at C-S-H felles ut på en annen måte enn ved hydratasjon av Portlandsement. For Portlandsement felles C-S-H ut direkte på sementkornenes overflate, mens for slagsementer felles C-S-H ut i rommet mellom slagkorn og Portlandsementkorn. Dette gir en bedre distribusjon av C-S-H-gelen.

Mengden kalsiumhydroksid blir kraftig redusert, for typiske CEM III/B betonger med slaginnhold på ca. 75 % kan mengden være på kun noen få %, sammenlignet med opptil 25 % for betong med ren Portlandsement. Slag har i så måte tilsvarende effekt som flygeaske. Høye mengder slag fører til redusert mengde ettringitt og også redusert mengde AFm-faser. Slag som sementerstatning medfører redusert mengde kalsiumhydroksid, både som en konsekvens av uttynningseffekten (redusert mengde Portlandsement) og pga. forbruk av kalsiumhydroksid over tid. C-S-H-gelen som dannes ved hydratasjon av slag f r lavere Ca/Si- forhold, noe som gir økt bindingskapasitet for alkalier. I tillegg vil det bindes en del aluminat i C-S-H og dannelse av C-A-S-H, noe som ytterligere gir økt bindingskapasitet for alkalier (Lothenbach et al. 2011, Hong & Glasser 2009, 2012)

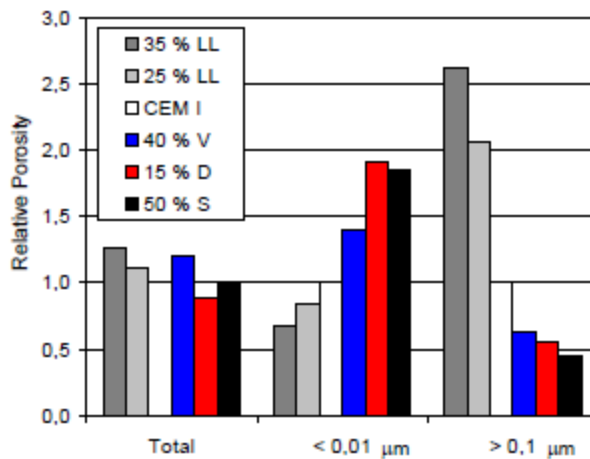
I tillegg til de nevnte effekter som reduserer porevannets alkalinitet er det ifølge Lothenbach et al. (2011) ytterligere en effekt: slag gir høy konsentrasjon av l ste, negativt ladede svovelforbindelser (HS^- , SO_3^{2-} , $S_2O_3^{2-}$) i porevannet. Dette fører til redusert OH^- konsentrasjon siden porevannets elektron utralitet må opprettholdes. Dette gir totalt sett en betydelig reduksjon i alkalinitet for slagbetonger sammenlignet med betonger av Portlandsement. Kombinasjoner av slag og silikastøv er

rapportert å gi reduksjon av pH ned til nivåer rundt 13,0 (Larbi et al. 1990). Dette tilsvarer en OH⁻ konsentrasjon på ca. 0,1 mol/l. Effekten av økende mengde slagg på alkalinitet (uttrykt i OH⁻ konsentrasjon) er også vist i sammenstillingen til Thomas (2011) i Figur 10.

Generelt sett hydratiserer slagg ikke fullstendig, hvilket er vist ved at resterende slaggkorn er funnet i opptil 20 år gamle sementer (Taylor et al. 2010, Luke og Lachowski 2008).

3.5 Avsluttende kommentarer om flygeaske og slagg

Flygeaske og slagg gir til tross for sine prinsipielt ulike reaksjonsmekanismer mange av de samme effektene i betong. Begge gir økt mengde C-S-H og tettere porestruktur, redusert mengde kalsiumhydroksid og redusert alkalinitet. Den forfinede porestrukturen for slagg- og flygeaskebetonger er illustrert i Figur 11, som viser relativ total porøsitet samt relativ fordeling mellom fine porer (< 0,01 µm) og grove porer (> 0,1 µm). Både slagg, flygeaske og silikastøv gir i stor grad en forfining av poresystemet, mens kalksteinsfiller gir en grovere porestruktur enn referansen.



Figur 11 Relativ effekt av sementtype på total porøsitet og fordeling av fine og grove porer. Sementer med henholdsvis kalksteinsfiller (LL), flygeaske (V), slagg (S) og silikastøv (D), referanse CEM I. Fra Eco-serve (2006).

Det er også noen ulikheter mellom slagg og flygeaske. Flygeaske reagerer betydelig langsommere enn slagg (som igjen er langsommere enn Portlandsment) (Lothenbach et al 2011., Bijen 1998). Forskjellene mellom slagg og flygeaske gjør at flygeaske generelt sett er mer egnet til å gi redusert herdevarme i tidlig fase enn slagg. På den annen side er betonger med (høye volumer) flygeaske mer følsomme for kloridinntrengning i ung alder pga. en mer åpen porestruktur i tidlig fase. De bestandighetsmessige aspektene ved disse bindemidlene vil bli utførlig behandlet i de etterfølgende kapitler.

4 Alkalireaksjoner

4.1 Innledning

Alkalireaksjon er en reaksjon mellom reaktive mineraler i tilslaget og alkalihydroksider i betongens porevæske. Reaksjonen fører til dannelse av alkaligel som er vannsugende og svellende. Alkalireaksjoner gir seg utslag i krakeleringsriss på frie flater, riss parallelt med belastningsretningen, klemming av fuger og forskyvning av lagre. Langt fremskredne alkalireaksjoner kan føre til reduserte mekaniske egenskaper, delaminering og avskalling og redusert forankringskapasitet av armeringsjern. Alkalireaksjoner kan også åpne opp betongen for andre skademekanismer som kloridinitiert armeringskorrosjon og frostnedbrytning. Vi har flere hundre bruer i det norske veinettet med skader av denne skademekanismen, men det totale omfanget er ikke kjent. Det tar i Norge som regel 15-20 år før reaksjonen gir seg utslag i tydelige tegn, og som regel mer enn 30 år før skadene blir alvorlige. Den langsomme skadeutviklingen i Norge er en konsekvens av at vi har en kombinasjon av langsomt-reagerende tilslag og kjølig klima.

I Norge ble det vitenskapelige fundamentet for alkalireaksjoner i betong lagt gjennom forskningsprosjekter fra 1988 til 1992, oppsummert i Viggo Jensens doktoravhandling (1993). Skadetyper ble imidlertid påvist langt tidligere enn dette i Norge. Kjennerud (1978) beskrev skader som følge av alkalireaksjoner på betongfundamenter i Rjukan, og identifiserte bergarten ryolitt som «synderen». I Norge fikk vi på plass regelverk for å forhindre bygging med alkalireaktiv betong så sent som i 1996.

Internasjonalt regner man at Stanton (1940) publiserte den første vitenskapelige artikkelen som beskrev fenomenet alkalireaksjoner i betong basert på observasjoner gjort i California på 1920- og 30-tallet. Stanton beskrev mekanismene og forutsetningene for at en skadelig reaksjon skal kunne skje – nemlig tilstedeværelsen av reaktive tilslagskorn sammen med sement med høyt alkaliinnhold. Han beskrev også en mulig løsning på problemet – nemlig bruk av pozzolane sementer. I følge Thomas (2011) ble det allerede på 1950-tallet dokumentert at flygeaske og slagg var effektive til å motvirke skadelige reaksjoner som følge av alkalireaksjoner. Siden den gang er det publisert en lang rekke vitenskapelige artikler som beskriver den positive effekten av tilsetningsmaterialer som flygeaske, slagg, silikastøv og naturlige pozzolaner.

I de følgende avsnitt vil vi ta for oss teoretisk bakgrunn for alkalireaksjoner, samt eksempler fra litteraturen med hensyn til hvilken effekt slagg og flygeaske (også i kombinasjoner med silikastøv) har i forhold til å **motvirke, utsette eller redusere** alkalireaksjoner.

4.2 Reaksjonsmekanismer for alkalireaksjoner

Alkalireaksjoner kan prinsipielt deles opp i undergruppene «alkali-silika» reaksjoner og «alkali-karbonat» reaksjoner. Den sistnevnte gruppen alkali- karbonatreaksjoner er rapportert å forekomme i samband med dolomittisk kalkstein. Mekanismene for denne reaksjonstypen er fortsatt uklare. Det er ikke rapportert forekomster av denne typen i Norge, og reaksjonstypen vil ikke bli videre behandlet i rapporten.

For alkali-silika reaksjoner skiller man igjen mellom to undergrupper (Jensen 1993):

- Hurtigreagerende tilslag av typen opal, flint og kalsedon. Slike silika- mineraler er ikke relevante for norske forhold, men er vanlig forekommende i store deler av verden. De forekommer i Danmark og i sørlige deler av Sverige. Kan gi en svært rask skadeutvikling, spesielt i områder med varmt klima.
- Langsomt-reagerende tilslag av den typen vi har i Norge. Reaktiv bestanddel i disse reaktive bergartene er mikrokrySTALLIN kvarts, eller i mange tilfeller deformert kvarts som i kataklasitter

og mylonitter. Det tar normalt minst 15-20 år før skadetypen utvikles i en slik grad at det blir synlige tegn og effekter på betongkonstruksjonene.

Første steg i alkalireaksjonen er en oppløsning av silikafasen. En forutsetning for at dette skal kunne skje er at det er tilstrekkelig mengde OH⁻ ioner i porevæsken, dvs. at pH er tilstrekkelig høy. Glasser (1992) har påpekt at begrepet "alkali-aggregate reaction" strengt tatt er noe misvisende, et mer dekkende begrep ville vært "hydroxide-aggregate reaction" fordi det er hydroksyl- ionene som er en forutsetning for at silika-mineralene går i oppløsning. Alkalier i sement forekommer i hovedsak i form av ulike alkalisulfater. Etter noen døgn vil sulfationene i stor grad bli bundet opp pga. dannelse av ettringitt, mens ione-likevekten vil opprettholdes ved tilsvarende økt konsentrasjon av OH⁻ ioner. Studier av ekstrahert poreløsning fra betong viser at etter første døgn vil summen av molar konsentrasjon for K⁺ og Na⁺ omtrent tilsvare den molare konsentrasjonen av OH⁻, mens summen av andre ioner vil være relativt liten (Thomas & Bleszynski 2000, Duchesne og Berube 2001).

Løseligheten til silika vil generelt øke med økende OH⁻ konsentrasjon (økende pH). Diamond (1983) og Kollek et al (1986) har antydnet grenseverdier på henholdsvis 0,25 og 0,20 M konsentrasjon av OH⁻ for å initiere en alkalireaksjon. Disse verdiene vil kunne være ulike for ulike typer av alkalireaktive bergarter. Duchesne og Bérubé (2001) antyder at molar mengde OH⁻ i samband med bruk av tilsetningsmaterialer som silikastøv, slagg og flygeaske bør være under 0,6 M etter 1 år for å gi sikkerhet mot alkalireaksjoner.

Den oppløste silikaen vil reagere med alkalier og danne en svellende alkali-silika gel. Under forutsetning av tilstrekkelig høy fukt vil alkalireaksjonen medføre skadelige reaksjoner, som gir volumøkning og ekspansjon, og fører til tilhørende oppsprekking av betongen.

Det er verdt å merke seg at det er klare likheter mellom alkalireaksjon og pozzolan reaksjon, dette er behandlet av mange i litteraturen, blant annet Urhan (1986), Wang & Gillott (1992), Thomas (2011). I begge reaksjonstyper er første steg oppløsning av silika. Det videre steget kan enten føre til en skadelig alkalireaksjon eller pozzolan reaksjon med dannelse av C-S-H. Et kjennetegn ved materialer som gir pozzolan reaksjon er at de er svært finkornet, noe som betyr at oppløst silika blir jevnt fordelt over store områder. Hva som styrer det videre forløpet er ikke fullt ut forstått, men det er flere som peker på at forholdet mellom kalsium og alkalier nær oppløst silika er svært vesentlig, hvor et høyere kalsium/alkali-forhold gir større sjanse for et videre pozzolant forløp (Hou et al 2003, Dent Glasser & Kataoka 1982, Powers & Steinour 1955). Finkornet materiale som silikastøv og flygeaske vil normalt føre til pozzolan reaksjon, mens reaktive tilslagspartikler over en viss størrelse (> ca. 100 µm) vil på den annen side normalt føre til større grad av akkumulering av alkali-gel på mindre områder, noe som normalt leder til skadelig alkalireaksjon. Et slående eksempel på at nettopp størrelsen av det reagerte materialet har avgjørende betydning er silikastøv. Dispergert silikastøv er kanskje det beste pozzolane materialet vi kjenner i kraft av sin ekstreme finhet og at det består av nesten ren amorf silika. Det er imidlertid flere eksempler fra litteraturen på at silikastøv som ikke blir dispergert, og hvor det forekommer «agglomerater» i størrelser på 100-200 µm eller større fører til skadelige alkalireaksjoner i stedet for pozzolan reaksjon (Diamond 1997, Marusin & Shotwell 2000, Gudmudsson & Olafsson 1999). Det er også mange eksempler fra litteraturen på at også mange bergarter som normalt gir skadelige alkalireaksjoner når de forekommer i «normale» størrelser kan være effektive pozzolaner når de knuses ned til partikler < ca. 50 µm, blant annet vist av Pedersen (2004). Dette gjelder primært for hurtigreagerende tilslagstyper hvor den reaktive substansen er amorf eller kryptokrystallin silika, mens for norske reaktive bergarter med krystallin kvarts som reaktiv fase vil selv små partikler føre til alkalireaksjon. Det er dermed et paradoks at det alkalireaktive materialet kan gi to ulike utfall, ved enten å: a) føre til en skadelig alkalireaksjon eller b) føre til dannelse av C-S-H, kun avhengig av partikkelstørrelse.

For langsamreagerende reaktive bergarter av den typen vi har i Norge vil økende mengde reaktivt materiale gi økt grad av alkalireaksjon. Enkelte hurtigreagerende bergarter vil på den annen side ofte oppvise såkalt «pessimums-oppførsel». Dette arter seg ved at maksimal reaksjon/ekspansjon opptrer for

en gitt mengde (eksempelvis 8-10 % for dansk flint), mens ved mindre mengder så vel som ved høyere mengder reaktivt materiale vil det oppstå mindre grad av ekspansjon. Dette er egentlig knyttet til forholdet mellom alkalier og reaktivt materiale. Dersom dette forholdet blir for lavt (f.eks. ved at mengden reaktivt materiale øker utover en terskelverdi) vil alkalimengden i forhold til de reaktive tilslagskorn være for lav til å gi reaksjon (Poole 1992). Ved prøving av betonger med tilslag som oppviser pessimums - effekt må man være ekstra varsom ved tolkning av resultatene.

4.3 Effekter av flygeaske og slagg

4.3.1 Innledning

Det finnes etter hvert omfattende litteratur som viser at tilsetning av slagg eller flygeaske i tilstrekkelige mengder kan være et svært effektivt virkemiddel for å motvirke (eller i alle fall å utsette) alkalireaksjoner for betonger med alkalireaktive tilslag, blant annet vist i review-artikkelen til Thomas (2011). Silikastøv kan også ha tilsvarende effekt, spesielt hvis det brukes i kombinasjoner med enten slagg eller flygeaske.

I de følgende avsnitt vil utvalgte eksempler fra litteraturen bli presentert og diskutert. Innledningsvis gis noen betraktninger om bruk av akselererte prøvingsmetoder. Deretter presenteres rene laboratoriestudier og studier fra felt i egne avsnitt. I tillegg vil mekanismer samt effekter av kjemisk sammensetning av flygeaske og slagg bli presentert og diskutert.

4.3.2 Om akselererte prøvingsmetoder

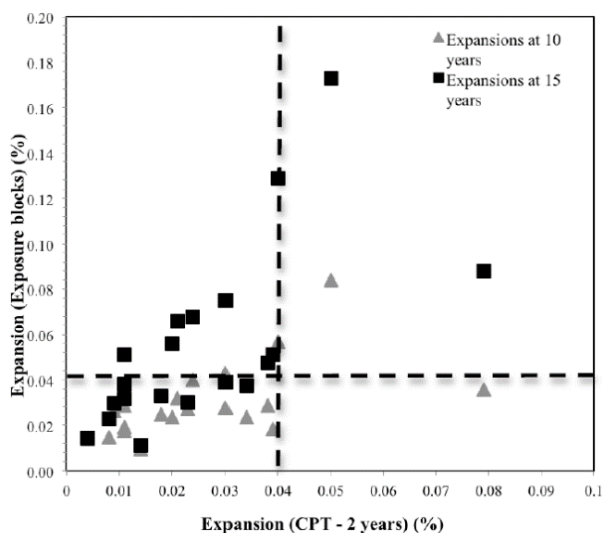
Mesteparten av publiserte artikler om preventiv effekt av slagg, flygeaske og øvrige tilsetningsmaterialer er basert på akselererte prøvingsmetoder. Det er i langt mindre grad publisert rapporter fra dokumenterte felterfaringer. Akselererte testmetoder for alkalireaksjoner i betong er et komplisert område med mange usikkerheter, og det gis derfor innledningsvis noen betraktninger rundt dette.

Det meste av tilgjengelige prøvingsmetoder er opprinnelig blitt utviklet for å dokumentere om et gitt tilslag er alkalireaktivt eller ikke, og ikke for å dokumentere effekt av ulike bindemidler i kombinasjon med alkalireaktive tilslag. Disse metodene eller varianter av metodene har siden blitt brukt til funksjonsprøving av betong med reaktive tilslag, eksempelvis slik vi tillater i Norge (se omtale lengre ned). De opprinnelige metodene er basert på bruk av rene Portlandsementer med høyt alkaliinnhold, gjerne i kombinasjon med NaOH for å «booste» alkaliniteten til et høyere nivå. Det benyttes normalt masseforhold i området 0,45 – 0,50. Mørtelprismemetoden som brukes i Norge for dette formål (NB 32) er prinsipielt lik ASTM C1260 og RILEM AAR-2), og er basert på mørtelprismer (40x40x160 mm) som legges i 1 N NaOH-løsning ved 80°C for 14 døgns eksponering. Denne metoden er godt egnet til å påvise alkalireaktive tilslag, men er dårlig egnet til å dokumentere hvilken effekt man oppnår ved tilsetning av flygeaske og slagg. I denne metoden er tilgangen på alkalier nærmest ubegrenset, i tillegg til at temperaturen er urealistisk høy for betong. På tross av dette brukes metoden for å «funksjonsprøve» kombinasjoner av tilslag og bindemidler i stor utstrekning, eksempelvis i Nord-Amerika. Det er dokumentert at metoden i mange tilfeller vil gi «riktige» resultater (Bérubé et al. 1995, Shafaatian et al. 2013), dvs. man vil ved denne metoden påvise en positiv effekt av slagg og flygeaske. Mørtelprismemetoden er ikke tillatt brukt i Norge for funksjonsprøving, men den er i bruk for ren tilslagsprøving. Også andre metoder enn de som er omtalt her er i bruk rundt omkring i verden. For ytterligere informasjon om testmetoder og deres begrensninger vises det til Thomas et al (2006). En av konklusjonene i denne artikkelen er at **betongprismemetoden** er den mest lovende metoden for funksjonsprøving når det kommer til å gi svar man kan stole på. Den «norske» varianten av betongprismemetoden er basert på betongprismer (100x100x450 mm) som eksponeres ved 38°C ved tilnærmet 100 % relativ fukt i minst 1 år. Det benyttes mindre prismestørrelser i de fleste andre land.

Det pågår for tiden et stort arbeid i regi av RILEM for å utvikle metode(r) for funksjonsprøving av betong med alkalireaktive tilslag og ulike kombinasjoner av bindemidler, for å kunne dokumentere at gitte sammensetninger er «sikre» under gitte omstendigheter (RILEM TC258-AAA). Det tas her

utgangspunkt i metode(r) tilsvarende norsk betongprismememotode (NB 32), som prinsipielt er relativt lik RILEM AAR-3 og ASTM C1293. Lindgård (2013) og Lindgård et al. (2013) har påvist at det kanskje største problemet med enkelte varianter av betongprismemotoden er tap av alkalier («leaching»), som gjør dem spesielt følsomme når alkalimengden er nær en kritisk grenseverdi. Øvrige utfordringer er å gi tilstrekkelig høy fukt. Den norske varianten med stor prismestørrelse (100 x 100 x 450 mm) er et svært lovende utgangspunkt som metode for funksjonsprøving. Det gjenstår imidlertid arbeid med å avklare en del forhold som «alkali-boosting», begrensninger ved lave masseforhold (pga. selvuttørkning) etc.

Det er siden slutten av 1980-tallet satt i gang en rekke feltstasjoner rundt omkring i verden for å studere effekt av ulike reaktive tilslag i kombinasjon med ulike bindemidler. Spesielt i USA og Canada er det et stort antall store betongblokker, med typisk størrelse på 380x380x710 mm plassert ut i ulike klimasoner fra Texas til Canada. Disse feltstasjonene spiller en svært viktig rolle for å kalibrere resultater fra laboratorieforsøk mot virkelig oppførsel i felt. I Figur 12 er 2-års ekspansjons-resultater fra betongprismemotode (CSA A23.2-14A) plottet mot 10 og 15 års resultater for betongblokker som er eksponert utendørs i Ottawa, Canada (Ideker et al. 2012). Det er i disse betongene brukt reaktive tilslag og en rekke ulike bindemiddelvarianter, inklusive flygeaske og slagg. Etter 10 års felteksponering er det relativt god overenstemmelse mellom lab- og feltdata. Men etter 15 års felteksponering er det flere av betongene som ble «akseptert» etter kriteriet brukt ved 2-års lab-prøving som viser relativt stor ekspansjon ved felteksponering. Selv ved et såpass strengt kriterium som 0,04 % etter 2 års eksponering gir altså ikke betongprismemotoden et sikkert svar på oppførsel i felt på lang sikt. En vesentlig del av problemet antas å være utlekking av alkalier, som spesielt gjør seg gjeldende i de tilfellene hvor alkalimengden er nær «kritisk alkalinitet» for aktuelt tilslag. Det må bemerkes at det i Nord-Amerika benyttes prismestørrelser med tverrsnitt på 70x70 mm, mens det i Norge benyttes 100x100 mm. En konsekvens av små prismestørrelser av typen 70x70 er økt utlekking av alkalier sammenlignet med «norsk prismestørrelse». Den norske prismestørrelsen gir liten utlekking av alkalier, og antas dermed å gi betydelig sikrere resultater.



Figur 12 Sammenligning mellom betongprismepøving (CPT, 38°C) etter 2 år og utendørs felteksponering av betongblokker etter 10 og 15 års eksponering. Betonger med ulike tilsetningsmaterialer. Data fra CANMET feltstasjon i Ottawa, Ontario, Canada. Figur fra Ideker et al. (2012).

Metoden RILEM AAR-4, hvor betongpriser er eksponert ved 60°C, er en annen metode som er aktuell å videreutvikle som metode for funksjonsprøving av betong. Metoden er raskere enn «tradisjonell» betongprismemotode, og kan gi svar allerede etter 20 uker. Resultater fra Sveits (Leeman & Merz 2012) viser at resultater fra denne metoden har gitt relativt god overensstemmelse med observasjoner fra konstruksjoner i felt. Thomas et al (2006) peker imidlertid på noen problemer med denne metoden. Den

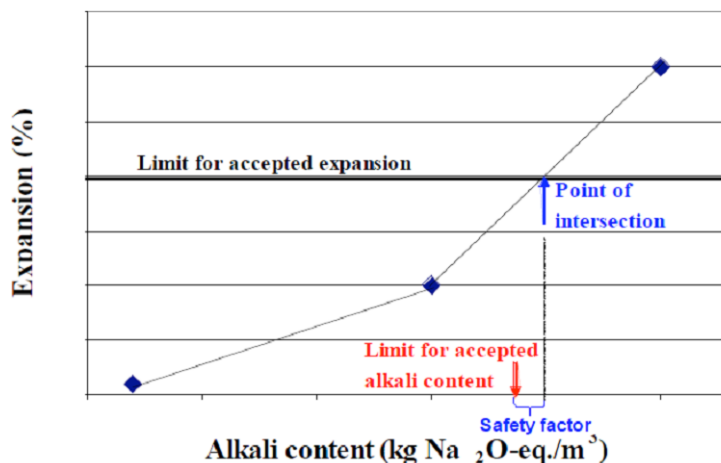
høyere temperaturen kan føre til høyere grad av utlekking av alkalier. I tillegg kan pH i poreløsningen bli redusert som følge av at sulfationer erstatter noen av hydroksidionene i løsningen.

Det norske regelverket (Norsk Betongforening 2004, Dahl et al. 2004) gir i dag regler for funksjonsprøving av betong med alkalireaktivt tilslag i kombinasjon med tilsetninger av silikastøv, flygeaske og slagg. Prinsippet er vist i Figur 13. Man prøver ut kombinasjoner av et gitt tilslag og gitt bindemiddel ved ulike alkalimengder. Deretter plottes ekspansjon mot alkalimengde, og man finner krysningspunktet for akseptert ekspansjon og ekspansjonskurven og tilhørende alkalimengde for dette nivået. Man har innført en sikkerhetsmargin på $0,2 \text{ kg/m}^3$, dvs. at tillatt maksimalt alkalimengde beregnes som oppnådd verdi minus sikkerhetsmargin.

Som reaktivt tilslag kan man enten benytte:

- Referanse for det mest reaktive tilslag vi kjenner i Norge
- Aktuelt tilslag man vil benytte i produksjonen

I tilfelle a) oppnår man en generell aksept for alle tilslag i kombinasjon med aktuelt bindemiddel, mens man i tilfelle b) kun oppnår aksept for det aktuelle tilslaget i kombinasjon med aktuelt bindemiddel.



Figur 13 Prinsipp for funksjonsprøving iht. norsk regelverk NB 21. Fra Dahl et al (2004).

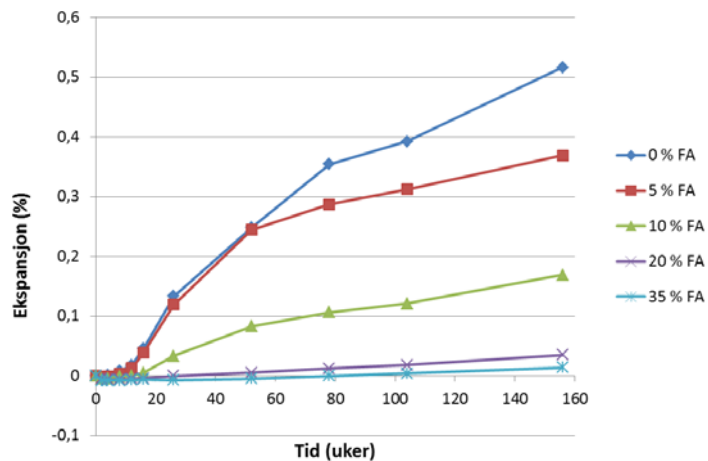
Systemet vi i dag bruker i Norge hvor vi tillater reaktive tilslag i kombinasjon med lavalkalisementer eller med tilsetningsmaterialer som flygeaske, slagg og silikastøv er utelukkende bygget på erfaringer fra lab. Vi har i Norge per i dag få eller ingen sikre langtidsobservasjoner fra betongkonstruksjoner i felt på at kombinasjoner av alkalireaktive tilslag sammen med de dokumenterte doseringene av flygeaske, slagg eller silikastøv gir tilstrekkelig sikkerhet mot alkalireaksjoner på lang sikt. Det er derfor en ambisjon å skaffe seg slik dokumentasjon/verifikasjon i løpet av de nærmeste årene.

4.3.3 Resultater fra laboratorieforsøk

Kjellsen et al. (2001) har vist at bruk av flygeaske er et effektivt virkemiddel for å motvirke ekspansive alkalireaksjoner. Resultater som viser effekt av økende flygeaskedosering er vist i Figur 14. Det er her benyttet kataklasitt tilslag, tilslag fra denne spesifikke ressursen (Ottersbo) er det mest reaktive tilslaget vi kjenner i Norge. Bindemiddel i referanseblandingen var en blanding av Norcem Standardsement og Anleggsement i forholdet 3:1 (vektbasert). Alkaliinnholdet er likt for alle blandingene, $5 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}$ -

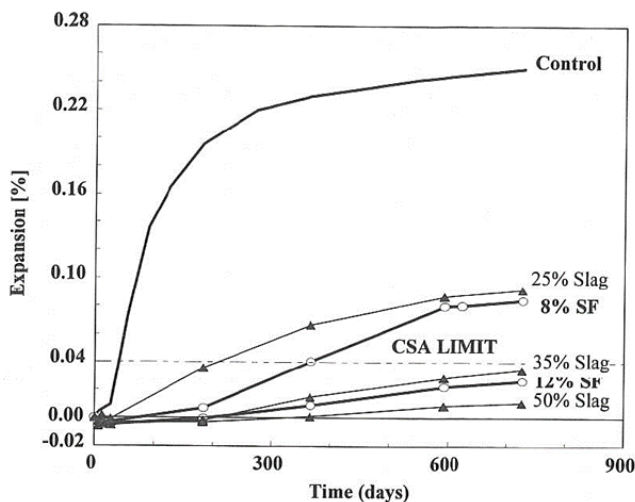
ekvivalent, når man ser bort fra alkaliinnhold i flygeasken som ikke er regnet med. Dette ble oppnådd vha. tilsetning av NaOH i betongens blandevann.

Vi ser at betongene med henholdsvis 20 og 35 % innhold av flygeaske viser svært liten ekspansjon fram til 3 års prøving, og lå under grenseverdi for 1 år gitt i NB 21 på 0,03 %. Betongene med 10 % eller lavere dosering av flygeaske ga på den andre siden betydelig ekspansjon, og mengden tilsatt flygeaske har ikke vært stor nok til å «dempe» reaksjonen. Den preventive effekten synes her å være direkte koblet mot mengde tilsatt flygeaske.



Figur 14 Effekt av flygeaskedosering på ekspansjon dokumentert vha. Norsk betongprismemete. Data fra Kjellsen et al. (2001).

Slagg har tilsvarende positiv effekt som flygeaske, blant annet vist i en Canadisk studie av Bleszynski et al. (2000). Det kreves generelt høyere innblandingsgrad av slagg enn av flygeaske for å oppnå tilsvarende effekt med hensyn til reduksjon av ekspansjon, noe som er vist i Figur 15. Tilsetning av 35 % slagg, alternativt tilsetning av 12 % silikastøv, har i denne studien gitt «god nok» effekt til å komme under grenseverdien på 0,04 % ekspansjon etter 2 års eksponering. Dette er en generell grenseverdi som benyttes ved funksjonsprøving av betong i Canada, og i stor grad også i USA.

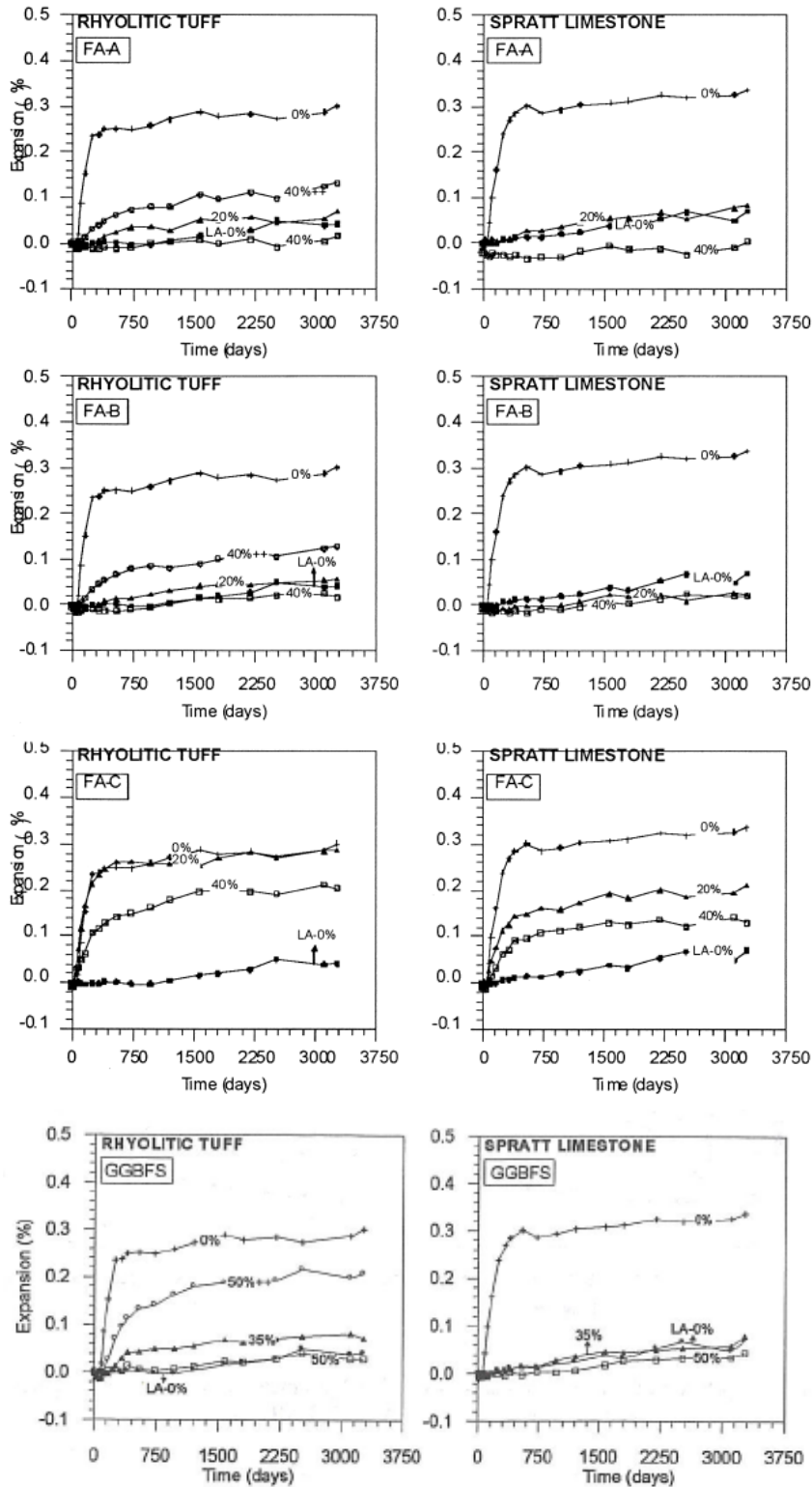


Figur 15 Effekt av dosering slagg eller silikastøv på ekspansjon målt i Canadisk betongprismemete (CSA-A23.2-14A) fram til 2 år. Alle betonger med det Canadiske referansetilslaget Spratt. Grenseverdi på 0,04 % etter 2 år er tegnet inn. Fra Bleszynski et al. (2000).

Den samme studien (Bleszynski et al. 2000) har også vist at ternære blandinger, dvs. blandinger av Portlandsement, slagg og silikastøv er svært effektive til å redusere alkalireaksjoner. Blandinger med innblandingsgrad av silikastøv/slagg på henholdsvis: 8/15, 4/25, 5/25, 8/25 og 6/35 (vektbasert) ga ekspansjon etter 2 år i intervallet 0,016 – 0,026 %, altså klart innenfor 2 års grenseverdi. Kombinasjoner av slagg og silikastøv synes altså å gi en synergieffekt ved at den totale effekten blir større enn den summerte effekten fra hver av disse materialene.

I en studie av Duchesne & Bérubé (2000, 2001) er det dokumentert ekspansjon opp til 9 år i Canadisk betongprismemetode (CSA-A23.2-14A) for 3 varianter av flygeaske og en variant av slagg, i tillegg til 2 varianter av silikastøv. Det ble benyttet en flygeaske A) med lavt alkaliinnhold (2,3 %) og lavt kalsiuminnhold (1,9 %), flygeaske B) med moderat alkalnivå (3,1 %) og moderat kalsiumnivå (12 %) samt flygeaske C) med høyt innhold av både alkalier (8,6 %) og kalsium (20,7 %).

I Figur 16 vises resultatene for de 3 ulike flygeaskene i kombinasjon med reaktive bergarter. Som det fremgår var flygeasken med lavest alkali- og kalsiuminnhold (A) den mest effektive for å redusere ekspansjon, mens flygeaske (C) med høyest alkali- og kalsiuminnhold var svært lite effektiv. Som forventet ga 40 % tilsetning av flygeaske bedre effekt enn 20 % flygeaske. 40 % flygeaske ga også bedre sikkerhet mot alkalireaksjoner enn lavalkalisement uten tilsetning av flygeaske. Bemerk ellers at høye doseringer flygeaske har gitt seg utslag i svinn på kort sikt. Figuren viser også effekt av mengde slagg, hvor det fremgår at dosering på 50 % slagg er noe mer effektiv enn 35 %, men at forskjellen er relativt liten i kombinasjon med det benyttede tilslag (Spratt).

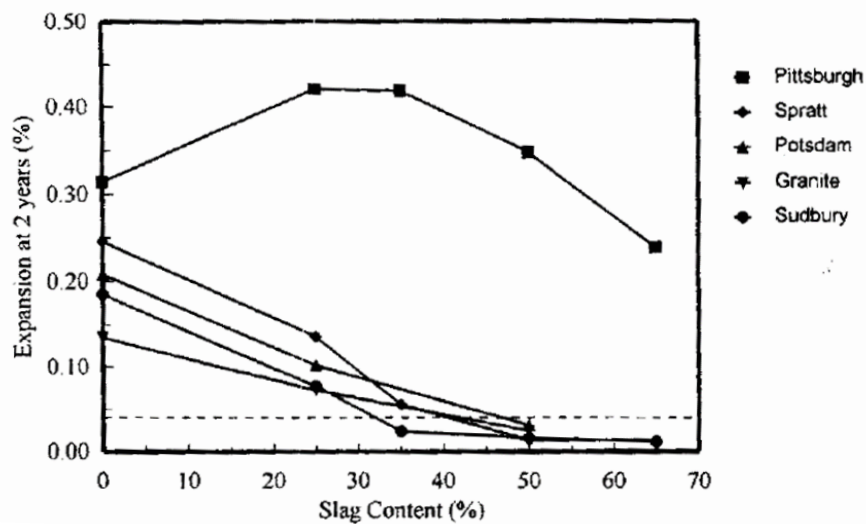


Figur 16 Effekt av type og mengde flygeaske (FA) samt mengde slagg (GGBFS) på ekspansjon i Canadisk betongprismemetode opp til 9 år for 2 reaktive tilslag. Referansebetong med 350 kg sement/m³, sementens alkalinitet 1,05 % Na₂O-ekv. Alkalinitet økt til 1,25 % ved tilsetning av NaOH i blandedvannet. Også vist betonger med lavalkalisement med 0,54 % Na₂O-ekv. (Betonger merket 40++ representerer blandinger hvor alkalimengde er økt til 3,0 % av sementvekt ved tilsetning av NaOH). Fra Duchesne & Bérubé (2001).

Det fremgår videre av studien (Duchesne & Bérubé 2000, 2001) at mange av betongene hadde veldig liten og i flere tilfeller tilnærmet ingen økning av ekspansjon etter 2 års eksponering. En sterkt medvirkende årsak til dette antas å være den utlekkingen av alkalier som finner sted i denne metoden. En annen årsak kan være at tilgjengelige alkalier i porevannet reduseres av andre årsaker og f.eks. bindes opp i CSH-fasen som dannes ved reaksjon av flygeaske og slagg, eller alternativt bindes opp i reaksjonsproduktene som dannes ved alkalireaksjonen.

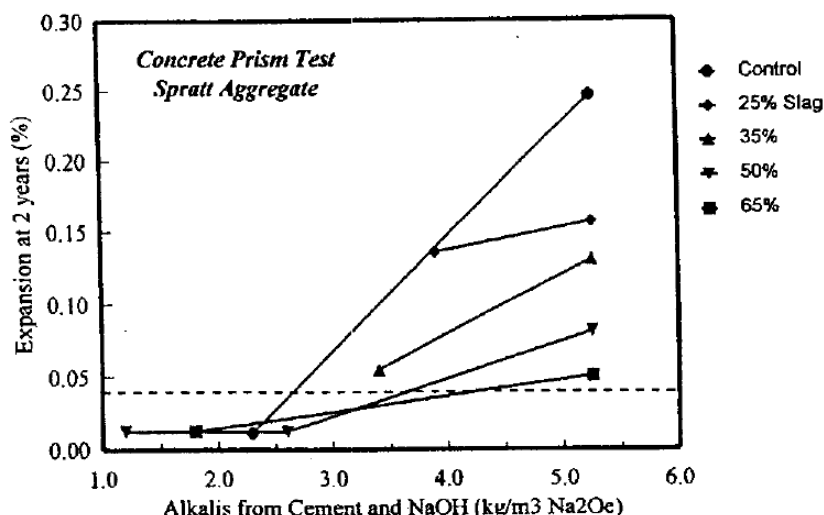
I studien av Duchesne & Bérubé (2000, 2001) er det påvist en meget god sammenheng mellom reduksjon av alkaliinnhold i porevann og reduksjon av ekspansjon. Basert på denne sammenhengen foreslås det at alkaliinnholdet i poreløsningen må være **0,6 M eller lavere** for å gi sikkerhet mot alkalireaksjoner.

Thomas & Innis (1998) har vist at nødvendig mengde slagg for å hindre alkalireaksjon er en funksjon av tilslagets reaktivitet, se Figur 17. Merk at tilslaget «Pittsburgh» gir alkali-karbonatreaksjon og dermed ikke er relevant i denne sammenhengen. Slagg gir altså ikke noen effektiv preventiv virkning for slike tilslag. For de 4 øvrige tilslagene som gir «alkali-silika» reaksjoner lå nødvendig mengde slagg fra 35 % for «Sudbury» tilslaget til 50 % for «Spratt» tilslaget i forhold til kriteriet på 0,04 % etter 2 års eksponering. Alkalimengden (Na_2O -ekvivalenter) i % av portlandsement var lik for alle betongene, mens alkalier fra slagg ikke ble medregnet.



Figur 17 Effekt av type tilslag og mengde slagg på ekspansjon i Canadisk betongprismemetode etter 2 år. Referansebetong med 420 kg sement/m³, alkalnivået «boostet» fra naturlig nivå 0,81 % til 1,25 % vha. tilsetning av NaOH. Alkalimengde i % av portlandsement. Alkalier i slagg ikke medregnet. Fra Thomas & Innis (1998).

Alkalimengde er også en vesentlig faktor i forhold til nødvendig mengde slagg, som vist av f.eks. Thomas & Innis (1998). I Figur 18 vises hvilken alkalimengde i kg/m³ Na_2O -ekvivalenter som «tåles» for betonger med ulike mengder slagg. Merk at alkalier fra slagg ikke er medregnet. Som det fremgår av figuren ga økende mengde slagg økende toleranse for alkalier.



Figur 18 Effekt av alkalimengde (alkalier fra Portlandsement + NaOH) og mengde slag på ekspansjon i Canadisk betongprismemetode etter 2 år eksponering. Fra Thomas & Innis (1998).

Hooton et al. (2012) har studert effekt av høyalkali-sementer i kombinasjon med 2 reaktive tilslag og varierende innblandinger av flygeaske eller slag. Ekspansjoner opp til 2 års prøving i Canadisk betongprismemetode vises i Tabell 7. Det var tilstrekkelig med 25 % tilsetning av flygeaske for Sudbury tilslag og tilsvarende 30 % tilsetning av flygeaske for Spratt tilslaget selv ved bruk av sement med 1,22 % alkalier (inklusive alkalier fra NaOH). For tilsatt flygeaske viser disse resultatene en relativt liten effekt av økt alkalimengde. For slag er det derimot annerledes: For Spratt tilslag var 50 % slag tilstrekkelig ved bruk av sement med alkalimengde på 1,1 %, men ikke for sement med alkalimengde på 1,22 %. Sudbury-tilslaget viser tilsvarende følsomhet for økt alkalimengde, men for dette tilslaget er 50 % slag tilstrekkelig selv ved det høyeste alkalinivået på 1,22 %.

Tabell 7 Effekt av sementens alkaliinnhold og mengde slag eller flygeaske på ekspansjon i Canadisk betongprismemetode opp til 2 års eksponering. Alkalimengde for Portlandsement oppgitt, alkalier fra flygeaske (3,82 %) eller slag (0,91 %) ikke regnet med. Ekspansjoner > 0,04 % uthevet. Bindemiddelmengde 420 kg/m³, masseforhold varierer fra 0,36-0,42 (k=1 for flygeaske og slag). Fra Hooton et al. (2012).

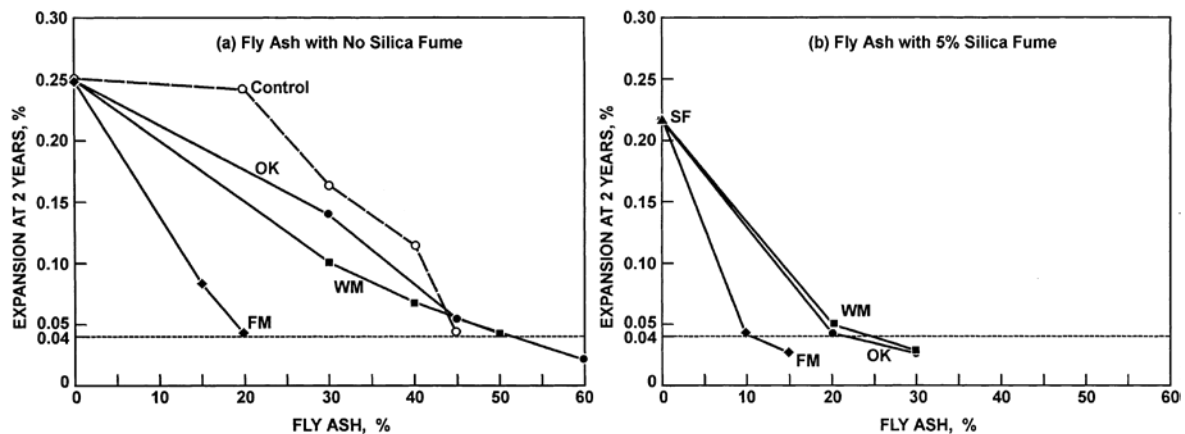
Spratt Aggregate	0.96% Cement	1.10% Cement	1.22%* Cement	Sudbury Aggregate	0.96% Cement	1.10% Cement	1.22%* Cement
100% Cement	0.402	0.406	0.359	100% Cement	0.201	0.317	0.360
30% fly ash		0.016	0.019	25% fly ash		0.004	0.012
35% fly ash		0.008	0.007	30% fly ash		-0.004	0.002
40% fly ash		0.003	0.006	35% fly ash		-0.007	0.001
35% slag		0.063	0.100	30% slag		0.055	0.112
50% slag		0.027	0.046	40% slag		0.014	0.050
				50% slag		0.010	0.029

* NaOH added to obtain 1.25% alkali equivalent

Lee et al. (2000) har vist tilsvarende resultater; at økende mengde flygeaske og slag gir økende grad av sikkerhet mot alkalireaksjoner. Bruk av > 25 % flygeaske og > 60 % slag ga «tilstrekkelig sikkerhet» mot alkalireaksjoner. Studien er basert på studier av mørtelprismer lagret ved 38 grader, både over vann og i ulike løsninger.

I tillegg til mengde flygeaske og alkaliinnhold i Portlandsementen, har kjemisk sammensetning for slag og flygeaske en vesentlig effekt. Thomas et al. (1999) og Shehata & Thomas (2002) har vist at CaO-innholdet i flygeasken har svært stor effekt. I Figur 19a) vises effekt av ulike typer og mengder flygeaske (i % av totalt bindemiddel) på ekspansjon i betongprismemetode etter 2 år. Figuren viser at lav-kalsium flygeaskene (type F) er langt mer effektiv enn de to askene med høyt kalsiumnivå. Det må imidlertid påpekes at flygeaske WM har et betydelig høyere nivå av syreløselige alkalier enn de to øvrige flygeaskene.

I Figur 19 a) vises kontrollblandinger (merket Control) med tilsvarende alkalimengde som uttynnings-effekten ved tilsetning av flygeaske representerer. Disse betongene er oppnådd ved blanding av høy-alkali- og lav-alkaliseмент, og spennet representerer alkalimengder fra 5,25 og ned til 2,89 kg/m³. Resultatene illustrerer med stor tydelighet at vi har å gjøre med andre mekanismer enn ren «uttynning» av den initiale alkalimengden som kommer fra Portlandsementen. Merk også at i disse beregningene av alkalimengder er kun alkalier fra Portlandsementen tatt med, mens flygeaskene også inneholder betydelige mengder alkalier. Tilsatt flygeaske tar altså «hånd om» sine egne alkalier i tillegg til deler av alkaliene fra Portlandsementen.



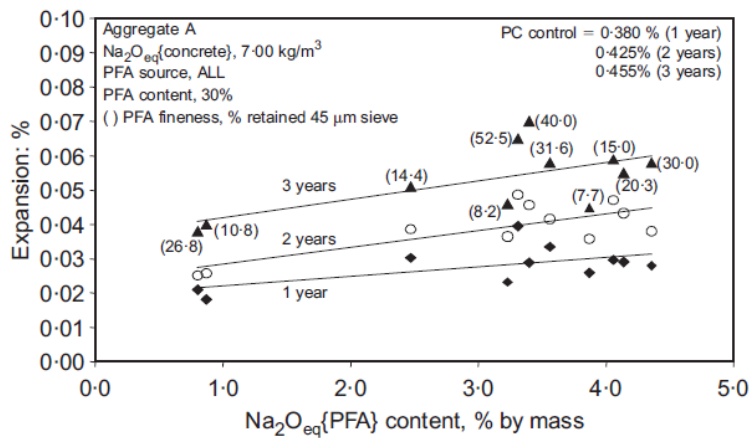
Figur 19 a) Effekt av mengde og type flygeaske på 2 års ekspansjon målt i betongprismemetode (CSA A23.2-14A). b) tilsvarende med 5 % silikastøv tilsatt. Flygeasketyper: FM (lav kalsium, 6,4 % CaO). WM (middels kalsium 18,5 % CaO) og OK (høyt CaO 27,8 %). Reaktivt tilslag fra Ottawa (Spratt). Fra Shehata & Thomas (2002).

I Figur 19 b) illustreres en annen effekt, nemlig at kombinasjon av silikastøv og flygeaske er svært effektivt. Merk at tilsetning av 5 % silikastøv i seg selv (uten tilsetning av flygeaske) kun reduserer ekspansjonen fra 0,25 til 0,22 %, mens i kombinasjon med flygeaske har silikastøv en langt høyere effekt. Spesielt gir dette seg utslag i at høy-kalsium askene blir betydelig mer effektive i kombinasjon med silikastøv. Vi har altså å gjøre med en **synergieffekt**, dvs. den kombinerte effekten av silikastøv og flygeaske er større enn effekten av materialene hver for seg. Tilsvarende synergieffekt er også rapportert av f.eks Bleszynski et al. (2002) for slag, se tidligere omtale.

I denne studien av Shehata & Thomas (2002) er det også målt alkaliinnhold (målt på pastaprøver med tilsvarende bindemiddelsammensetning som betongene). Det er påvist en god korrelasjon mellom alkaliinnhold og ekspansjon. Spesielt er det påvist at bindemiddelsammensetninger som holder alkalimengde $[Na] + [K] < 0,6$ M gir ekspansjon $< 0,04$ % etter 2 år.

I en britisk undersøkelse rapportert av McCarthy et al. (2006) ble 11 ulike flygeasker med varierende kjemisk/mineralogisk sammensetning, og varierende finhet testet sammen med 3 reaktive tilslag. I Figur 20 er ekspansjon for henholdsvis 1, 2 og 3 år plottet mot alkalimengde i flygeasken. I tillegg viser figuren «grovhet» uttrykt ved mengde partikler > 45 µm. Studien viser at økt alkaliinnhold og økt «grovhet» ga økt ekspansjon. Effekten var imidlertid relativt liten, og alle flygeaskene ga en meget god preventiv

effekt. Alle de 11 flygeaskene hadde lavt CaO-innhold (< 5 %) og relativt høyt Al₂O₃-innhold (20-39 %).



Figur 20 Effekt av flygeaskens alkaliinnhold og finhet. Ekspansjonsdata opp til 3 år ved 38°C eksponering over vann. Finhet angitt i parentes (% sikterest på 45µm). Alle betonger med samme reaktive tilslag (chert), flygeaskemengde 30 vekt % av totalt bindemiddel. Ekspansjoner for referansebetong uten flygeaske gitt i øvre høyre hjørne (PC control). Figur fra McCarthy et al. (2006).

Det finnes noen eksempler fra litteraturen på at tilsetning av flygeaske i visse tilfeller kan øke problemet med alkalireaksjoner, referert i ACI 232.2R-03 (2003). Det er her vist tilfeller hvor pessimumsnivået ligger i området 15-20 % flygeaske, men dette kan variere med type tilslag og type tilsetningsmateriale. Slike pessimumseffekter er også kjent for silikastøv, blant annet rapportert av Kawamura et al. (1986). Pessimumseffekt er et kjent fenomen for enkelte typer hurtigreagerende tilslag, hvor det eksisterer et gitt forhold mellom reaktivt tilslag og alkalimengde. Slike effekter er ikke observert for langsomtreagerende reaktive tilslag av den typen vi har i Norge, og det er lite sannsynlig at pessimumseffekt ved tilsetning av pozzolane tilsetninger vil gjøre seg gjeldende for norske tilslag. Men vi kan likevel ikke utelukke muligheten for slike effekter.

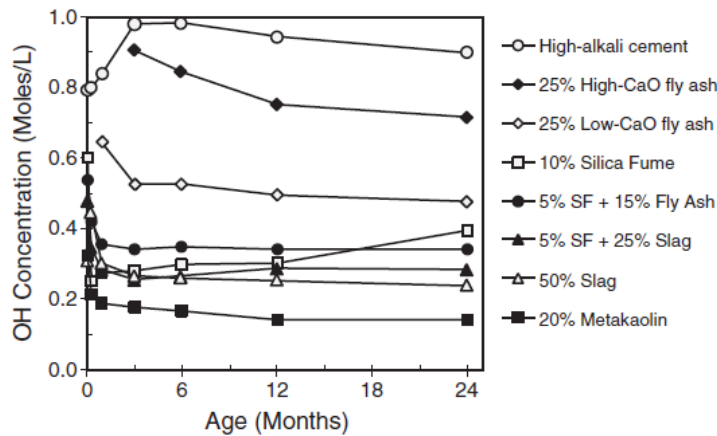
4.3.4 Litt om mekanismer og effekt av kjemisk sammensetning

Mange forskere, som eksempelvis Thomas (2011), Duchesne & Bérubé (2000), Böhm & Baetzner (2008) viser til tilsetningsmaterialenes evne til å redusere det «effektive» alkalinitivået og OH⁻ konsentrasjonen i betongens porevæske som den aller viktigste årsaken til disse materialenes effektivitet til å redusere omfanget av alkalireaksjoner. En reduksjon av OH⁻ konsentrasjonen vil som vist i tidligere avsnitt føre til redusert løselighet av silika. Dette gir redusert hastighet på alkalireaksjonens første steg som er en ren oppløsningsreaksjon, eventuelt forhindres reaksjonen helt hvis man er under en terskelverdi.

Men også andre forhold enn reduksjon av porevæskens alkalinitet kan tenkes å spille inn. Eksempelvis hevder Bakker (1980) at redusert hastighet på ionediffusjon sammen med betydelig redusert vannpermeabilitet har større betydning enn alkalinitet i porevæskene for betonger med slagg. Også Böhm & Baetzner (2008) viser til at effekten av slagg går utover dens effekt til å redusere pH, antagelig pga. tettere porestruktur og redusert ionemobilitet.

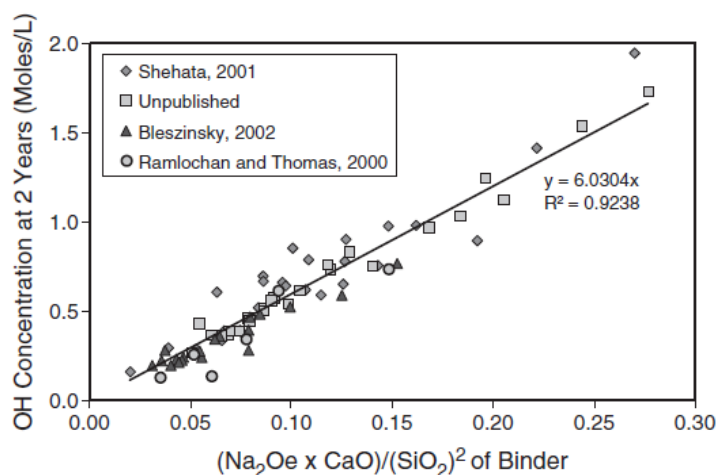
Flygeaske og slagg, også i kombinasjoner med silikastøv, er effektive til å holde alkaliniteten nede også over tid, noe som er vist i Figur 21. Forutsetningen for lav alkalinitet er tilstrekkelig mengde av tilsetningsstoff i forhold til hvor effektivt det er. Det er imidlertid verdt å merke seg at silikastøv alene i noen tilfeller kan gi en initialt lav pH, men så gi en økning på lang sikt som vist i figuren. Silikastøv fungerer svært godt sammen med både slagg og flygeaske, men det er altså knyttet noe usikkerhet til

bruk av silikastøv som eneste tiltak mot alkalireaksjoner. En sannsynlig årsak til at flygeaske og slagg fører til mer stabil alkalinitet over tid enn silikastøv er at de inneholder aluminium (Lothenbach et al. 2011), se videre diskusjon i senere avsnitt.



Figur 21 Utvikling av porevæskens alkalinitet for sementpastaer (med masseforhold 0,5) med ulike mengder og typer tilsetningsmaterialer opp til 2 år. Fra Thomas (2011).

En viktig årsak til lavere alkalinitet i porevæsken er at flygeaske og slagg fører til dannelse av C-S-H med lavere Ca/Si forhold, noe som gir høyere kapasitet til å binde alkalier i C-S-H fasen (Thomas 2011, Hong & Glasser 1999). Thomas (2011) har påvist en sammenheng mellom bindemiddelets kjemiske sammensetning og poreløsningens alkalinitet som vist i Figur 22. Alkalinitiværet er altså en funksjon av totalt innhold av alkalier i bindemiddelet, og av bindemiddelets evne til å binde alkalier. Evnen til å binde alkalier er igjen en konsekvens av forholdet mellom kalsium og silisium, og sammenhengen i Figur 22 kan dermed forklares. I følge Thomas (2011) ga ikke innhold av aluminium signifikant effekt ut fra materialet som forelå, på tross av at mengde aluminium synes å være av stor betydning, se neste avsnitt. Datagrunnlaget består av totalt 79 bindemidler med sammensetning fra rene Portlandsementer, binære blandinger med Portlandsement og slagg, blandinger av flygeaske og Portlandsement samt også ternære blandinger som også inneholder silikastøv.



Figur 22 Sammenheng mellom poreløsningens alkalinitet og bindemiddelets kjemiske sammensetning. Fra Thomas (2011).

Det er flere studier (Hong & Glasser 2002, Chapex & Scrivener 2013) som tyder på at tilsetningsmaterialer med betydelig mengde aluminium, f.eks. flygeaske og slag, er mer effektive enn materialer med lav mengde aluminium, f.eks. silikastøv. I en studie av Warner et al. (2012) er det vist at tilsetning av aluminiumsoksidpulver kan forbedre effektiviteten for flygeasker med lav mengde aluminiumsoksid. I følge Chapex & Scrivener (2012) gir aluminium en inhibitor-effekt ved at løseligheten til reaktiv silika reduseres betydelig, altså en separat effekt som virker i tillegg til redusert pH. Andre, som Thomas (2011) og Hong & Glasser (2002) peker på at aluminium fører til dannelse C-A-S-H gel som gir høyere bindingskapasitet for alkalier enn C-S-H gel, og også i større grad motvirker langsiktig frigivelse av alkalier til porevæsken. Aluminium har altså en dokumentert positiv effekt, men det gjenstår forskning for å klargjøre de fundamentale mekanismene som ligger bak dette.

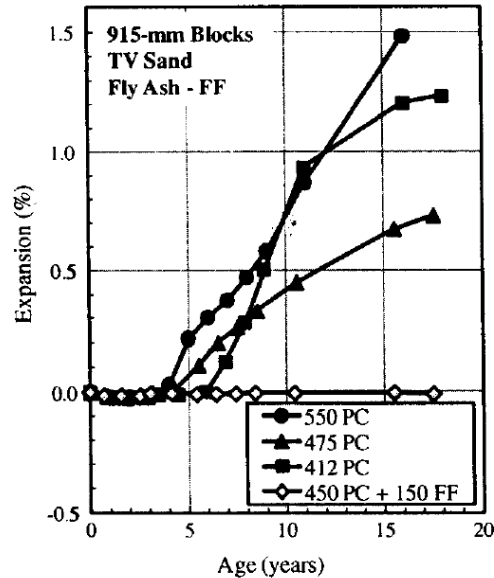
4.3.5 Feltefaringer og korrelasjon mellom lab og felt

Thomas et al. (2011) har rapportert en feltstudie fra Storbritannia, hvor betonger med ulike reaktive tilslag (alle med reaktiv flint), varierende sementmengde og 2 typer flygeaske ble støpt ut i kuber for utendørs eksponering. Studien har påvist at 25 % og 40 % flygeaske har forhindret utvikling av skadelige alkalireaksjoner. Effekt av 25 % flygeaske er illustrert i Figur 23. Mens referansen uten flygeaske i dette tilfellet har ført til omfattende oppsprekking er betongen med 25 % flygeaske uskadet etter 18 år.



Figur 23 Bilder av 900 mm feltekuber fra BRE feltstasjon i Storbritannia etter 18 års eksponering. Venstre: referansebetong med 550 kg/m^3 portlandsement. Høyre: 450 kg/m^3 portlandsement + 150 kg/m^3 flygeaske. Begge betonger med samme flinholdig sand. Foto fra Ideker et al. (2012).

I Figur 24 er effekt av varierende mengde sement og tilsatt flygeaske vist i form av målt ekspansjon på feltekuber fram til 18 år. Reaktiv komponent er her flinholdig sand som gir såkalt pessimums- effekt ved 25 % andel av reaktiv sand. Vi ser at det ikke er en direkte sammenheng mellom mengde sement (og dermed alkalimengde) i dette tilfellet. Betongen med 25 % tilsatt flygeaske har etter 18 år ikke gitt noen ekspansjon, noe som stemmer godt overens med bildet vist i Figur 23.

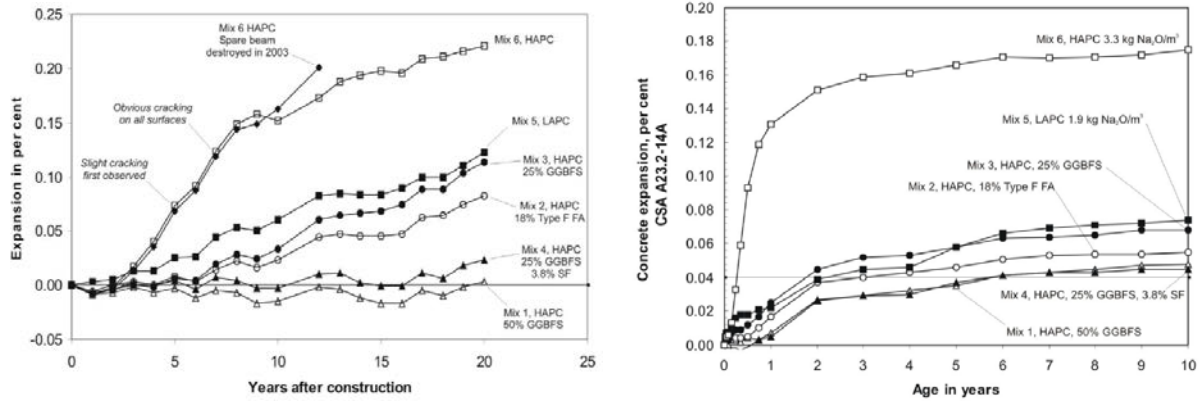


Figur 24 Effekt av varierende sementmengde og tilsatt flygeaske på ekspansjon målt på feltkuber. 25 % av tilslaget er sand fra Thames Valley inneholdende ca. 50 % flint. Alkaliinnhold i sement er 1,15 % Na_2O -ekv. Figur fra Thomas et al. 2011.

Tilsvarende positive effekt av flygeaske er også blitt påvist ved bruk av et annet reaktivt tilslag, gråvakke. Etter 14 års eksponering av betong med tilslag av gråvakke og 25 % flygeaske ble det ikke påvist riss, mens referansebetongen uten tilsatt flygeaske har gitt høy grad av opprissing med rissvidder opp til 5 mm (Thomas et al. 2011).

Denne studien av Thomas et al. (2011) har bekreftet tidligere laboratoriestudier mht. effekt av flygeaske, og har vist at effekten av flygeaske går langt utover «uttynnings-effekten» som skjer når Portlandsement erstattes med flygeaske. I den samme studien ble det også benyttet en annen flygeaske med omtrent tilsvarende kjemiske sammensetning, men med betydelig høyere andel grove partikler > 45 μm (28,3 vs. 8 %). Den grove flygeaske ga også en god preventiv effekt, men ved høye sementmengder (412 og 450 kg PC) og 25 % flygeaske var det en resulterende ekspansjon på henholdsvis 0,044 og 0,061 %. Flygeaskens finhet har en viss betydning ved at finmalt flygeaske er noe mer effektiv.

Hooton et al. (2013) og MacDonald et al. (2012) har rapportert en laboratorie- og feltstudie som inkluderer betonger eksponert utendørs i 20 år. Reaktivt tilslag var her Spratt fra Ottawa i Canada, et mye brukt referansetilslag som er svært reaktivt. Effekten av 2 doseringsnivåer slagg på henholdsvis 25 og 50 %, ett nivå flygeaske (18 %) samt kombinasjoner av slagg og silikastøv (25 + 3,8 %) ble testet. I tillegg ble 2 varianter av rene Portlandsementer med ulike alkalimengder benyttet. Masseforhold lå i området 0,34-0,40, og bindemiddelinhold i intervallet 415-428 kg/m^3 . Resultater for uarmerte betongbjelker fram til 20 års felteksponering er vist i Figur 25 (venstre), mens resultater for laboratorieprøving av de samme betongene opp til 10 år er vist i samme figur (høyre).



Figur 25 Ekspansjon av uarmerte betongbjelker ved utendørs eksponering (venstre), og ekspansjon av betongprismer i laboratorium ved 38 °C (høyre). Figurer fra MacDonald et al. (2012).

Resultatene fra Figur 25 viser at betongene med 50 % slagg og kombinasjon av 25 % slagg og silikastøv ga lavest ekspansjon. De øvrige variantene med 18 % flygeaske, 25 % slagg samt lavalkalisement har alle gitt høyere ekspansjon. Petrografisk analyse av felteksponerte betonger (tatt etter 14 års eksponering) har vist at blanding 5 (lavalkali) ga betydelige tegn på alkalireaksjoner, mens også blanding 2 og 3 (henholdsvis 18 % FA og 25 % slagg) ga relativt tydelige tegn på alkalireaksjoner etter 14 år. Varianten med 25 % slagg og silikastøv ga på den andre siden relativt små tegn til alkalireaksjoner, mens for betongen med 50 % slagg var det ingen tegn til alkalireaksjoner etter 14 år. Når vi sammenligner laboratorieresultatene (høyre) med feltresultatene (venstre) kan vi se at både betongen med lavalkalisement og betongen med 18 % flygeaske ville blitt godkjent til bruk basert på det vanlige Canadiske kriteriet (0,04 % ekspansjon etter 2 år). Men resultater fra 14 års felteksponering viser at begge disse betongene altså hadde tydelige tegn på alkalireaksjoner.

Tremblay et al. (2012) har rapport en studie fra en forsøksvei i New Mexico i USA som viser at 20 % flygeaske av type F (lavt kalsiuminnhold) har vært meget effektiv for å forhindre alkalireaksjoner etter 16 års felteksponering. Tilsvarende betong med ren Portlandsement, og også betong med 20 % flygeaske av type C (høyt kalsiuminnhold) ga på den annen side omfattende skader etter 16 års eksponering. Studien viste for øvrig at innblanding av LiOH har gitt god preventiv effekt. Alkalimengde for betong med ren Portlandsement var $2,17 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O-ekv}$. Følgelig var alkalibidraget fra Portlandsementen 80 % av dette igjen, dvs. $1,74 \text{ kg/m}^3$ for betong med 20 % flygeaske.

Det er dokumentert fra en dam i Wales at flygeaske har god preventiv effekt, dette er rapportert av Thomas et al. (2012). Nant-y-Moch dam og Dinas dam ligger nær hverandre, og de ble begge bygget med tilslag av samme opprinnelse, se detaljer i Tabell 8. I Nant-y-Moch dammen ble det benyttet 25 % flygeaske, mens Dinas dam ble bygget av betong med ren Portlandsement. I Dinas dam er det omfattende oppsprekking og ekspansjon pga. alkalireaksjoner, på tross av at total alkalimengde var kun $1,83 \text{ kg/m}^2$ ($\text{Na}_2\text{O-ekv}$). I Nant-y-Moch dammen er det etter 50 år ingen symptomer på alkalireaksjoner. Alkalimengden i denne dammen (alkalier fra Portlandsement) er marginalt høyere enn i Dinas dam.

Tabell 8 Detaljer og observasjoner for Nant-y-Moch Dam og Dinas Dam i Wales. Begge dammer bygget i tidsperioden 1957-1962. Fra Thomas et al. 2012.

	Nant-y-Moch Dam	Dinas Dam
Structure type	Massive buttress dam	Partially reinforced arch
Overall length, m (ft)	350 (1148)	108.2 (355)
Maximum height, m (ft)	52 (171)	26.5 (87)
Portland cement content, kg/m ³ (lb/yd ³)	Facing*: 285 (475) Core: 189 (315)	295 (492)
Cement alkalis, % Na ₂ O _e	0.66	0.62
Total calculated cement alkali, kg/m ³ (lb/yd ³) Na ₂ O _e	Facing: 1.88 (3.14) Core: 1.25 (2.08)	1.83 (3.05)
Fly ash, kg/m ³ (lb/yd ³)	Facing: 95 (158) – 25% Core: 63 (105) – 25%	None
Aggregates	Coarse: Greywacke-Argillite from Carn Owen Quarry Fine: Local pit sand with some quarry sand (Carn Owen)	
Condition survey, petrographic examination and DRI ¹ performed in 1991 ²	No symptoms of ASR in the field and no microscopic evidence of ASR in core samples (DRI = 45)	Severe cracking observed and confirmed by petrographic examination to be caused by ASR (DRI = 628)
Visual inspection in 2010	No symptoms of ASR	Cracking advanced since 1991 inspection; repairs (post-tensioning) observed at crest level on upstream face

*"Facing" is a 1.22 m (4 ft) thick zone of concrete on the upstream face of the dam; the balance of the concrete thickness is termed "core"

¹DRI is Damage Rating Index. This index provides a semi-quantitative rating of the concrete condition and symptoms of ASR and was performed according to the procedure developed by Grattan-Bellew.⁴ DRI > 600 indicates extensive ASR

Et annet dokumentert eksempel fra felt er Lower Notch dam i Ontario, Canada. Dammen er støpt med høy-alkalisk sement, med innblanding av 20 og 30 % flygeaske for henholdsvis konstruksjonsbetong og massivbetong. Etter drøyt 40 år er det ingen tegn til oppsprekking eller ekspansjon. Tilsvarende tilslag som ble benyttet (gråvakke) har gitt reaksjoner i en rekke andre konstruksjoner, blant annet i en dam og i flere bruer (Thomas et al. 2012).

Hooton et al. (2008) og tidligere også Bleszynski et al. (2002) har rapportert en studie hvor man har testet effekten av silikastøv og slagg, samt kombinasjoner av disse. Referansebetongen inneholdt 420 kg Portlandsement per m³, med en total alkalimengde på 3,95 kg/m³ (Na₂O-ekv.). Det var konstant bindemiddelinhold for alle blandinger, og konstant masseforhold på 0,42. K-faktor var lik 1 for alle typene bindemiddel, i tråd med vanlig praksis i Nord-Amerika. Studien omfattet i tillegg til laboratorieforsøk også feltstudier av en betongvei i Picton, Ontario i Canada, med de samme betongene. Veien ligger inne på området til en sementfabrikk, og er utsatt for tung trafikk så vel som fryse-tine salter og mange fryse-tine sykler i løpet av en vinter. Feltstudien omfattet også studier av kloridinntrengning i de ulike typene betong, samt studier av frostbestandighet. Nederste rad i Tabell 9 viser såkalt "Damage rate index", som gir et kvantitativt mål på skadegrad målt på planslip av kjerner som er boret ut fra aktuell konstruksjon. Verdier som ligger under 50 representerer liten eller ingen skade, mens økende verdier gir økende skadegrad. Nærmere omtale av metoden finnes i Grattan-Bellew & Mitchell (2006).

Resultatene vises i Tabell 9, og illustrerer at alle kombinasjoner av tilsetninger har hatt effekt i forhold til å gi redusert ekspansjon i lab og redusert skadegrad i felt. Det vanlige kravet om 2-års ekspansjon etter 0,04 % ble overskredet av betongen med 8 % silikastøv, men alle de andre betongene med tilsetninger av silikastøv/slagg lå under grenseverdien. Studien indikerer at 8 % silikastøv eller 35 % slagg ikke eliminerer alkalireaksjoner. På den annen side ga de ternære blandningene med tilsetning av både slagg og flygeaske svært god effekt. Det bemerkes at feltstudien kun er rapportert til 6 år, og det er beheftet usikkerhet knyttet til det videre skadeforløpet. Frostbestandigheten er god for alle betongene, men det bemerkes at betongen med 50 % slagg har gitt noe tendens til frilagte tilslagskorn på grunn av begynnende frostnedbrytning.

Tabell 9 Effekt av binære og ternære blandinger på ekspansjon i betongprismemetode, samt DRI (Damage Rate Index) målt på tilsvarende betonger etter 6 års felteksposering. Reaktivt tilslag fra Ottawa (Spratt). Alkaliinnhold for referansebetongen var $3,95 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}$ -ekvivalenter. Data fra Hooton et al. (2008).

% SF / % Slag	Control	Binary			Ternary		
	0/0	8/0	0/35	0/50	4/25	6/25	5,2/35
1 year %	0,231	0,018	0,013	0,007	0,007	0,008	0,008
2 year %	0,238	0,048	0,019	0,006	0,006	0,007	0,007
8.75 year %	0,263	0,046	0,036	0,024	0,024	0,028	0,026
DRI 6 years field*	211	57,4	50,1	4,9	35,9	3,9	7,6

Lane (2000, 2006) har vist at 15 % flygeaske (med kalsiummengde < 6 % og alkalimengde < 1,3 %) eller 35 % slag er tilstrekkelig for å motvirke alkalireaksjoner for det mest reaktive tilslaget (metaryolitt) i Virginia, USA for betonger med alkalimengde på $3,8 \text{ kg/m}^3$ (alkalier i flygeaske ikke medregnet). Betongene ble dokumentert vha. betongprismetode fram til 2 års alder. 15 % flygeaske eller 35 % slag har vært i bruk i Virginia siden 1984. I dagens regelverk er grensene hevet til 20 og 40 % for henholdsvis flygeaske og slag. Det pekes også på at ternære blandinger med kombinasjoner av silikastøv (2,5 eller 5 %) og enten 15 % flygeaske eller 25 % slag er de mest effektive kombinasjonene. Gjennom feltobservasjoner i Virginia for bruer i alderen 15-22 år er det generelt dokumentert at flygeaske og slag har vært effektivt for å bekjempe alkalireaksjoner. Ett beskrevet unntak er et tilfelle med en karbonatbergart og slag, som tidligere diskutert gir ikke slag effektiv preventiv virkning mot alkali-karbonatreaksjoner. Et annet tilfelle med kvartsitt tilslag i kombinasjon med flygeaske har gitt mild grad av alkalireaksjoner. For noen betonger var det antydninger til reaksjonsprodukter, men ingen observerte skader.

Polder et al. (2014) har oppsummert erfaringer fra Nederland. Alkalireaksjoner forekommer i betydelig omfang i Nederland på bruer, viadukter, tunneler og sluser. Alkalireaksjoner forekommer nesten utelukkende på betongkonstruksjoner bygget med betong av ren Portlandsement. Tilsetning av 50 % slag eller høyere gir en effektiv beskyttelse mot alkalireaksjoner. Det er påvist alkalireaksjoner i noen konstruksjoner med 35-40 % slag, men ifølge Polder et al. (2014) ikke i et skadelig omfang.

4.4 Konklusjoner

Flygeaske og slag er generelt effektive for å eliminere eller redusere omfang av alkalireaksjoner. Primær mekanisme er redusert alkalinitet, forårsaket av en kombinasjon av uttynning av Portlandsement kombinert med forbruk av CH og dannelse av C-S-H gel med økt bindingskapasitet av alkalier.

Også andre mekanismer enn redusert alkalinitet gjør seg gjeldende. Den tettere porestrukturen som oppnås ved bruk av slag og flygeaske medfører redusert ione-mobilitet som ifølge noen forskere har stor betydning.

Kjemisk sammensetning av flygeaske og slag har stor betydning. Tilsetningsmaterialer med lavt alkaliinnhold, høyt innhold av silisium og høyt innhold av aluminium er de mest effektive.

Det finnes flere eksempler på at silikastøv isolert sett gir god nok preventiv effekt, selv i relativt høye mengder (10 %). Det er imidlertid tydelige indikasjoner på at ternære blandinger hvor silikastøv inngår i betongen i tillegg til flygeaske eller slag gir en synergieffekt, ved at den samlede effekten er større enn summen av de enkelte delmaterialenes effekt.

Også øvrige forhold som eksempelvis finhet spiller inn, ved at flygeasker med økt finhetsgrad er noe mer effektive enn grove flygeasker.

Studier fra felt har vist at 20 % flygeaske i flere tilfeller ikke har gitt tilstrekkelig god sikkerhet. Det fordres generelt 25 % flygeaske eller høyere. Tilsvarende har feltstudier vist at slagmengder på minst 40 og i mange tilfeller 50 % er påkrevet for å gi god nok sikkerhet mot alkalireaksjoner. Nødvendige mengder er imidlertid avhengige av type tilslag, og i tillegg er alkaliinnholdet både i Portlandsement og tilsetningsmaterialer av stor betydning.

Per i dag er det knyttet betydelig grad av usikkerhet til resultater fra laboratoriestudier. Det pågår arbeide med å korrelere laboratoriestudier mot feltstudier som på sikt vil føre til sikrere resultater basert på laboratorieprøving.

5 Armeringskorrosjon

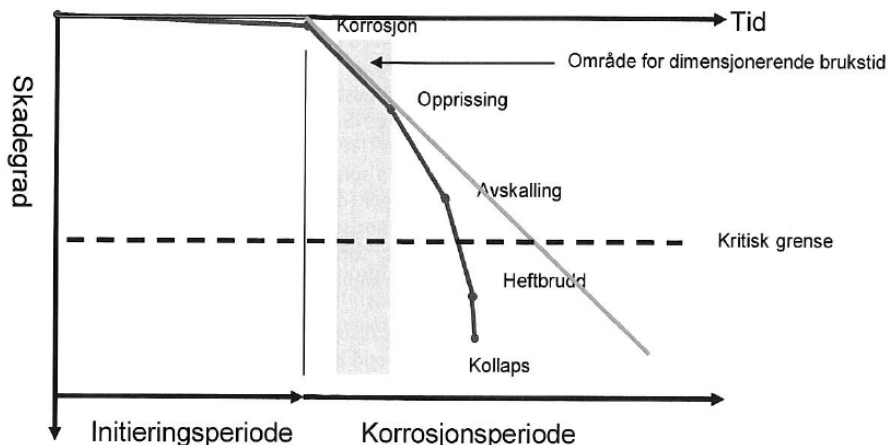
5.1 Innledning

Armeringsstål er i utgangspunktet godt beskyttet i betong pga. betongens alkalinitet. Normal pH i betongens porevæske er > 13 , og ved slike forhold vil det dannes en beskyttende oksidfilm på stålets overflate. Så lenge oksidfilmen er intakt vil det beskytte mot korrosjon. Oksidfilmen vil imidlertid brytes ned under en viss pH-verdi på grunn av karbonatisering. Oksidfilmen vil også brytes når kloridkonsentrasjonen overstiger en terskelverdi.

Vi skiller mellom følgende 3 faser iht. Tutti (1982):

- 1) Initieringsfasen, hvor stålet er intakt, men hvor inntrengning av klorider og/eller karbonatisering foregår.
- 2) Depassivering av stålet, enten av at man når en kritisk grenseverdi for klorider eller en kritisk grenseverdi for pH.
- 3) Propageringsfase, hvor det pågår korrosjon med dertil hørende oppsprekking av betong og reduksjon av stålets tverrsnitt

Propageringsfasen eller korrosjonsfasen kan igjen deles opp i skadegrader som vist i Figur 26.



Figur 26 Nedbrytning av armert betong utsatt for klorider som funksjon av tid. Fra NB 35 (2011) basert på fib-bulletin 34 (2006).

Det er vanlig å definere betongkonstruksjonens levetid eller brukstid lik initieringsperioden. I praksis vil ofte en betongkonstruksjons levetid gå utover initieringsfasen og en bit inn i propageringsfasen. Som et eksempel kan dette være til tidspunkt for opprissing. Det som er styrende vil i prinsipp være at konstruksjonen kan være i drift så lenge sikkerhet og øvrig funksjonsevne er ivaretatt. Levetiden kan også forlenges gjennom rehabiliteringstiltak, et eksempel på et slikt tiltak som ikke vil bli behandlet videre her er katodisk beskyttelse.

I de videre avsnitt vil effekt av flygeaske og slag på de ulike fasene bli behandlet.

5.2 Initieringsfasen

5.2.1 Karbonatisering

5.2.1.1 Innledning – generelt om karbonatisering

Karbonatisering av betong ved at CO₂ i luften¹¹ reagerer med Ca(OH)₂ og danner CaCO₃ + vann, og medfører en reduksjon i pH fra «normale» verdier som typisk ligger i området 13,5 ned mot ca. 9. Ved pH på ca. 11 vil stålets passivsjikt bli brutt ned og korrosjon vil kunne starte. Mengden Ca(OH)₂ er lavere for betonger med slagg og flygeaske av 2 årsaker: a) uttynningseffekten pga. mindre mengde Portlandsement og b) pozzolan reaksjon (gjelder primært for flygeaske) som forbruker Ca(OH)₂. Den reduserte mengden Ca(OH)₂ sammen med økt binding av alkalier i C-S-H fasen gir en resulterende lavere konsentrasjon av OH⁻ i porevæsken og tilsvarende lavere pH, se også Kapittel 4 Alkalireaksjoner. Bufferen for videre reduksjon av OH⁻ er dermed mindre for betonger med slagg og flygeaske enn for betonger med ren Portlandsement.

Karbonatisering av betong gir i tillegg til redusert pH også noen andre effekter, eksempelvis karbonatiseringssvinn. Karbonatisering av betonger med Portlandsement gir normalt redusert porøsitet i det karbonatiserte sjiktet, noe som igjen gir økt fasthet og redusert permeabilitet (Neville 1995). Den reduserte permeabiliteten pga. karbonatisering vil altså kunne gi en positiv effekt og føre til redusert hastighet på kloridinntrengning og også på det videre karbonatiseringsforløpet. For betonger med slaggsement vil karbonatisering føre til en grovere porestruktur. Dette har negativ effekt på frostmotstand, noe som vil omtales nærmere i Kapittel 6.

Det presiseres at karbonatisering slik det er presentert og diskutert videre i kapitlet er «luftkarbonatisering» som skjer fra overflaten. I tillegg til denne formen for «ordinær karbonatisering» vil betonger som er i kontakt med grunnvann og mot berg eller løsmasser bli utsatt for en form for karbonatisering som i internasjonal litteratur omtales som PCD (Popcorn Calcite Deposition). Inntrengning av vann med oppløst karbonat i kombinasjon med utlutning gir dekalsifisering av sementlimet og utfelling av PCD. Dette svekker sementpastaen, som etter hvert vil bestå av silikagel og «popcorn-formede» kalsittkrystaller. Dette fenomenet er kanskje spesielt relevant for sprøytebetong, og er blant annet beskrevet av Hagelia et al. (2001) og Hagelia (2011).

Som en enkel tilnærming vil karbonatiseringsdybden ved konstante fuktbetingelser øke proporsjonalt med kvadratroten av tiden:

$$D = K\sqrt{t} \quad (10)$$

Hvor

D er inntrengning i mm

t er tiden i år

K er karboniseringskoeffisient i mm/år^{0.5}.

Karbonatiseringen går altså raskest i starten og saktere med tiden. Karboniseringshastighet er sterkt avhengig av betongens fuktnivå, og går raskest ved RF mellom 50 og 70 % (Neville 1995).

Karboniseringshastighet er også sterkt avhengig av masseforhold, og for lave masseforhold i området 0,40 eller lavere er det kjent at i betong med Portlandsement vil karbonatiseringen gå svært langsomt. Som et eksempel på forskjeller i karboniseringshastighet vil en betong med masseforhold på 0,60 kunne ha en karboniseringsfront på ca. 15 mm etter 15 år, mens det for en betong med masseforhold på 0,45 vil ta ca. 100 år å nå samme karboniseringsdybde (Neville 1995).

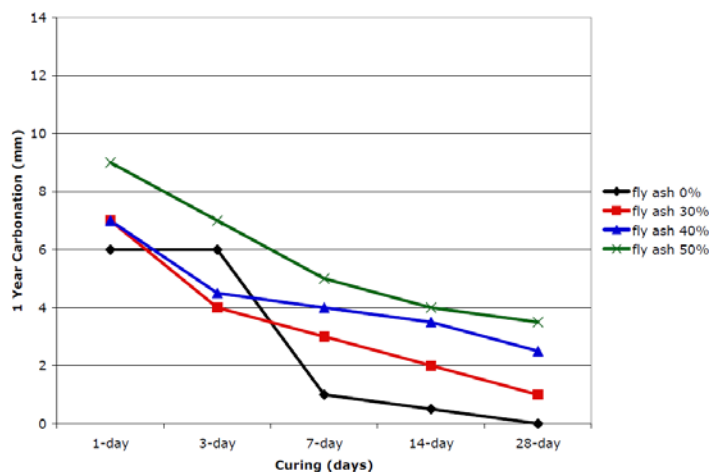
¹¹ Normal konsentrasjon av CO₂ i luften er ca. 0,03 volum %.

Karbonatiseringsforsøk gjennomføres ofte ved bruk av akselererte betingelser, hvor konsentrasjon av CO₂ varierer fra 1 % helt opp til 50 %. RF ligger ofte på ca. 60 % i akselerert forsøk. Det er av mange reist tvil om relevansen av slike sterkt akselererte testmetoder, spesielt for bindemidler med høyt innhold av pozzolaner eller slagg som har en langsom egenskapsutvikling. Sammenstilte data av Harrison et al. (2012) viser imidlertid at foreslått ny teknisk spesifikasjon prTS 12390-12 «*Testing hardened concrete - Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method*» er godt egnet til å rangere betonger med ulike bindemidler med tanke på karbonatiseringsmotstand. I henhold til foreslått metode gis betongene 28 døgns herding etterfulgt av 2 ukers tørking før de utsettes for karbonatisering. Selv om prøvingsmetoden er i stand til å rangere betonger med ulike bindemidler innbyrdes riktig, er det et noe mer uavklart spørsmål i hvilken grad data fra akselerert laboratorieprøving er egnet som input i levetidsmodeller for å predikere karbonatiseringshastighet i betonger utsatte for naturlig karbonatisering.

I tillegg til karbonatisering av Ca(OH)₂ kan også C-S-H fasen karbonatiseres (Neville 2005). Dette er spesielt aktuelt i tilfeller med høye andeler flygeaske eller slagg som resulterer i lav mengde Ca(OH)₂.

5.2.1.2 Effekter av flygeaske og slagg

Det finnes en del dokumenterte eksempler på at økende mengde flygeaske vil gi økende karbonatiseringshastighet, blant annet vist av Burden (2006) for mengde flygeaske opptil 50 masse %, se Figur 27. Bemerk også den store positive effekten av vannlagret herding.



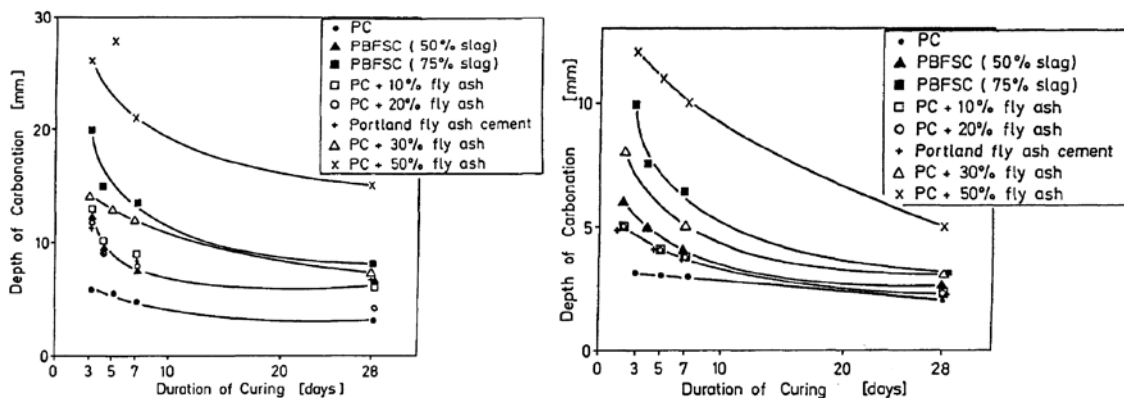
Figur 27 Effekt av mengde flygeaske og herdeperiode (vannlagring) på naturlig utendørs karbonatisering etter 1 år. Alle betonger har masseforhold 0,40, k-faktor for flygeaske = 1. Fra Burden (2006).

I en studie av Parrot (1992) ble betonger med henholdsvis ren Portlandsement, 30 % flygeaske og 50 % slagg testet. Masseforhold for betongene var 0,59. Etter 4 års naturlig karbonatisering ved utendørs lagring beskyttet for regn hadde betongene med slagg og flygeaske relativt høye karbonatiseringsdybder på henholdsvis 12 og 13 mm, mens det karbonatiserte sjiktet for referansebetongen var kun 4 mm.

I en studie av Atis (2013) ble det konkludert med at 50 % flygeaske ga tilsvarende eller lavere karbonatisering som betong med ren Portlandsement, mens 70 % flygeaske ga høyere karbonatisering. Karbonatiseringsforsøkene ble gjennomført under svært akselererte betingelser (5 % CO₂). Masseforholdene for betongene med 50 og 70 % flygeaske var imidlertid ca. 0,30 mot 0,55 for betong med ren Portlandsement (k-faktor = 1 for flygeaske), antagelig proporsjonert ut fra ønske om lik fasthet etter 28 døgn. Han fant også en generell lineær sammenheng mellom trykkfasthet og

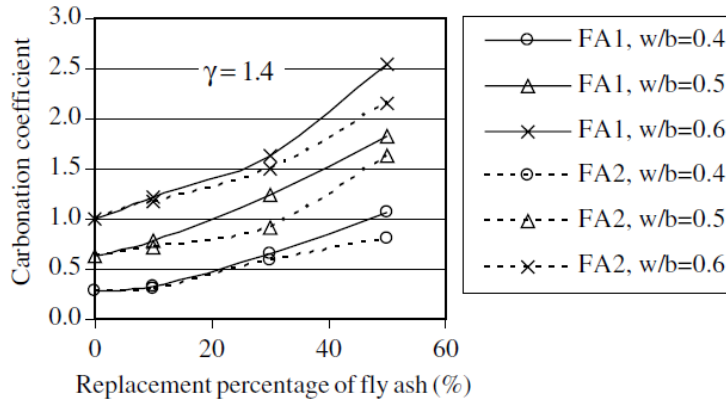
karbonatiseringsdybde ved at økende trykkfasthet (målt på tidspunkt for oppstart av karbonatiseringsforsøk) ga redusert karbonatiseringsdybde.

Bier (1987) har gjennomført forsøk med sementpastaer med ulike bindemidler, hvor karbonatisering som funksjon av forutgående herding i fuktige omgivelser ble studert. Resultater som viser karbonatiseringsdybde er vist i Figur 28 for akselerert karbonatisering ved 2 % CO₂-konsentrasjon (venstre) og karbonatisering ved naturlig CO₂-konsentrasjon (høyre). Figuren (høyre side) viser at for velherdet pasta utsatt for naturlig karbonatisering var det relativt små forskjeller i karbonatiseringsdybde, med unntak av pasta med 50 % flygeaske som skiller seg negativt ut fra de øvrige. Derimot var det relativt store forskjeller for pastaer med kort forutgående herdeperiode, hvor økende mengde flygeaske og slagg ga betydelig økning i karbonatiseringsdybde. Akselererte forsøk (venstre side av figur) ga omtrent samme rangering av bindemidlene som naturlig karbonatisering, men det er en tendens til at de relative forskjellene ble noe forsterket ved akselerert karbonatisering.



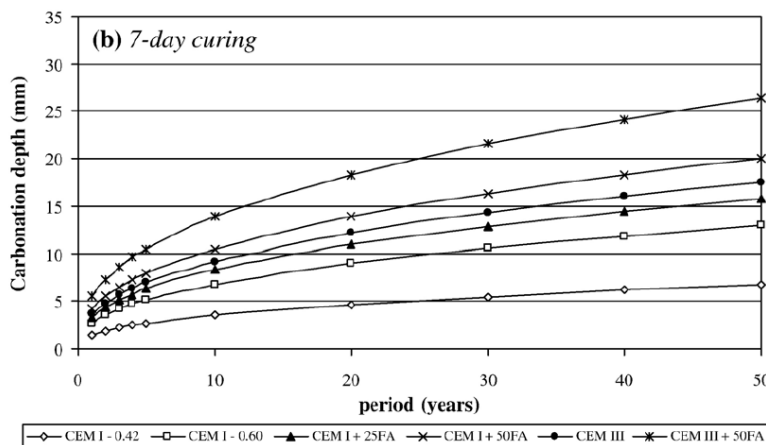
Figur 28 Karbonatiseringsdybde som funksjon av forutgående herdetid for ulike sementpastaer. Venstre: 28 dager karbonatisering ved 2 % CO₂ konsentrasjon ved 65 % RF og 20°C. Høyre: 6 måneders karbonatisering ved 0,03 % CO₂ konsentrasjon ved 65 % RF og 20°C. Masseforhold for alle betonger = 0,50. Fra Bier (1987).

Khungtongkeaw et al. (2006) har undersøkt karbonatisering av flygeaskebetonger ved ulike masseforhold og doseringsnivåer av flygeaske varierende fra 10-50 vekt % av totalt bindemiddel. Resultatene viser at karboniseringskoeffisienten generelt økte ved økende innblanding av flygeaske, se Figur 29. Ved masseforhold 0,4 var karboniseringskoeffisienten ca. 4 ganger høyere ved 50 % innblanding av flygeaske (FA 1) enn for betong uten flygeaske. Vi kan videre se av Figur 29 at karbonatiseringen for en betong med masseforhold på 0,4 og 50 % flygeaske omtrent tilsvarer karbonatiseringen for en betong med masseforhold på 0,6 uten tilsatt flygeaske. Studien har ellers vist at flygeasken med lavt kalsiuminnhold ga noe høyere karbonatisering enn flygeasken med høyt kalsiuminnhold. Resultatene presentert her er basert på naturlig karbonatisering i 24 måneder i varmt bymiljø skjermet for regn.



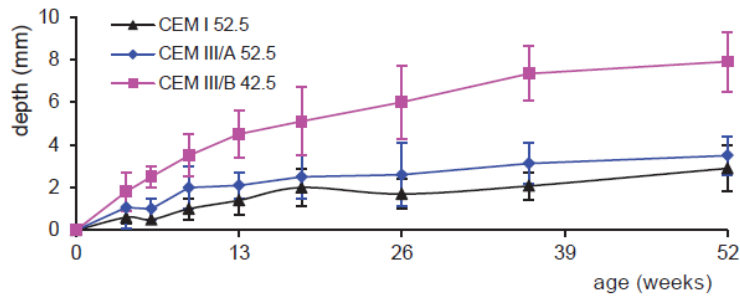
Figur 29 Karbonatiseringskoeffisient (K) som funksjon av mengde flygeaske, masseforhold og type flygeaske (k -faktor for flygeaske = 1). Karbonatisering i varmt bymiljø skjermet for regn (CO_2 konsentrasjon 0,063 %, middeltemperatur 29°C, middel RF 73 %). CaO-innhold henholdsvis 8 og 15 % for FA1 og FA2. Vannlagret herding fram til 28 døgn før oppstart av forsøk. Fra Khuntongkeaw et al. (2006).

Sisomphon & Franke (2007) har gjennomført akselererte karbonatiseringsforsøk (3 % CO_2 -konsentrasjon) for betonger med ulike bindemidler og etter ulike forutgående herdetider. De har teoretisk vist at diffusjonskoeffisient ved naturlig karbonatisering vil være 10 ganger lavere enn målt diffusjonskoeffisient ved akselerert prøving med 3 % CO_2 -konsentrasjon. Omregnet diffusjonskoeffisient er så blitt brukt videre for å estimere karbonatiseringsdybde fram til 50 år, se Figur 30. Variasjonsspekteret for referansebetongen, betonger med henholdsvis 25 og 50 % flygeaske og CEM III/B går fra 13 mm - 20 mm etter 50 år, mens for betong med CEM III/B og 50 % tilsatt flygeaske er beregnet dybde 27 mm etter 50 år. Masseforhold for alle betongene vist i Figur 30 var 0,60. Merk imidlertid at det ble benyttet k -faktor på 0,4 for tilsatt flygeaske. En k -faktor på 1,0 for flygeaske ville gitt masseforhold 0,42 i stedet for 0,60 for betongen med 50 % flygeaske. Betong med CEM I og masseforhold 0,42 gir karbonatiseringsdybde på 7 mm etter 50 år, mot 20 mm for betong med 50 % flygeaske ved samme masseforhold beregnet ved k -faktor = 1 for flygeaske. Det er altså en faktor på 3 i forskjell mellom betong med CEM I og betong med 50 % flygeaske i oppnådd karbonatiseringsdybde ved samme masseforhold hvis vi benytter k -faktor = 1,0 for flygeaske.



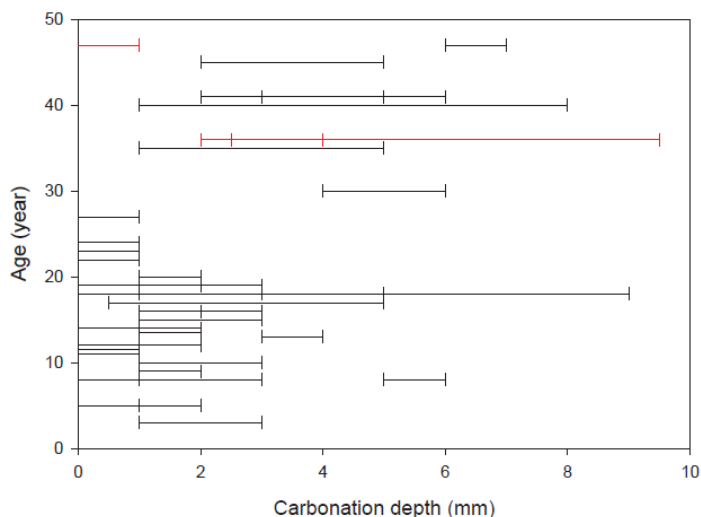
Figur 30 Estimerede karbonatiseringsdybder for betonger med ulike bindemidler. Masseforhold for betonger med slag og tilsatt flygeaske = 0,60. K -faktor for tilsatt flygeaske = 0,4. Fra Sisomphon & Franke (2007).

Polder et al (2014) har sammenstilt nederlandske erfaringer med karbonatisering av betonger med slagg. I laboratorieforsøk blir karboniseringsdybden gjennomgående større for slaggbetonger enn for tilsvarende betonger med CEM I, både ved naturlige og akselererte betingelser med økt CO₂-konsentrasjon. Et eksempel på karbonatisering i naturlig atmosfære fram til 1 år er vist i Figur 31. CEM III/B har her gitt høyere karboniseringsdybde enn CEM I og CEM III/A. Disse forsøkene viste altså relativt store forskjeller mellom CEM III/A og CEM III/B. Det er ikke oppgitt slaggmengder for disse sementene, men «typiske» verdier for henholdsvis CEM III/A og CEM III/B er henholdsvis ca. 50 % og ca. 70 % slagg.



Figur 31 Karbonatisering fram til 1 år for betonger med masseforhold 0,55. Eksponering ved 65% RF og 20°C ved naturlig CO₂-konsentrasjon på 0,04 %. Fra Polder et al (2014), basert på Visser & Heijnen (1998).

Nederlandske erfaringer fra marine konstruksjoner og senketunneler viser imidlertid at betydningen av karbonatisering i praksis er liten. Polder et al (2014) har sammenstilt målte karboniseringsdybder for nederlandske konstruksjoner med alder opptil 50 år, se Figur 32. Sammenstillingen viser at for majoriteten av konstruksjonene ligger karboniseringsdybden på 3 mm eller lavere, og det er ikke dokumentert høyere karboniseringsdybde enn 10 mm for noen av konstruksjonene. Dette skulle tilsi at den høye karboniseringshastigheten i ung alder bremses kraftig for virkelige konstruksjoner, i alle fall gjelder dette for betonger i marint klima/senketunneler med relativt høy gjennomsnittlig RF. Dette viser at karboniseringsinitiert armeringskorrosjon ikke er relevant som nedbrytningsmekanisme for marine konstruksjoner med tette betongtyper og stor overdekning. Karbonatisering er imidlertid relevant fordi den kan påvirke andre egenskaper hos betongen, deriblant frostbestandighet som vil bli behandlet i Kapittel 6.



Figur 32 Karbonatiseringsdybde i forhold til alder for marine konstruksjoner (merket svart) og senketunneler (merket rødt). Alle data fra nederlandske konstruksjoner støpt med CEM III/B. Fra Polder et al (2014).

Det er også kombinerte effekter av kloridinntrengning og karbonatisering. Den generelle effekten synes å være at tilstedeværelse av klorider gjør at karbonatiseringen reduseres noe. En mulig årsak til dette kan være at klorider i det ytre sjiktet vil gi en økning i fuktinnhold, som kan medføre lavere karboniseringshastighet ifølge Kuosa et al. (2012).

En viktig observasjon fra forsøkene til Parrot (1992), se tidligere omtale om karboniseringsdybder, er at den ytre sonen for betong med Portlandsement hadde lavere vannoppsug og redusert kapillærporøsitet sammenlignet med betongen lengre inn, altså at karbonatiseringen har hatt en «tettende» effekt på det ytre sjiktet. Dette er i tråd med kjente resultater fra litteraturen (Neville 1995). For betonger med flygeaske og slagg var imidlertid den rapporterte effekten den motsatte, altså økt vannoppsug og økt kapillærporøsitet i det ytterste karbonatiserte sjiktet.

Bier (1987) har vist at karbonatisering reduserer totalporøsiteten for alle typer bindemidler. Karbonatisering av pastaer med høye mengder flygeaske (50 %) eller slagg (75 %) vil imidlertid kunne gi en grovere porestruktur enn for pasta med ren Portlandsement, selv om totalporøsiteten altså reduseres.

I en studie med betonger med henholdsvis ren Portlandsement, 30 % flygeaske og 65 % slagg (Ngala & Page 1997) ble det funnet at karbonatisering reduserte totalporøsiteten for alle bindemidler. For Portlandsement økte kapillærporøsiteten marginalt, mens det var en markant økning i kapillærporøsitet for betonger med flygeaske og slagg. Resultatene for flygeaske var imidlertid ikke entydige, og varierte med ulike herdebetingelser. For slaggbetonger er det godt kjent fra litteraturen at karbonatisering vil medføre at porestrukturen vil bli grovere enn i ukarbonatisert betong, blant annet vist av Utgenannt (2004). Konsekvensen av grovere porestruktur i overflatesjiktet kan være flere. En av de kanskje viktigste konsekvensene er relatert til frost/salt-bestandighet, hvor grovere porestruktur vil gi økt mengde frysbar vann og dermed redusert frost/salt bestandighet. Se Kapittel 6 for nærmere omtale av dette. Det kan også ha en viss betydning for kloriddiffusjon, dette diskuteres i senere avsnitt.

5.2.2 Kloridinntrengning

5.2.2.1 Innledning

Transport av klorider og andre ioner kan skje på flere måter i betong. I tillegg til diffusjon, som forårsakes av forskjeller i ionekonsentrasjon, kan ioner også transporteres pga. kapillært sug, pga. trykkforskjeller eller pga. ionemigrasjon forårsaket av elektriske felt. I tillegg til transport av kloridioner spiller også evne til å binde klorider en vesentlig rolle. Dette vil bli diskutert under Kapittel 5.3 Depassivering av armering. I tillegg til rene materialeegenskaper, som er hovedfokus i denne rapporten, har eksponeringsbetingelser vesentlig betydning for inntrengning av klorider. Eksempelvis er effekten av høyde over hav stor, med avtagende kloridkonsentrasjoner for økende høyde over hav. I tillegg er det en stor lo/le-effekt med betydelig høyere kloridkonsentrasjoner på le enn på lo side (Kompen et al 1998). I det følgende vil effekter av flygeaske og slagg, også i kombinasjoner med silikastøv, bli behandlet. Erfaringer fra Statens vegvesen og større norske prosjekter vil bli behandlet separat i Kapittel 8.

5.2.2.2 Målemetoder og relevante parametere

Det er en rekke prøvingsmetoder i bruk for å karakterisere motstand mot kloridinntrengning, og resultatene man oppnår vil kunne variere i stor grad avhengig av metode. Det gis her en enkel oversikt over noen av de mest brukte metodene. Mer detaljerte oversikter gis blant annet i CHLORTEST (2005) og av Stanish et al. (1997).

NT BUILD 443 Neddykkingstest

Prøvelegemer neddykkes i en sterkt konsentrert løsning av NaCl (16,5 %) i minst 35 døgn. Metoden gir kloridprofil samt diffusjonskoeffisient (D) og overflatekonsentrasjon (Cs) ved kurvetilpasning. Dette er en metode som har vært mye brukt i Norge, og også internasjonalt. Angitt repeterbarhet for metoden er 20 % og 18 % (variasjonskoeffisienter) for henholdsvis D og C_s, mens reproduserbarhet er henholdsvis 28 og 22 % for de samme parametere (CHLORTEST 2005).

NS-EN 13396

I prinsipp er metoden ikke så ulikt NT Build 443, men neddykkingen skjer i en mye svakere kloridløsning (3 % NaCl er referanseløsning). Kloridkonsentrasjonen kan imidlertid forhøyes. Nasjonalt tillegg til NS-EN 206 angir bruk av denne metoden med forhøyet NaCl konsentrasjon til 6 % ved dokumentasjon av nye sementer. Metoden angir bestemmelse av kloridkonsentrasjon på 3 ulike dybder, men det beregnes ikke diffusjonskoeffisient. Angitt repeterbarhet og reproduserbarhet for metoden er henholdsvis 14 og 36 % ifølge CHLORTEST (2005).

NT-BUILD 492 (Rapid chloride migration test, RCM)

Denne testen benytter et eksternt elektrisk felt for å akselerere kloridinntrengningen. Spenningen (og også tidsintervallet) tilpasses betongkvalitet basert på initial resistivitetsmåling. Testen gjennomføres normalt på 24 timer, men forlenges ved høyere betongkvaliteter. Kloridinntrengningen måles ved splitting av kjerner og bruk av sølvnitrat. Basert på inntrengningsdybde beregnes det en migrasjonskoeffisient D som er sammenlignbar med verdier fra neddykkingstester av typen NT Build 443 som beskrevet over. Repeterbarhet og reproduserbarhet for metoden er oppgitt til henholdsvis 15 % og 24 % (CHLORTEST 2005).

Resistivitetsmålinger

Resistivitet gir et indirekte mål på transportegenskapene, fordi resistivitet i stor grad er knyttet opp mot porestruktur, men også mot ionestyrke i poreløsning. Det kan teoretisk vises at resistivitet er omvendt proporsjonal mot diffusivitet under gitte forutsetninger. I praksis blir imidlertid resistiviteten påvirket i stor grad av alle ioner, ikke minst hydroksid-ioner. En sement med høy alkalimengde vil gi lavere resistivitet pga. høy andel alkali-hydroksider, mens pozzolan tilsetning til gi høyere resistivitet pga. binding av alkali-hydroksider. Det er derfor nødvendig å kalibrere resistivitet mot kloriddiffusivitet avhengig av type bindemiddel (CHLORTEST 2005). Resistivitet vil også ha stor betydning for korrosjonshastighet ved pågående korrosjon, dette vil bli diskutert i senere avsnitt.

ASTM C1202 (AASHTO T277)

Denne testmetoden er svært mye brukt internasjonalt, ikke minst i Nord-Amerika. Den omtales ofte som «Rapid Chloride Permeability Test» (RCPT). Testen ligner prinsipielt på den tidligere omtalte NT BUILD 492. En av forskjellene er at det brukes høyere spenning, en annen vesentlig forskjell er at testmetoden måler total passering av ladning (coulombs) og bevegelse av alle typer ioner og ikke bare kloridioner. Det beregnes ikke noe migrasjonskoeffisient som for NT BUILD 492, men det gis en «gradering av motstandsevne» avhengig av passert ladning som vist i Tabell 10. Blant ankepunktene mot metoden er nettopp det at ikke bare bevegelse av kloridioner, men alle typer ioner blir målt. I tillegg gir den høye spenningen oppheting av prøvestykkene, som vil kunne forsterke effekten ved måling av spesielt de dårligste betongkvalitetene ifølge Stanish et al. (1997). Shi et al. (1998) hevder at tester av denne typen ikke gir relevant informasjon om diffusivitet fordi det ikke korrigeres for den effekten ionekonsentrasjon i poreløsningen har. Bindemidler med slagg, flygeaske og silikastøv vil pga. lavere ionekonsentrasjon gi en betydelig reduksjon i poreløsningens konduktivitet. Spesielt silikastøv eller kombinasjoner av silikastøv med andre tilsetningsmaterialer har stor effekt, og kan redusere poreløsningens konduktivitet med mer enn 90 % i forhold til ren Portlandsement. Dette innebærer at effekten som måles i RCPT-testen i større grad kan være influert av ionekonsentrasjon enn av reell diffusivitet ved innblanding av tilsetningsmaterialer som slagg, flygeaske og silikastøv ifølge Shi et al. (1998).

Tabell 10 Gradering av motstandsevne mot kloridinntrengning etter ASTM C1202.

Charge Passed (coulombs)	Chloride Ion Penetrability
> 4,000	High
2,000-4,000	Moderate
1,000-2,000	Low
100-1,000	Very Low
< 100	Negligible

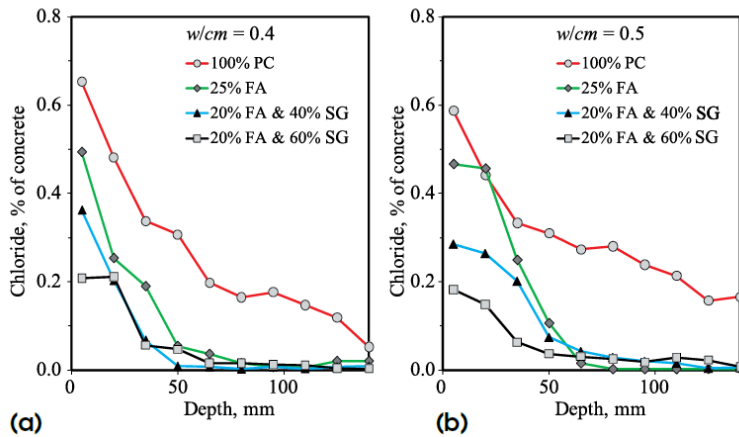
I Norge har tradisjonelt neddykket kloriddiffusjon vært mye brukt, mens også RCM (NT BUILD 492) har i den senere tid blitt mer og mer vanlig å bruke. I tillegg er resistivitetsmålinger benyttet i ganske stor utstrekning, spesielt har Statens vegvesen i betydelig grad benyttet seg av denne enkle metodikken som kan gi svært verdifull informasjon. Som tidligere nevnt er resistivitet interessant både fordi egenskapen er korrelert mot diffusjonsegenskaper, men også fordi den vil ha betydning for korrosjonshastighet. Det finnes en rekke andre metoder i bruk rundt i verden, mange av disse er varianter av de metodene som her er omtalt. I tillegg til akselererte metoder som omtalt her benyttes naturligvis naturlig langtidseksposering for klorider. Dette utføres spesielt ved prøving i marint miljø for å karakterisere betongen og for å kunne kalibrere de akselererte prøvingsmetodene mot virkelig feltoppførsel.

5.2.2.3 Kloridinntrengning – effekter av flygeaske og slagg

Flygeaske og slagg har positiv effekt på kloridinntrengning i betong på lang sikt, noe som er blitt vist i en rekke studier. Når det gjelder slaggbetonger er de nederlandske erfaringene av spesielt stor interesse. Man har i Nederland bygget marine konstruksjoner med slaggbetonger siden 1920-tallet. Undersøkelser som er gjort viser at det knapt forekommer korrosjon på konstruksjoner med slaggsement, noe som blant annet skyldes at slaggbetonger motstår kloridinntrengning langt bedre enn betonger med Portlandsement. De nederlandske erfaringene mht. korrosjonsmotstand er oppsummert av Polder (2012), og mer generelle bestandighetsmessige aspekter ved bruk av slaggbetong er oppsummert av Polder et al. (2014) og Bijen (1998).

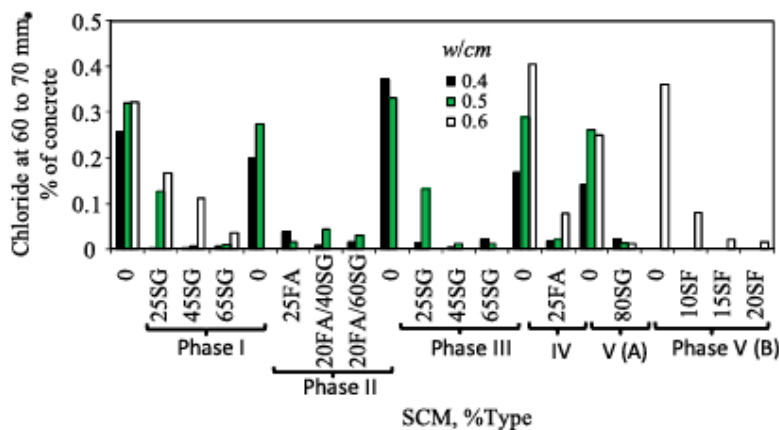
Når det gjelder flygeaske finner vi noen av de mest interessante erfaringene i Nord-Amerika, hvor vi også finner gode eksempler på dokumentasjon av slaggbetonger og kombinasjoner av slagg og flygeaske. Eksempelvis finner vi gode eksempler på dette fra testfeltet Treat Island i Maine, USA, rapportert av Thomas et al. (2011). I Figur 33 vises kloridprofiler for betonger med henholdsvis ren

Portlandsement, 25 % flygeaske og kombinasjoner av flygeaske og slag, for betonger som har vært eksponert i tidevannssonen i 25 år. Som det fremgår av Figur 33 er effekten av å tilsette 25 % flygeaske langt større enn å redusere masseforholdet fra 0,50 til 0,40.



Figur 33 Kloridprofiler etter 25 års marin eksponering i tidevannssonen. a) $w/c=0,4$ og b) $w/c=0,5$. K-faktor = 1 for tilsetningsmaterialer. Fra Thomas et al (2011).

I Figur 34 er det vist kloridmengde i % av betongvekt målt i dybden 60-70 mm fra eksponert overflate etter 25 års eksponering. Vi finner igjen data fra kloridprofilene i Figur 33 som «Phase II» i Figur 34. Vi ser at selv ved masseforhold 0,40 har alle betongene uten tilsetning av slag, flygeaske eller silikastøv kloridkonsentrasjoner betydelig høyere enn 0,1 %, altså såpass høy kloridkonsentrasjon at vi kan forvente at korrosjon har startet. Rent generelt kan vi lese ut av dataene at tilsetning av flygeaske eller slag er langt mer effektivt enn reduksjon av masseforholdet. For slag fordres det generelt høyere tilsetninger for å oppnå samme effekt som for flygeaske. Dette gjelder spesielt ved masseforhold 0,50 eller høyere.



Figur 34 Kloridinnhold (i % av betongvekt) i dybde 60-70 mm etter 25 års marin eksponering i tidevannssone. K-faktor = 1,0 for alle tilsetningsmaterialer. Fra Thomas et al. (2011).

En stor britisk studie (Thomas & Matthews 2004) har tatt for seg innblanding av flygeaske i intervallet 15-50 % av totalt bindemiddel for betonger i 3 ulike fasthetsklasser. Beregnede kloriddiffusjonskoeffisienter fram til 10 års marin eksponering er vist i Tabell 11. Det bemerkes at betongene innenfor

hver fasthetsklasse er proporsjonert på basis av lik fasthet etter 28 døgn. For å oppnå dette er det benyttet synkende masseforhold ved økende innblandingsgrad av flygeaske. Som et eksempel ble masseforholdet for C45 betongen redusert fra 0,49 ved null innblanding av flygeaske til 0,32 ved 50 % innblandingsgrad. Det ble benyttet k-faktor på 1,0 for flygeasken. Generelt viser resultatene at økende innblanding av flygeaske har gitt økt kloridmotstand. Effekten av flygeaske er også økende ved økende alder. Effekten av å øke flygeaskemengde fra 30 til 50 % var imidlertid relativt liten, og for betong i fasthetsklasse C45 var det i praksis ingen forskjell mellom disse to nivåene av flygeaske. Et annet forhold er at kritisk kloridnivå kan reduseres ved økende mengde flygeaske, noe som blir diskutert i senere avsnitt, slik at nettoeffekten av å øke mengde flygeaske utover et gitt nivå kan bli negativ. Det var flygeasker fra 3 ulike kilder med i denne studien, med CaO-innhold varierende fra 1,7- 6,1 %. Type flygeaske hadde ingen signifikant effekt på kloridinntrengning.

Tabell 11 Diffusjonskoeffisienter beregnet fra kloridprofiler etter 1 til 10 års eksponering i marint miljø. Merk at proporsjonering innenfor hver fasthetsklasse er gjort på basis av lik trykkfasthet ved 28 døgn, noe som innebærer at masseforholdet er redusert ved økende innblandingsgrad av flygeaske. Fra Thomas & Matthews (2004).

Strength grade	Pfa (% P1)	Diffusion coefficient (10^{-13} m ² /s)			
		1 year	2 years	4 years	10 years
C25	0	–	153	162	*
	15	–	33.6	23.9	9.94
	30	–	33.4	16.7	5.52
	50	–	24.6	24.8	4.22
C35	0	156	92.9	56.6	*
	15	51.0	29.2	14.8	9.05
	30	53.5	16.0	10.9	4.49
	50	38.7	19.8	9.41	3.45
C45	0	–	44.7	63.9	*
	15	–	18.3	13.0	5.42
	30	–	14.4	5.84	2.01
	50	–	14.5	8.47	2.00

* Diffusion coefficients were not calculated (profiles dominated by 2-D ingress).

Stanish & Thomas (2003) har vist at 25 % flygeaske ga diffusjonskoeffisient (målt ved neddykket diffusjonsforsøk i 4 år fra 90 døgn alder) på $0,58 \times 10^{-12}$, mot $3,32 \times 10^{-12}$ for referansebetongen. Betong med 56 % flygeaske ga kun en marginalt lavere diffusjonskoeffisient enn 25 % flygeaske: $0,51 \times 10^{-12}$. Masseforhold var 0,50 for alle betongene. Forfatterne har basert på diffusjonsforsøk av varierende lengde etablert aldringsfaktorer for de 3 betongene som vist i Tabell 12, dette som grunnlag for levetidsberegninger hvor man tar hensyn til diffusjonskoeffisientens tidsavhengighet.

Tabell 12 Diffusjonskoeffisienter ved referansealder 28 døgn (D_{28}) og beregnede aldringsfaktorer (m) for ulike betonger. Alle betonger har masseforhold 0,50 og k-faktor for flygeaske = 1. Fra Stanish & Thomas (2003).

Fitted coefficients	Fitted parameters	
	m	D_{28} (m ² /s)
Control	0.32	9.72×10^{-12}
25% Fly ash	0.66	4.07×10^{-12}
56% Fly ash	0.79	5.01×10^{-12}

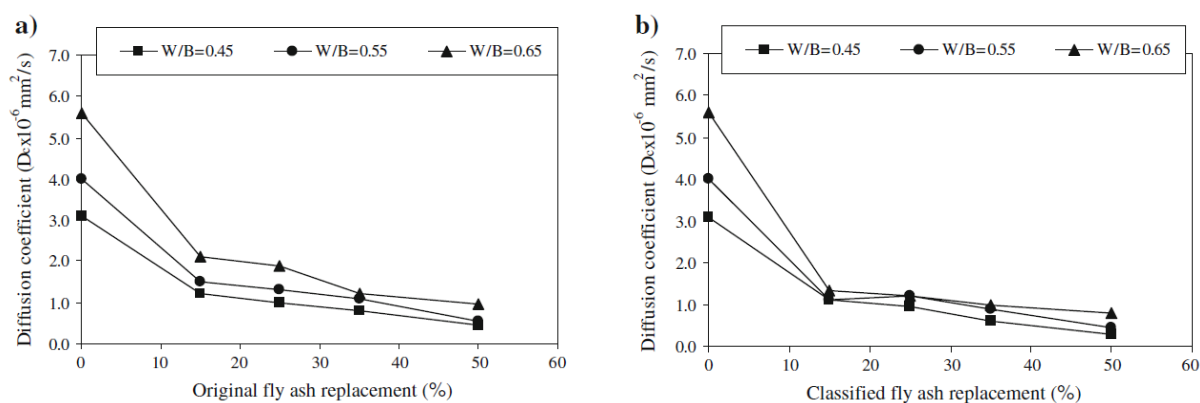
Det er kjent at slag til en viss grad, og flygeaske i høyere grad, har liten effekt eller negativ effekt på motstand mot kloridinntrengning i tidlig alder. Data fra Thomas & Bamforth (1999) viser at selv ved 6

måneders alder var det relativt små forskjeller mellom betong med ren Portlandsement og betonger med 30 % flygeaske eller 70 % slagg. Men mens betong med Portlandsement i relativt liten grad ble tettere med økende alder etter 6 måneder, var diffusjonskoeffisientene for betonger med slagg/flygeaske omlag én størrelsesorden lavere etter 8 år, se Tabell 13.

Tabell 13 Beregnede diffusjonskoeffisienter og overflatekonsentrasjoner for betonger med ren Portlandsement ($m = 0,66$), 30 % flygeaske ($m=0,54$) og 70 % slagg ($m=0,48$). k -faktor = 1,0 for slagg og flygeaske. Masseforholdene er variable fordi betongene ble designet for 28 døgns trykkfasthet på 40 MPa. Felteksponerte betongblokker fra Folkestone, England. Fra Thomas & Bamforth (1999).

Concrete mix	Age	Best-fit values		
		$D_a (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	C_s (percent concrete)	
PC Control	6 months	9.5	0.35	
	1 year	3.0	0.69	
	2 years	7.6	0.38	
	3 years	5.6	0.42	
	6 years	10	0.28	
	8 years	8.7	0.31	
	P/PFA	6 months	4.3	0.42
		1 year	2.0	0.53
2 years		1.9	0.45	
3 years		1.1	0.54	
6 years		0.81	0.48	
8 years		0.59	0.56	
P/GBS		6 months	7.5	0.58
		1 year	2.9	0.68
	2 years	1.9	0.46	
	3 years	0.99	0.54	
	6 years	1.0	0.46	
	8 years	0.63	0.48	

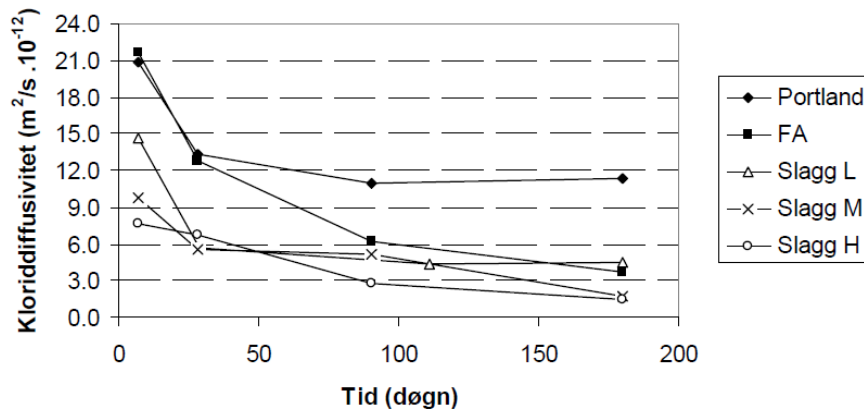
Chalee & Jaturapitakkul (2009) har undersøkt effekten av mengde flygeaske og masseforhold på kloridinntrengning etter 5 års eksponering i tidevannsonen i den Thailandske gulf. De har også undersøkt hvordan varierende finhet på flygeaske slår ut. Det er en tydelig effekt at økende mengde flygeaske gir redusert diffusjonskoeffisient, se resultater i Figur 35. Den prosesserte finere flygeasken med median partikkelstørrelse på 10 μm var noe mer effektiv enn den originale flygeasken med median partikkelstørrelse på 31 μm . Basert på disse resultatene kan det synes som om effekten av flygeaskens finhet er størst ved høyest masseforhold.



Figur 35 Effekt av flygeaske og maseforhold på diffusjonskoeffisient. 5 års eksponering i marint miljø. Original flygeaske (venstre) og prosessert flygeaske med høyere finhet (høyre). Fra Chalee & Jaturapitakkul (2009). (Merk at enhet for D er i mm^2/s , mens det er mer normalt å benytte m^2/s).

Liu (2006) har i sitt doktorgradsarbeid ved NTNU undersøkt kloriddiffusivitet for betonger med ulike mengder slagg fra 34 til 70 %, og sammenlignet egenskapene mot betonger med Norcem Standard FA

sement og Anleggsement. Se Figur 36 for en sammenstilling av kloriddiffusivitet som funksjon av tid for betonger med masseforhold 0,45 uten tilsatt silikastøv. Legg merke til at slaggbetongene har hatt meget rask egenskapsutvikling, hvor det faktisk var betongen med lavest slaggandel som «hang noe etter» ved 7 døgn. Betong med Anleggsement flatet ut etter 90 døgn, mens de øvrige betongene fortsatte å bli tettere med tiden. Etter 180 døgn var betongene med 53 % og 70 % slagg omtrent likeverdige, mens betongene med 34 % slagg eller 17 % flygeaske hadde ca. 2-3 ganger høyere kloriddiffusivitet enn de beste slaggbetongene. Det var en faktor på 8 i diffusjonskoeffisient mellom betong med ren Portlandsement og betong med 70 % slagg etter 28 døgn.



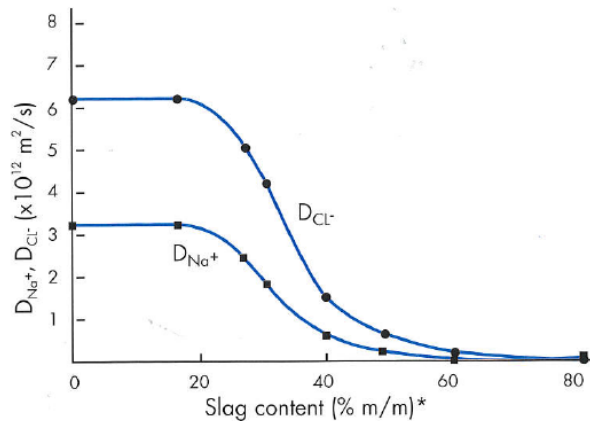
Figur 36 Kloriddiffusivitet målt ved RCM (NT Build 492). Alle betonger med masseforhold 0,45. Alle betonger uten silikastøv. Sementtyper: Portland: Norcem Anleggsement. FA: Norcem Standard FA med 18 % Flygeaske. Slagg L: Embra Miljøsement med 34 % slagg. Slagg M: ENCI med 53 % slagg. Slagg H: ENCI med 70 % slagg. Fra Årskog et al. (2007), data er i stor grad basert på Liu (2006).

Liu (2006) har dokumentert utviklingen av diffusjonskoeffisienter også ved lave temperaturer, og vist at betonger med slaggsement og Portlandsement er mindre følsomme for lav herdetemperatur enn betonger med flygeaske. Flygeaskebetongen hadde 5 ganger høyere kloriddiffusivitet ved 5°C enn ved 20°C, mens tilsvarende forskjell for betong med 70 % slagg var kun en faktor på 2. Forskjellen for ren Portlandsement var enda lavere. De praktiske konsekvensene av langsom egenskapsutvikling kan være ganske store ved utstøpning av f.eks. slanke brusøyler i den kalde årstid, hvor kloridinntrengningen kan gå relativt raskt første sesongen. I tillegg kan motstanden mot frostnedbrytning bli betydelig redusert i tidlig fase ved sen egenskapsutvikling. Et aktuelt spørsmål er i hvilken grad en betong som har hatt ugunstige herdebetingelser i form av lav temperatur en hel vintersesong er i stand til å «hente seg inn» de etterfølgende sesonger.

Bilodeau et al. (1994) studerte effekten av flygeaske fra ulike kilder ved bruk av AASHTO T277/ASTM C1202 «rapid chloride ion permeability test». 8 ulike flygeasker (hvorav to av type C, dvs. med høyt kalsiuminnhold) ble testet i kombinasjon med 2 Portlandsementer. Mengde flygeaske var 58 vekt % og masseforholdet var 0,33. Det var relativt store forskjeller i motstand mot kloridinntrengning etter 28 og 91 døgn, men etter 1 års herding var forskjellene i praksis eliminert med verdier i intervallet 119-179 coulombs.

Bijen (1998) har sammenstilt resultater fra ulike studier hvor det er gjort sammenligninger mellom Portlandsement og sementer med slagginnehald i området fra 50 % til 80 %. Diffusjonskoeffisient for slaggbetongene basert på forsøk med såkalte diffusjonscellemetoder (tilsvarende RCM iht. NT Build 492) er 10-120 ganger lavere enn diffusjonskoeffisienter for tilsvarende betonger med ren Portlandsement. Bijen (1998) poengterer viktigheten av tilstrekkelig mengde slagg for å gi noen effekt mht. redusert kloriddiffusjon. En sammenheng mellom mengde slagg og diffusjonskoeffisient er vist i Figur 37, det illustreres her at slaggmengder < 25 % knapt har noen effekt, mens ved slaggmengder > 40 % er effekten svært stor. Det skal altså en viss mengde slagg til for å gi en tilstrekkelig forfining av

poresystemet til å gi signifikant effekt på diffusjonsegenskapene. Effekten er imidlertid også avhengig av masseforhold, som vist av Thomas et al (2011), ved at det det fordres høyere slagmengder ved høyere masseforhold for å oppnå «full effekt». McGrath & Hooton (1997) har på den annen side vist at selv en slagmengde på bare 25 % av totalt bindemiddel kan ha en betydelig effekt og vil kunne redusere kloriddiffusiviteten med en faktor på over 3 i forhold til Portlandsement. Også resultater fra Thomas et al. (2011) viser at selv en så lav slagmengde som 25 % har betydelig effekt.



Figur 37 Effekt av mengde slag på diffusjon av klorid- og natriumioner. Sementpasta med masseforhold 0,60. 28 døgns herding ved 21°C. Figur fra Bijen (1998), originalreferanse Brodersen (1982).

Resultatene fra Figur 37 viser at det meste av effekten er «tatt ut» ved en slagmengde på 50 %, og at videre økning gir en mer begrenset effekt på kloriddiffusivitet. Også resultatene fra Thomas et al. (2011) peker i samme retning, ved at det meste av effekten er tatt ut ved 45 % slagmengde og at videre økning til 65 % gir en relativt begrenset tilleggseffekt.

For flygeaske er også mye av effekten tatt ut allerede ved relativt lave tilsetningsnivåer, blant annet vist av Bouzoubaâ et al. (2007), som har dokumentert at det er relativt små forskjeller på diffusjonsegenskaper ved flygeasketilsetninger i intervallet 30-50 % etter 90 døgns forutgående herding. Forskjellene vil imidlertid i større grad kunne gjøre seg gjeldende etter flere års herding. Gjörv (2012) har oppsummert forsøk som viser at for flygeaske er det meste av effekten tatt ut allerede ved ca. 20 % av totalt bindemiddel. Dette illustreres av Tabell 14, som viser at diffusjonskoeffisienter i praksis er like for betonger med henholdsvis 20, 40 og 60 % flygeaske etter 3 års herding.

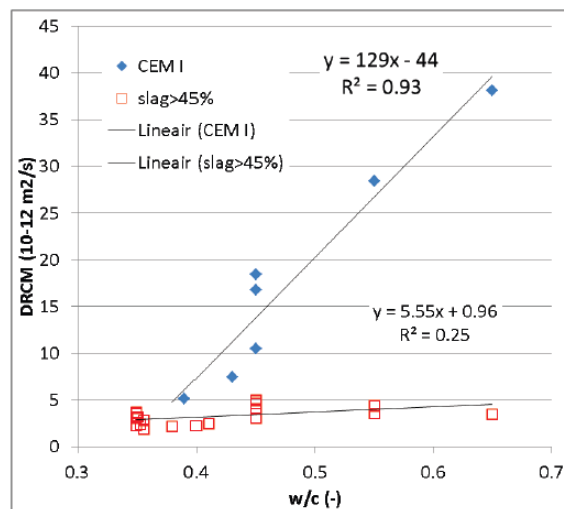
Tabell 14 Diffusjonskoeffisienter og standardavvik fra forsøk med neddykket kloriddiffusjon. Alle betonger med masseforhold 0,39. 3 års forutgående feltherding før diffusjonsforsøk. ($\times 10^{-12} m^2/s$). Fra Gjörv (2012), originalreferanse Årskog & Gjörv (2009).

	20% FA	40% FA	60% FA
Chloride diffusivity	0.48	0.44	0.50
	0.16	0.05	0.13

Som tidligere omtalt under avsnitt om karbonatisering, tenderer både flygeaske- og slagbetonger å få økt kapillærporøsitet ved karbonatisering, noe som kan gi økt kloridinntrengning (Ngala & Page 1997, Kuosa et al 2012). Diffusjonskoeffisient kan i det karbonatiserte sjiktet bli økt med en faktor på 2-4 relativt til ukarbonatisert betong, men selv det karbonatiserte sjiktet av betonger med 20 % flygeaske eller 33 % slag er betydelig tettere enn ukarbonatisert betong med Portlandsement i følge Kuosa et al. (2012). Ngala & Page (1997) har gjennom studier på sementpasta vist at karbonatisering av blandingssementer kan øke kloriddiffusiviteten med inntil to størrelsesordener, mens diffusivitet av

oksygen kan øke med ca. én størrelsesorden. Karbonatisering medfører også at diffusiviteten øker for bindemidler med Portlandsement, men effekten er mindre enn for blandingssementer. En annen effekt av karbonatisering er at kloridbindingsevnen reduseres, noe som øker konsentrasjonen av frie klorider i det ytre sjiktet og dermed øker drivkraften for kloriddiffusjon (Kuosa et al. 2012).

Polder et al. (2014) har vist at betonger med slaggsement er langt mindre følsomme for variasjoner i masseforhold enn betonger med ren Portlandsement i forhold til kloriddiffusjon, se Figur 38. Slaggbetonger viser altså svært gode egenskaper over et stort spekter av masseforhold. Dette er meget interessant med tanke på å redusere effekten av utilsiktede variasjoner under produksjon av betong. Det gjør det også mindre nødvendig å gå langt ned i masseforhold for å oppnå tilstrekkelig tette betonger, noe som gjør det lettere å oppnå god støpelighet. Flygeaske har noen av de samme egenskapene, og reduserer også følsomheten for masseforhold, men ikke i like stor grad som for slaggbetonger (Polder 2012).



Figur 38 Diffusjonskoeffisienter fra RCM avhengig av type sement og masseforhold. Prøvsalder for betonger med CEM I varierer fra 28-56 døgn, for slaggbetonger 28 døgn. Fra Polder et al (2014).

5.2.2.4 Ternære blandinger som inkluderer silikastøv

Det er velkjent at silikastøv forfiner poresystemet og gir redusert kloriddiffusivitet, noe det er gitt flere eksempler på i en STAR om silikastøv i betong (Sellevoid et al. 1987). Silikastøv er en svært rask og effektiv pozzolan, og gir effekt allerede ved veldig tidlig alder. Ved «normale» doseringsnivåer silikastøv, dvs. under 7-8 % av sementvekt, vil man kunne oppnå en reduksjon i kloriddiffusivitet på opptil én størrelsesorden i forhold til ren Portlandsement (Thomas et al. 1999), men silikastøv vil gi liten tilleggseffekt på lang sikt (dvs. utover 1 måned). Du Preez & Alexander (2004) har imidlertid vist at bruk av 30 % flygeaske, og i enda større grad 70 % slagg, kan være mer effektivt for å redusere kloriddiffusiviteten enn 7 % silikastøv allerede ved en alder på 28 døgn. Ved senere aldre er forskjellene enda større i favør av slagg og flygeaske. Det finnes imidlertid en rekke studier som viser at det å kombinere silikastøv med flygeaske eller slagg er spesielt gunstig, noe vi vil vise eksempler på i de nærmeste avsnittene.

Effekten av ternære blandinger av silikastøv og slagg er vist i en studie rapportert av Hooton et al. (2008), og tidligere av Bleszynski et al. (2002). Studien tar for seg ulike aspekter av bestandighet som frost, alkalireaksjoner og kloridinntrengning, inkludert kombinerte effekter av de nevnte mekanismer. Resultater for alkalireaksjoner er vist i Kapittel 6. Ved tolkningen av disse resultatene skal vi derfor være obs på kombinasjonseffekter, f.eks. at pågående alkalireaksjoner kan gi negativ effekt på

diffusjonskoeffisient. Spesielt gjelder dette for kontrollblandingen, hvor det er påvist alkalireaksjon etter 6 år, mens de øvrige binære og ternære blandingene i all hovedsak har eliminert alkalireaksjoner.

Vi ser av Tabell 15 at alle binære og ternære blandinger i større eller mindre grad har vært effektive, hvor det ble oppnådd signifikant tettere betonger ved begge aldre (2 og 6 år). Den ternære miksen med 5,2 % silikastøv og 35 % slagg ga lavest diffusjonskoeffisient. Forskjellene mellom de ulike ternære blandingene var imidlertid små.

Tabell 15 Kloriddiffusjonskoeffisienter beregnet fra kloridprofiler fra feltbetong (betongdekke eksponert for veisaltning). Data for 2 og 6 år. Binære og ternære betonger med slagg og silikastøv, alle betonger med masseforhold 0,42 ($k=1,0$ for silikastøv og slagg). Fra Hooton et al. (2008).

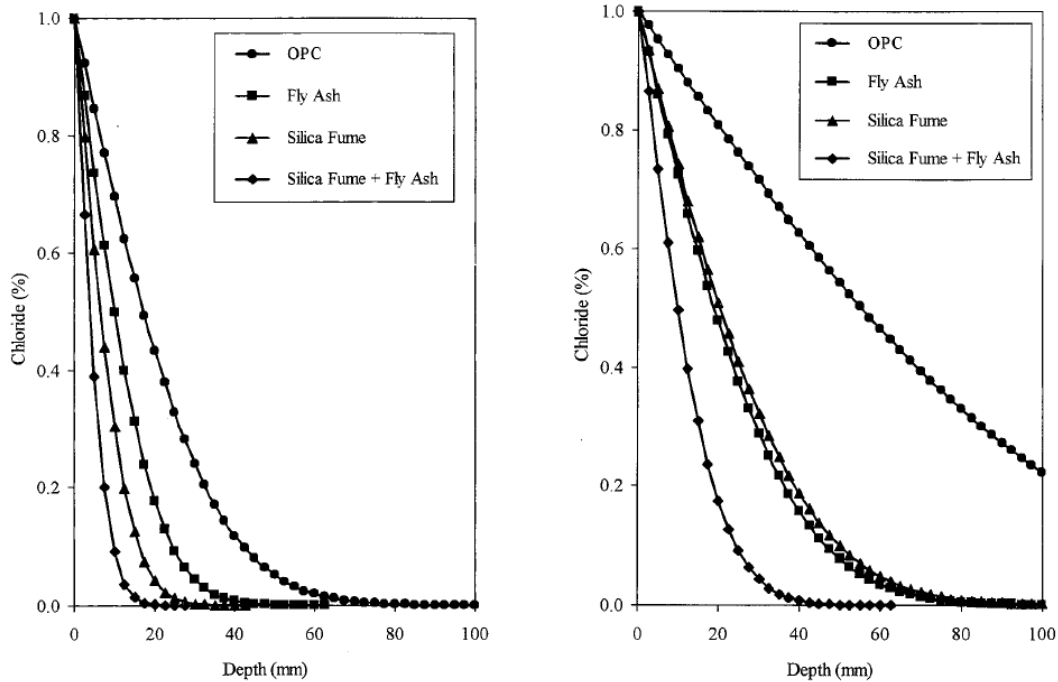
Age	Coefficients and Statistics	Mixtures (Silica Fume/Slag)						
		0/0	8/0	0/35	0/50	4/25	6/25	5.2/35
2-Years Field Exposure	D_A ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	1.1	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
	C_s (% mass)	0.23	0.38	0.47	0.61	0.33	0.54	0.53
	r^2	0.845	0.999	0.968	0.970	0.977	0.996	0.997
6-Years Field Exposure	D_A ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	1.38	0.24	0.17	0.25	0.16	0.14	0.12
	C_s (% mass)	0.23	0.44	0.45	0.43	0.40	0.47	0.47
	r^2	0.955	0.95	0.98	0.965	0.98	0.98	0.985
% decrease wrt control	@ 2-Years	0%	73%	82%	82%	73%	82%	82%
	@ 6-Years	0%	83%	88%	82%	88%	90%	93%

Thomas et al. (1999) har også vist at det å kombinere flygeaske og silikastøv er gunstigere enn flygeaske og silikastøv hver for seg. Silikastøv gir en god effekt i tidlig fase, mens flygeaske sørger for at den langsiktige utviklingen blir svært gunstig. Kloriddiffusjon (målt ved RCM-metoden) ved 28 døgn og aldringsfaktorer er vist i Tabell 16 for betonger med henholdsvis ren Portlandsement, 8 % silikastøv, 25 % flygeaske og 6 % silikastøv i kombinasjon med 25 % flygeaske (sement med 8 % silikastøv innblandet 25 % flygeaske). Betongen med silikastøv og flygeaske oppnådde lav diffusjonskoeffisient allerede etter 28 døgn, og i tillegg relativt høy aldringsfaktor. Beregnede kloridprofiler for de 4 bindemidlene etter 5 år (venstre) og 100 år (høyre) er vist i Figur 39 ved bruk av modelldata fra Tabell 16 og antagelsen om konstant overflatekonsentrasjon av klorider på 1 % av betongvekt i hele perioden. I følge disse beregningene er 8 % silikastøv og 25 % flygeaske omtrent likeverdige alternativer ved 100 års tidshorisont, mens kombinasjonen av 6 % silikastøv og 25 % flygeaske er gunstigere.

Tabell 16 Effekt av flygeaske og silikastøv på kloriddiffusjon og aldringsparameter. Masseforhold for betongene varierer fra 0,26 - 0,35. Fra Thomas et al (1999).

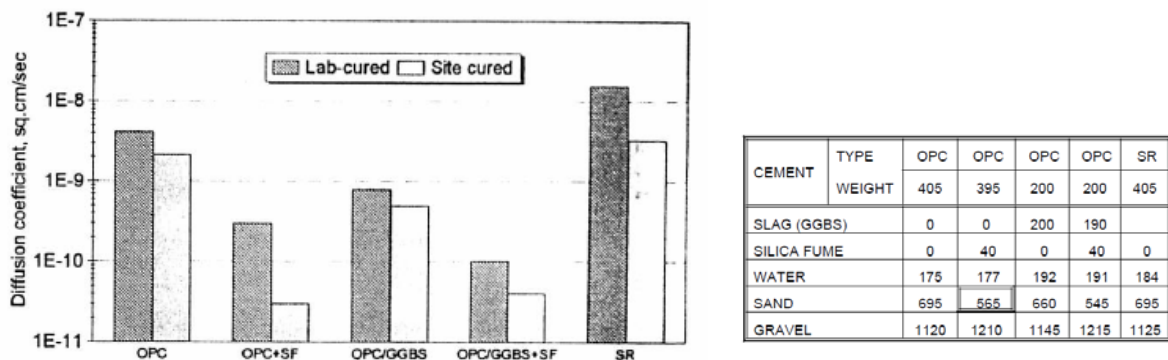
Effect of fly ash and silica fume on chloride diffusion coefficients		
Cement type	D_{28} (m^2/s)	m
Control	4.3×10^{-12}	0.23
25% fly ash	4.4×10^{-12}	0.62
Type 10SF ^a (8% silica fume)	6.6×10^{-13}	0.25
Type 10SF + 25% fly ash	3.7×10^{-13}	0.40

^a Type 10SF = blended cement with 8% silica fume interground with portland cement.



Figur 39 Effekt av flygeaske og silikastøv på beregnede kloridprofiler etter 5 år (venstre) og etter 100 år (høyre). Beregnet på basis av modellparametere i Tabell 16, og ved antagelsen om at overflatekonsentrasjon av klorider er 1 % av betongvekt og konstant over hele perioden. Fra Thomas et al (1999).

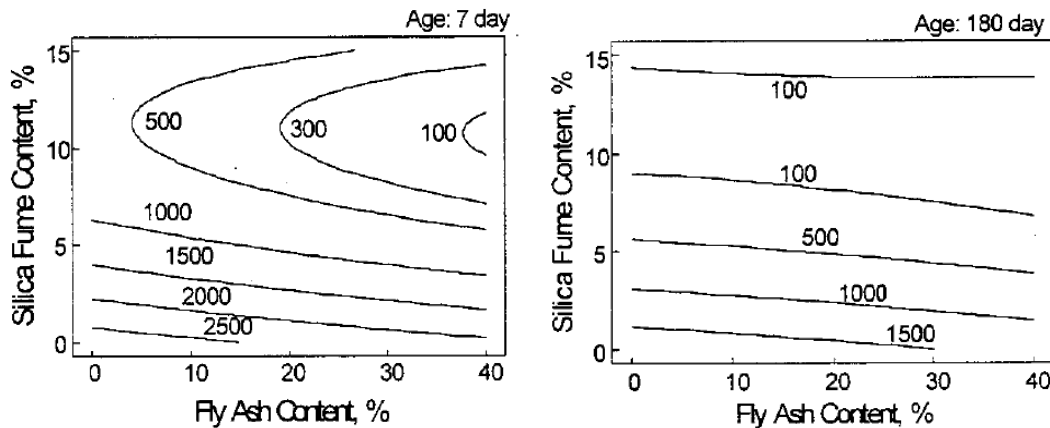
Fidjestøl & Frearson (1994) har studert effekt av silikastøv og slagg, samt kombinasjoner av disse materialene. Diffusjonskoeffisienter er vist i Figur 40. Resultatene viser at 10 % tilsatt silikastøv var mer effektivt enn innblanding av 50 % slagg. Kombinasjonen av silikastøv og slagg var i dette tilfellet noe bedre for laboratorieherdet betong (2 måneder), mens for feltherdet betong var betong med kun silkastøv noe bedre. Merk at reelt masseforhold varierer, blant annet ble silikastøv tilsatt på «addisjonsbasis» og ikke som «erstatning av sement» som er vanligere å bruke i dag. Reseptdata er vist til høyre i figuren.



Figur 40 Diffusjonskoeffisienter fra migrasjonscelleforsøk. Forskjeller mellom laboratorieherdet (2 måneder i vannbad) og feltherdet (kjerner fra konstruksjon etter 10 måneder) betong. Reseptdata er vist til høyre. Fra Fidjestøl & Frearson (1994).

Lynsdale & Khan (2000) har studert effekten av ternære kombinasjoner av Portlandsement, flygeaske og slagg i ulike proporsjoner på kloridpermeabilitet vha. ASTM C1202 (se egen omtale av denne metoden i tidligere avsnitt). Plott som viser effekten etter henholdsvis 7 og 180 døgns herding er vist i

Figur 41. Det vises til Tabell 10 for tolkning av resultater for kloridpermeabilitet, hvor verdier < 1000 Coulombs er karakterisert som «very low» og verdier < 100 er karakterisert som «negligible». Av disse resultatene ser vi at den isolerte effekten av silikastøv ser ut til å være større enn effekten av flygeaske, men at kombinasjoner av silikastøv og flygeaske er gunstige. Merk ankepunktet mot denne metoden som diskutert i metodebeskrivelsen. Det som måles egentlig ikke er kloriddiffusivitet, men elektrisk resistivitet, som i stor grad er influert av porevannskjemien og spesielt av ionekonsentrasjonen.



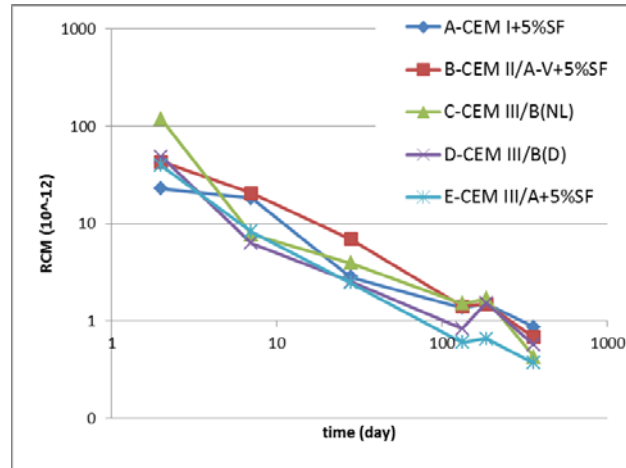
Figur 41 Kombinert effekt av silikastøv og flygeaske på kloriddiffusivitet ved 2 ulike aldre og konstant masseforhold på 0,27. ASTM C 1202. Iso-responskurver i Coulombs. Fra Lynsdale & Khan (2000).

Bouzoubaâ et al. (2004) har studert effekt av 3 ulike flygeasker med stor variasjon i CaO-innhold fra 6,6 – 26 % i kombinasjon med 4 eller 8 % silikastøv. Det ble benyttet to ulike masseforhold på henholdsvis 0,34 og 0,40. Kombinasjonen av 30 eller 40 % flygeaske og 4 % silikastøv var gjennomgående svært gunstig og ga lav kloriddiffusivitet både målt ved 28 og 150 døgns alder. For betonger uten tilsatt silikastøv ga flygeasken med høyest CaO-innhold noe dårligere diffusjonsegenskaper, men ved 4 % tilsetning av silikastøv var det det i praksis ingen forskjeller mellom de 3 flygeaskene. Studien viste videre at effekten av å gå opp fra 4 til 8 % silikastøv var relativt liten i kombinasjon med flygeaske. Dette står i kontrast til den isolerte effekten av økning av silikastøvmengde for betonger uten flygeaske, som er relativt stor.

Elahi et al. (2010) har studert effekt av både flygeaske og slag i kombinasjoner med 7,5 % silikastøv. Kombinasjoner av 50 % slag med 7,5 % silikastøv var den aller gunstigste varianten mht. kloriddiffusivitet, og mer gunstig enn f.eks. 70 % slag uten silikastøv. Tilsvarende kombinasjoner av 20 eller 40 % flygeaske og 7,5 % silikastøv var også svært gunstig. Forsøkene viser for øvrig at overflatekonsentrasjon av klorider varierer med type bindemiddel. Oppnådde verdier var spesielt høye for kombinasjonene av slag og silikastøv, med om lag dobbelt så høye verdier som for referanseblandingen.

Det er noe usikkerhet knyttet til diffusjonsegenskaper i veldig tidlig alder for slag- og flygeaskebetonger, dette er spesielt en aktuell problemstilling for konstruksjonsdeler som blir eksponert for sjøvann i veldig tidlig alder. Resultater fra et samarbeidsprosjekt mellom Statens vegvesen og TNO i Nederland, hvor egenskaper for 5 ulike bindemidler er testet, er vist i Figur 42. Resultatene etter 2 døgn viser at CEM I (Aalborg rapid) med 5 % silikastøv hadde lavest diffusjonskoeffisient, og den nederlandske slagsementen (CEM III/B) hadde høyest diffusjonskoeffisient. Allerede etter 7 døgn var imidlertid alle 3 slagbetongene bedre enn betong med CEM I. Betong med flygeaskesement (Anlegg FA) lå noe etter i egenskapsutvikling ved 28 døgn før den «tok igjen» CEM I ved neste termin på 133 døgn. Egenskapsutviklingen for slagbetongen er i tråd med generelle nederlandske erfaringer (Polder 2012), hvor slagbetonger «henger etter» CEM I de første døgnene, men har like gode egenskaper etter 7 døgn. Fra 7 døgn og videre har slagbetonger gjennomgående betydelig lavere diffusjonskoeffisient

enn betonger med Portlandsement. Etter 1 års herding var det relativt små og knapt signifikante forskjeller mellom de 5 mørtlene. Det er forventet at betong med CEM I + silikastøv vil flate ut, mens betonger med slagg og flygeaske i større grad vil utvikle forbedrede diffusjonsegenskaper på lang sikt. Videre testing fram til 3 års alder vil bli gjennomført.



Figur 42 Effekt av bindemiddel på migrasjonskoeffisient ved ulike tidspunkt. Mørtler med masseforhold 0,40. Merk at mørtler med CEM III/B er uten silikastøv, mens de øvrige mørtler er med 5 % silikastøv. Fra Polder (2015).

Geiker (2015) har oppsummert danske erfaringer med flygeaske, som har vært i bruk i Danmark siden midten av 1970-tallet. For konstruksjoner i «klasse E, ekstra aggressivt miljø», har det typisk blitt brukt 3-pulverblandinger med 15-20 % flygeaske i kombinasjon med 5 % silikastøv. Generelt har betonger med flygeaske og i kombinasjoner med silikastøv gitt lavere kloridinntrengning. Relativt høye mengder flygeaske på 25 % er rapportert å være betydelig mer effektivt enn mengder < 15 %. En generell erfaring er at maksimalt kloridnivå ikke ligger i betongens overflate, men i en viss distanse inn fra overflaten. Dybden på maksimalt nivå, og også at maksimal konsentrasjon øker med tiden, er noe det må tas hensyn til ved bruk av data for levetidsberegninger.

5.3 Depassivering av armering

5.3.1 Innledning om kritisk kloridnivå

Kritisk kloridnivå for å initiere armeringskorrosjon avhenger av en rekke faktorer, blant annet av porevæskens pH, stålets elektrokjemiske potensial og tilstedeværelse av porer i betong/stål-overflaten. Det elektrokjemiske potensialet er koblet til tilgjengelig mengde oksygen på ståloverflaten. Eksempelvis skal det betydelig høyere mengder klorider til for å initiere korrosjon på konstruksjoner som er neddykket i sjøvann sammenlignet med konstruksjoner over vann hvor oksygentilgangen er mye høyere (Bertolini et al 2004).

Angst et al. (2009) har i en review- artikkel vist at rapporterte verdier for kritisk kloridnivå varierer over et enormt spekter fra 0,04 – 8,34 % av sementvekt. Kritisk kloridnivå uttrykt ved $[Cl^-]/[OH^-]$ (se nærmere omtale senere) varierer i enda større grad fra 0,01 – 45. En konklusjon fra studien var at det på det tidspunktet (2009) ikke var mulig å gi noen klare konklusjoner mht. kritisk kloridnivå. Et problem er at mye av forskningen som har vært utført har vært gjort ved urealistisk betingelser. Ergo er det et sterkt behov for videre forskning på dette området. Til tross for denne situasjonen er det likevel mulig å gi noen veldig grove tall på kritisk kloridnivå. Bertolini et al. (2004) angir at ved kloridnivåer lavere 0,4 % av sementvekt er det (for ukarbonisert betong) liten risiko for armeringskorrosjon. For kloridnivåer større enn 1 % er det på den annen side høy risiko for armeringskorrosjon.

Det er en allmenn oppfatning at det er frie klorider som er av størst betydning for initiering av korrosjon, mens bundne klorider ikke bidrar (Bertolini et al 2004, Neville 1995). Kjemisk binding av klorider er for CEM I først og fremst knyttet til reaksjon med C₃A til Friedels salt, eller med C₄AF. I tillegg kan klorider bindes fysisk gjennom overflateadsorpsjon til hydratasjonsproduktene. Bertolini et al. (2004) påpeker imidlertid at også de bundne kloridene kan spille en rolle ved at store mengder bundne klorider kan frigis ved nedgang i pH til under 12, noe som kan skje lokalt i porer i overflaten mellom stål og betong. Et interessant forhold er at mengde kloridioner i porevæsken også er avhengig av andre ioner. Eksempelvis er andelen frie klorider høyere ved økende OH⁻ konsentrasjon (økende pH). Det er åpenbart at kjennskap til kloridbinding er viktig fordi en høyere andel bundne klorider vil redusere andelen frie klorider nær armeringsjern. Yuan et al (2007) peker også på 2 øvrige forhold av betydning; at økt binding gir redusert mengde klorider i porevæsken, noe som gir lavere konsentrasjonsforskjeller og dermed lavere diffusjonshastighet videre innover i betongen. I tillegg vil binding av klorider til Friedels salt medføre en tettere betongporestruktur som medvirker til lavere diffusjonshastighet.

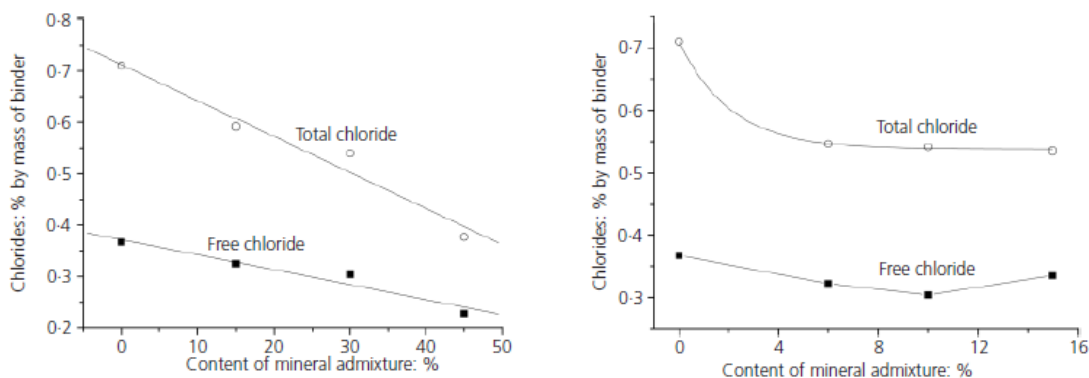
Kritisk kloridnivå kan uttrykkes i prosent av sementvekt eller av betongvekt. Normalt benyttes totalt kloridinnhold som kriterium, hovedsakelig fordi dette er langt enklere å måle enn innholdet av frie klorider. Som diskutert av Angst et al. (2009) er det av flere i litteraturen foreslått at det molare forholdet [Cl⁻]/[OH⁻] har betydning, eksempelvis av Hausman (1967) som har vist at sjansen for korrosjon er lav dersom dette forholdet er 0,6 eller lavere. Andre har funnet at det kritiske forholdet øker med økende pH, som referert av Angst et al. (2009). Høy pH gir altså en «inhibitoreffekt» mot kloridinitiert korrosjon. Isolert sett skulle dette tilsi at flygeaske og slagg, og også silikastøv, skulle kunne gi redusert kritisk kloridnivå siden OH⁻ nivået synker ved økende innblandingsgrad. På den annen side vil (for en gitt mengde kloridioner) en lavere mengde OH⁻ føre til økt kloridbinding og større andel frie klorider i løsning (Tritthart 1989). Generelt gir både flygeaske og slagg (Dhir et al. 1996, 1997, Arya et al. 1990, Geiseler et al. 1995) høyere kloridbindingsevne enn Portlandsement. For flygeaskemengder > 50 % kan imidlertid kloridbindingsevnen reduseres noe som vist av Dhir et al. 1997. Den generelle trenden ved tilsetning av silikastøv er på den annen side redusert kloridbindingsevne, dette er vist både i review-artiklene til Yuan et al. (2009) og Angst et al. (2009), selv om det også er vist til noen få unntak.

Både flygeaske og slagg gir altså reduksjon i OH⁻ konsentrasjonen, og samtidig reduksjon i Cl⁻ konsentrasjon fordi kloridbindingsevnen øker. Det resulterende [Cl⁻]/[OH⁻] forholdet kan imidlertid i mange tilfeller øke fordi reduksjonen i OH⁻ konsentrasjon relativt sett er større enn reduksjon av Cl⁻, og kan dermed gi en forventet økt sannsynlighet for korrosjon. Silikastøv gir på den annen side redusert kloridbindingsevne, dvs. økt mengde frie kloridioner, og i enda større grad redusert pH, dvs. begge forholdene peker i retning av økt sannsynlighet for korrosjon ved et gitt kloridinnhold på nivå med armeringen.

Et annet forhold som også må tas i betraktning er karbonatisert betong. Karbonatisering medfører redusert kloridbinding, og økt mengde frie klorider i porevæsken ikke bare i den karbonatiserte fronten, men også i forkant av karboniseringsfronten (Neville 1995).

5.3.2 Kritisk kloridnivå – effekter av flygeaske og slagg

Xu et al. (2011) har gjennom en laboratoriestudie vist at kritisk kloridnivå reduseres ved økende mengde tilsatt flygeaske, både målt ved totale klorider og frie klorider, se Figur 43 (venstre). 6 % tilsetning av silikastøv ga også redusert kritisk kloridnivå, mens økning utover 6 % ga liten effekt.



Figur 43 Forandring i kritisk innhold av frie klorider og totale klorider i % av bindemiddel ved økende innhold flygeaske (venstre) og silikastøv (høyre). Fra Xu et al. (2011).

Thomas (1996) gjorde forsøk på betonger eksponert i sjøvann i 4 år, med prøvetaking for kloridprofiler og bestemmelse av tap av masse på armeringsjern etter 1, 2 og 4 år. På basis av dette ble det bestemt kritisk kloridnivå for ulike masseforhold, se Tabell 17. Den negative effekten av økt flygeaskeinnhold er i denne studien enda tydeligere enn i studien rapportert av Xu et al. (2011).

Tabell 17 Kritisk kloridnivå som funksjon av mengde flygeaske, i vekt % av bindemiddel. Fra Thomas (1996).

Fly ash level (%)	Threshold Cl (%)
0	0.70
15	0.65
30	0.50
50	0.20

Også Oh et al. (2003) har vist resultater omtrent tilsvarende som rapportert av Thomas (1996), med synkende kloridterskelverdi ved økende flygeaskeinnhold. Det totale bildet er imidlertid noe sammensatt, da det også er funn i litteraturen som peker i retning av at betonger med flygeaske kan ha enten høyere kritisk kloridnivå eller ingen effekt, som sitert av Angst et al. (2009).

For slagg er også bildet noe sammensatt. Gouda & Halaka (1970) fant at en slaggsement med 35 % slagg ga en betydelig reduksjon i kritisk kloridnivå. I en studie av Oh et al. (2003) ga 30 % innblanding av slagg ingen signifikant endring av terskelverdi i forhold til ren Portlandsement. Det finnes på den annen side også funn som peker mot et høyere kritisk kloridnivå for slaggbetonger (Schiessl & Breit 1996).

I nederlandske studier referert av Polder et al. (2014) hvor CEM I, CEM II/B-V, CEM V/A og CEM III/B er sammenlignet mht. kritisk kloridnivå, ble det konkludert med at det ikke var signifikante forskjeller mellom de ulike bindemidlene. Det var på den annen side en effekt av masseforhold, hvor masseforhold på 0,55 ga lavest kritisk kloridnivå og masseforhold på 0,40 ga høyest kritisk kloridnivå. Middelerdi for kritisk kloridnivå for hele gruppen av bindemidler ved ulike masseforhold var 0,8 % av sementvekt.

Som diskutert innledningsvis er det både for flygeaske og slagg to motstridende mekanismer: På den ene siden gir begge materialene økt kloridbindingsevne som vil gi økt forventet terskelverdi, på den andre siden vil reduksjon i OH⁻ konsentrasjonen gi en forventet reduksjon i inhibitorer- effekten. De relativt få funnene som er gjort i litteraturen er da også motstridende, og det kan ikke trekkes noen

entydige konklusjoner. For silikastøv ser bildet ut til å være mer entydig ifølge Angst et al. (2009), ved at kritisk kloridnivå reduseres. Dette er en naturlig konsekvens av at kloridbindingsevnen reduseres ved innblanding av silikastøv, samtidig som OH⁻ konsentrasjonen reduseres, begge disse forholdene går i samme retning av redusert terskelverdi. Det er imidlertid usikkerhet rundt størrelsen på reduksjonen.

Avslutningsvis må det påpekes at selv om flygeaske og slagg skulle føre til redusert terskelverdi, så forventes den positive effekten i form av redusert kloridinntrengning som diskutert i kapittel 5.2.2 som følge av den forfinede porestrukturen å være viktigere. Den resulterende effekten av slagg og flygeaske forventes altså være positiv selv om terskelverdien reduseres. Med tanke på levetidsberegninger er det likevel viktig å ha et tydelig bilde av hvordan terskelverdien endrer seg ved bruk av ulike bindemidler, og ytterligere forskning på området er derfor påkrevet.

5.3.3 Kritisk pH ved karbonatisering

Som tidligere diskutert under avsnittet om karbonatisering nedsetter slagg og flygeaske betongens pH, i tillegg til at mengde kalsiumhydroksid reduseres. Dette gjør at bufferen for videre karbonatisering reduseres. Det er ikke funnet noen referanser til at terskelverdi for pH som gir depassivering av stål endrer seg ved tilsetning av flygeaske og slagg, og det er heller ikke noen opplagte grunner til at dette skulle endres.

5.4 Propageringsfasen

5.4.1 Innledning

I propageringsfasen, dvs. etter at passivsjiktet er brutt ned enten av karbonatisering eller høyt kloridnivå, vil korrosjonshastigheten kunne variere innenfor svært vide grenser avhengig av fuktinnhold, temperatur og kloridinnhold. Korrosjonshastighet vil ved høy fukt (> 95 % RF) og høyt kloridinnhold (> 1 % av sementvekt) kunne være opp til 1 mm/år lokalt (Bertolini 2008). Korrosjonshastighet vil begrenses av oksygentilgang dersom korrosjonen er under katodisk kontroll, ved at lav oksygenpermeabilitet fører til lavere korrosjonshastighet.

Det finnes en lang rekke studier som viser at korrosjonshastigheten er omvendt proporsjonal med resistivitet, som oppsummert av Bertolini (2008) og Hornbostel et al. (2012). Det er imidlertid ikke mulig å angi en universell sammenheng mellom korrosjonshastighet og resistivitet, da denne vil være avhengig av blant annet betongsammensetning og kloridinnhold. I de videre avsnitt vil det gis eksempler på hvordan betongens resistivitet påvirkes av flygeaske og slagg.

5.4.2 Resistivitet

Betongens spesifikke elektriske motstand kan måles ved flere ulike metoder og med ulik spenning, og også ved ulike frekvenser ved bruk av vekselstrøm. For detaljer om ulike metoder vises det til Elkey og Sellevold (1995), og for effekt av frekvensområde til Østvik et al. (2006). Betongens resistivitet er i svært stor grad avhengig av betongens fuktinnhold, blant annet vist av Larsen et al. (2006a), og Elkey & Sellevold (1995), hvor økende fuktinnhold i betydelig grad gir redusert resistivitet. Betongens resistivitet vil generelt avhenge av både porestruktur og av porevannskjemien for betongen (Shi et al. 1999). Det er mange eksempler fra litteraturen på at det er en sammenheng mellom diffusjonskoeffisient D og resistivitet R av typen:

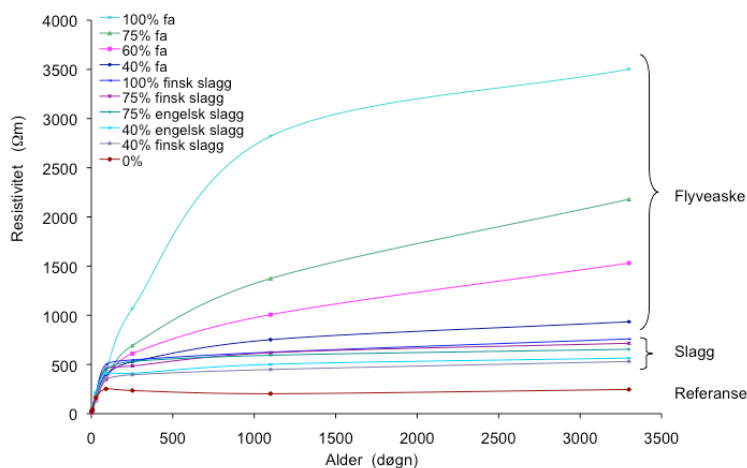
$$D = k/R \quad (11)$$

Hvor k er en konstant som vil avhenge blant annet av fukt og temperaturforhold.

Som diskutert tidligere under «Metoder» har imidlertid ione-konsentrasjonen stor betydning. Synkende ionekonsentrasjon som følge av tilsetning av flygeaske, slagg eller silikastøv vil gi stor økning i porevannets resistivitet, og dermed også i betongens resistivitet (Shi et al. 1999). Resultater sitert av Elkey & Sellevold (1995) viser at høy mengde klorider (3-4 % av sementvekt) kan gi en reduksjon av betongens resistivitet opp mot 50 % i forhold til kloridfri betong som en følge av denne effekten.

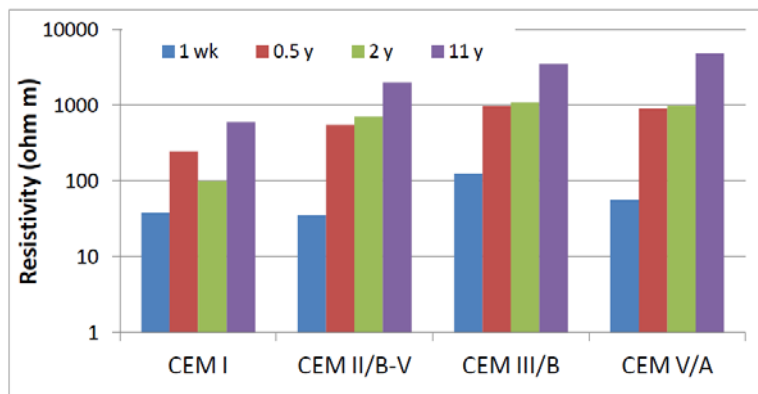
Som diskutert i innledningen har resistivitet svært stor interesse fordi det er en forventet sammenheng mellom resistivitet og korrosjonshastighet i propageringsfasen. Det er imidlertid en «tilleggseffekt» av resistivitet at denne også til en viss grad kan fortelle noe om betongens diffusjonsegenskaper, selv om det da altså må korrigeres for ionekonsentrasjon i betongens porevæske som diskutert over. Av diskusjonen over, samt av tidligere avsnitt hvor diffusjonsegenskaper er presentert, er det en opplagt forventning om at betonger med flygeaske og slagg generelt vil resultere i høyere resistivitet fordi de a) har en tettere porestruktur med lavere diffusivitet, og b) fordi flygeaske og slagg resulterer i lavere ionekonsentrasjon i betongens porevæske.

For gitte nivåer av fukt er det da også som forventet svært stor effekt av materialsammensetning, ved at økende innblandingsgrad av flygeaske og slagg gir økt resistivitet. Interne forsøk utført av Statens vegvesen i forbindelse med utvikling av betonger til Bjørvika-prosjektet (se egen omtale i Kapittel 8) har vist at spennvidden i elektrisk resistivitet er formidabel som vist i Figur 44. Selv om betongene med slagg ligger høyt sammenlignet med referansebetongen, viser slaggbetongene en relativt flat utvikling sammenlignet med flygeaskebetongene, som fortsetter å utvikle seg over mye lengre tid.



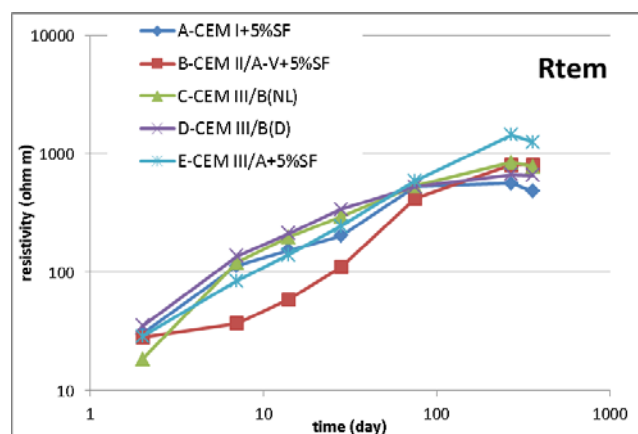
Figur 44 Utvikling av resistivitet opp til 9 år for betonger med ulike sammensetning. Betongene har vært lagret i vannbad i hele perioden. Merk at angivelse av mengde flygeaske eller slagg er i % av Portlandsement. Fra Larsen 2012.

Oppnådd resistivitet for slaggbetongene vist i Figur 44 er betydelig høyere enn for referansebetong med CEM I, men altså langt lavere enn det som ble oppnådd for flygeaskebetong med tilsvarende innblandingsgrad. Det finnes imidlertid andre studier, blant annet fra Nederland, hvor CEM III/B med ca. 70 % slagg har gitt høyere resistivitet enn CEM II/B-V for alle aldre fra 1 uke til 11 år, se Figur 45.



Figur 45 Utvikling av resistivitet for betonger med ulike bindemidler og masseforhold på 0,45 ved utendørs eksponering opp til 11 år. CEM V/A er en komposittsement med innblanding av både slagg og flygeaske. Fra Polder (2012).

Ett-års resultater fra pågående forsøk i et samarbeidsprosjekt med TNO i Nederland er vist i Figur 46. Disse resultatene viser at etter 1 år lå CEM III/A med ca. 50 % slagg og 5 % tilsatt silikastøv noe høyere enn de øvrige betongene, hvor CEM I (Aalborg rapid) med 5 % silikastøv var lavest. Merk videre at CEM II/A-V hadde lav resistivitet fram til 90 døgns alder, men lå på samme nivå som CEM III/B etter 1 år. Forsøkene er planlagt videreført fram til minst 3 års alder.



Figur 46 Utvikling av resistivitet over tid for betonger med 5 ulike bindemidler. Merk at betonger med CEM III/B er uten tilsatt silikastøv, mens de øvrige betonger er med silikastøv. Fra Polder (2015).

Øvrige resultater referert av Polder et al. (2014) viser at slaggbetonger generelt gir betydelig høyere resistivitet enn betonger med CEM I, men at resistiviteten for slaggbetonger varierer noe mer enn for betonger med CEM I avhengig av fuktbetingelsene.

Det finnes en lang rekke studier som bekrefter dette bildet, og viser at slagg og flygeaske generelt gir betydelig økt resistivitet, blant annet Elahi et al. (2009) og Smith et al. (2004). Det er imidlertid få rapporterte studier som viser langtidseffekt over flere år. Det er i Kapittel 8 vist resultater for langtids resistivitetmålinger fra feltstasjon, se omtale av prosjektet «Kloridbestandig betong, Fase II».

5.4.3 Øvrige forhold

Tilgang til oksygen har stor betydning for den katodiske prosessen, hvor lav oksygentilgang gir lavere korrosjonshastighet. Oksygentilgangen er rapportert å være lavere for betonger med flygeaske (du Preez & Alexander 2007, Lynsdale & Khan 2000). Lynsdale & Khan (2000) har videre dokumentert en generell sammenheng mellom kloridpermeabilitet og oksygenpermeabilitet, hvor graden av korrelasjon er bedre desto tettere betongene er.

5.5 Konklusjoner og avsluttende kommentarer

5.5.1 Initieringsfasen

Karbonatisering

Litteraturgjennomgangen har vist at økende mengder flygeaske og slagg gir økende karbonatiseringshastighet. Ved flygeaskemengder > 30 % og slaggmengder > 50 % er den negative effekten i mange tilfeller betydelig. Effekten er tydelig i akselererte forsøk og i tidlig fase (noen få år) ved naturlig karbonatisering. Nederlandske studier viser imidlertid at den langsiktige effekten av karbonatisering for betonger med slagg er svært begrenset, i alle fall for betonger i marint miljø.

Den negative effekten av karbonatisering kan reduseres ved å gi betongene en lang herdeperiode ved gode herdebetingelser. Betonger med slagg og flygeaske synes å være mer følsomme for forutgående herdetid enn tilsvarende betonger med ren Portlandsement. Dette er en naturlig konsekvens av betongenes langsommere egenskapsutvikling, noe som spesielt gjør seg gjeldende for betonger med høye flygeaskemengder.

Karbonatisering av betonger med Portlandsement gir en finere porestruktur i det karbonatiserte sjiktet enn for ukarbonisert betong. For betonger med slagg fører karbonatiseringen til grovere porestruktur i det karbonatiserte sjiktet, noe som er veldokumentert i litteraturen. Det er også funnet noen eksempler fra litteraturen på at flygeaske kan tilsvarende effekt, dvs. en grovere porestruktur etter karbonatisering. Konsekvensen av dette er kanskje størst for frost/salt- bestandighet, men det vil også kunne ha betydning for f.eks. kloridinntrengning.

Kloridinntrengning

Studien har vist at tilsetning av flygeaske i stor grad gir økning i kloridmotstand. Den pozzolane reaksjonen for flygeaske er imidlertid svært langsam sammenlignet med silikastøv, og betonger med flygeaske er relativt diffusjonsåpne i ung alder. Lave temperaturer kan forsterke denne negative effekten. For betonger med flygeaske fortsetter imidlertid økningen av kloridmotstand over mange år.

Det fleste studier av flygeaske er utført for silikatholdige flygeasker (type F i amerikansk terminologi). Men det er også vist at kalkholdige flygeasker kan ha svært god effekt på kloriddiffusivitet på lang sikt.

Slagg gir tilsvarende som for flygeaske en forfining av poresystemet og svært god motstand mot kloridinntrengning. Slagg reagerer betydelig raskere enn flygeaske. Nederlandske erfaringer viser at slaggbetonger allerede etter 7 døgn har like gode diffusjonsegenskaper som Portlandsement, og fra den alderen og videre langt bedre egenskaper.

Økende mengde flygeaske gir redusert kloriddiffusivitet, men bare opp til et visst nivå. Flere studier har vist at det er lite å hente på å øke mengde utover 30 %. For slagg er det tilsvarende effekt opp til ca. 50 %, mens det er relativt lite å hente på ytterligere økning utover dette nivået.

Ved å kombinere slagg eller flygeaske med silikastøv kan man få en synergieffekt, og oppnå svært gode diffusjonsegenskaper allerede ved tidlig alder, samtidig som diffusiviteten fortsetter å synke over lang tid.

For betonger med slagg synes masseforholdet å være av mindre betydning, dvs. at betongene er mindre følsomme for variasjoner i masseforhold enn tilsvarende betong med Portlandsement. Betonger med flygeaske viser noe av de samme egenskapene, men ikke så utpreget som for slaggbetonger.

5.5.2 Depassivering av armering:

Flere studier peker mot at kritisk kloridnivå blir redusert både for betonger av flygeaske og slagg. Bildet er noe nyansert, da det er motstridende funn i litteraturen. Det er da også motstridende mekanismer: På den ene siden tyder de fleste funn på at både slagg og flygeaske isolert sett gir økt kloridbindingsevne, noe som gir en forventet økt terskelverdi. På den andre siden gir disse materialene reduksjon i OH⁻ konsentrasjon, noe som gir en forventet reduksjon av «inhibitor» effekt.

For silikastøv ser bildet ut til å være mer entydig, ved at kritisk kloridnivå reduseres. Dette er en naturlig konsekvens av at kloridbindingsevnen reduseres ved innblanding av silikastøv, samtidig som OH⁻ konsentrasjonen reduseres, begge disse forholdene går i samme retning. Det er imidlertid usikkerhet rundt størrelsen på reduksjonen.

5.5.3 Propageringsfasen

En rekke studier har vist at både slagg og flygeaske fører til en sterk økning i betongens spesifikke elektriske motstand, og sterkt redusert oksygenpermeabilitet. Flere studier har vist at økende resistivitet vil føre til redusert korrosjonshastighet i propageringsfasen. Ved tilstrekkelig høy resistivitet kan korrosjonen mer eller mindre stoppe opp. Tilsvarende vil lav tilgang på oksygen føre til redusert korrosjonshastighet dersom korrosjonen er under katodisk kontroll.

6 Motstand mot frostnedbrytning

6.1 Innledning – generelt om frostnedbrytning

Frostskader kan gi seg utslag i to ulike skadetyper:

- Oppsprekking og intern volumnedbrytning
- Gradvis avskalling av overflaten

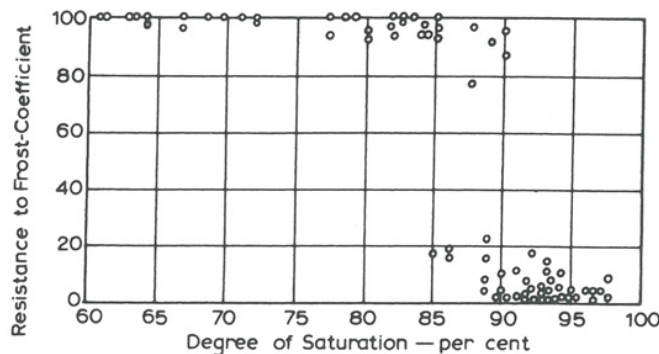
Den første typen er sjelden, lite synlig i tidlig fase, men kan ha alvorlige konsekvenser. Den andre typen er lett synlig på overflaten, og kan være alvorlig ved at den kan gi gradvis tap av armeringsoverdekning. Frostnedbrytning ved avskalling er i stor grad knyttet til fryse/tine-påkjønning i nærvær av salt fra f.eks. veisaltning eller sjøvann.

Motstand mot frostnedbrytning er i stor grad knyttet betongens porestruktur. Det er velkjent fra litteraturen at frostbestandigheten øker ved synkende masseforhold, dvs. når porestrukturen blir finere. Vann i små porer fryser ved lavere temperatur enn vann i store porer. Eksempelvis vil vann i en pore med diameter 10 nm fryse ved -25°C , mens vann i en pore med diameter på 100 nm vil fryse ved -3°C . For en velherdet, vannmettet betong med masseforhold på 0,40 (uten luftinnføring) vil kun ca. 10 % av vannet fryse ved -20°C . Tilsvarende tall for masseforhold 0,70 er ca. 30 % (Sellevold 2009).

Kalorimetri-forsøk med ren sementpasta med masseforhold på 0,40 viser ingen isdannelse ved temperaturer ned til -20°C (Sellevold & Bager 1980), noe som skulle indikere at sementpasta med tilsvarende masseforhold er helt og holdent frostbestandig. Dette er imidlertid ikke i tråd med praktisk erfaring, hvor et masseforhold på 0,40 ikke er noen garanti for frostbestandig betong. En av årsakene er fukthistoriens store innvirkning, hvor selv moderat tørking og påfølgende oppfukning vil bidra til grovere porestruktur og redusert frostbestandighet (Sellevold & Bager 1980, Sellevold & Farstad 1992). En annen årsak kan være at betongens porestruktur vil være annerledes enn porestruktur i ren sementpasta.

I tillegg har betongens kapillære vannmetningsgrad stor betydning. I praksis regner vi med at kun betonger som er direkte utsatt for vann, og da spesielt horisontale overflater hvor det blir stående vann over lang tid, vil kunne oppnå høy nok vannmetningsgrad til å kunne fryse. Nettopp det faktum at de største porene hvor vannet vil fryse ved høyest temperatur vil tørke ut først forklarer dette. Fagerlund (1977) utviklet metodikk for bestemmelse av kritisk vannmetningsgrad ved å eksponere prøvestykker kondisjonert til ulike vannmetningsgrader for fryse-tine sykler, og deretter teste dynamisk E-modul for prøvelegemene som et «performance-krav». Ved å sammenligne denne kritiske faktoren med en «potensiell» vannmetningsgrad (eller i praksis kapillær vannmetningsgrad) for aktuell miljøbelastning kan man forutsi om gitt betong i et gitt miljø er frostbestandig.

Effekt av vannmetningsgrad illustreres tydelig i Figur 47 fra Neville (1995).



Figur 47 Generell sammenheng mellom «frostmotstand» og vannmetninggrad. Fra Neville (1995).

Luftinnføring av betong, hvor vi innfører i størrelsesorden 5 % luftporer med en diameter i området 50 – 300 mikrometer, er generelt regnet for å gi en god beskyttelse mot frostmotstand (Neville 1995). Det er imidlertid et åpent spørsmål hvorvidt betonger med lave masseforhold (og høy trykkfasthet) er frostbestandige i seg selv uten luftinnføring. Sellevold & Farstad (1991) har antydnet at grensen for frostbestandig betong uten luftinnføring går ved et masseforhold ca. 0,30.

Det er i dag to hovedteorier som forklarer mekanismene for frostnedbrytning (Sellevold 2009):

- **Hydraulisk trykk:** betongens kapillære vann vil ved utvidelsen når det fryser til is føre til at ufrosset vann presses innover i betongens poresystem. Dette gir strekkrefter i betongen, og dersom strekkfastheten overskrides vil betongen sprekke opp. Luftporer som ikke er vannfylte vil kunne avlaste det hydrauliske trykket.
- **Osmotiske effekter:** Ved dannelse av is i en pore vil det føre til økt innhold av ioner i det omkringliggende vannet. For å utjevne forskjeller i ionekonsentrasjon vil det derfor skje en transport av vann mot isfronten. Trykket vil skape strekkspenninger i betongen.

Osmose-teorien forklarer den store negative effekten salt har på frostnedbrytning. Hydraulisk trykk-teorien forklarer på den andre siden bedre den positive effekten man har av luftinnføring. Ingen av teoriene kan imidlertid forklare frostnedbrytning fullt ut.

I følge Valenca & Scherer (2007 a) er mekanismene for «salt/frost-avskalling» og «intern volumnedbryting» ulike, og en betongs evne til å motstå det ene er dermed ikke korrelert mot dens evne til å motstå den andre skadetyper. En ny teori utviklet ved Princeton- universitetet i USA betegnet «glue spalling» teorien hevder å gi en mer adekvat forklaring på fenomenet med avskalling i nærvær av salt (Valenca & Scherer 2007 b) og c).

«Glue spalling» teorien går i korthet ut på følgende:

- Ved frysing av en saltløsning på betongoverflaten dannes det en is/betong-kompositt ved at is og betong er mekanisk bundet til hverandre. Ved videre nedkjøling vil isen trekke seg sammen i størrelsesorden 5 ganger mer enn betongen. Avhengig av omstendighetene (temperatur, konsentrasjon på saltløsningen) vil isen sprekke pga. strekkspenningen som oppstår ved fastholdningen fra betongen. Sprekkene vil forplante seg ned i den underliggende betongen og gi sprekker parallelt med overflaten i en viss dybde.
- Det hevdes at teorien forklarer «pessimumeffekten», dvs. at en 3 % saltløsning er verst: Rent vann på overflaten gir is som er «for sterk» til å sprekke, for høy løsning (vesentlig mer enn 3 %) gir is som er «for svak til å gi skader i betongen».
- Betongoverflatens mekaniske styrke er en sentral parameter ifølge teorien, alt som svekker overflaten gir dårligere motstand mot avskalling. Et eksempel på dette er bleeding.
- Effekt av luftinnføring forklares to-delt: Luft gir redusert bleeding, og dermed en sterkere overflate. Se foregående punkt. I tillegg vil det for luftinnført betong være større grad av sammenfall i lengdeutvidelse for betong og is, og dermed vil det genereres mindre strekkspenninger i isen.

I Norge regner vi at frostnedbrytning utgjør et relativt lite problem sammenlignet med f.eks. armeringskorrosjon. Det er påfallende hvor mye høyere fokus man har hatt på frostproblematikk i våre naboland Sverige og Danmark.

6.2 Spesifikasjon og dokumentasjon av frostbestandig betong

Den vanligste måten å spesifisere frostbestandig betong er gjennom bestemmelser om luftinnføring, masseforhold og eventuelt begrensninger i tillatte type bindemidler. NS-EN 206-1 stiller krav om maksimalt masseforhold for betong i klassene XF2, XF3 og XF4 på 0,45 eller 0,40. Flere land har begrensninger i forhold til hvilke bindemidler som er tillatte for frostutsatte konstruksjonsdeler, eksempelvis viser Hooton (2012) til at mengde slagg begrenses til 25 % for utsatte konstruksjonsdeler i provinsen Ontario i Canada. I USA har Federal Highway Administration satt en grense på 25 % slagg for betonger som utsettes for tinesalter, mens grensen for betonger som ikke utsettes for tinesalter er 50 % (Bektas et al. 2010).

Luftinnføring i betong brukes rutinemessig som et middel for å øke betongens fryse/tine-motstand. Et finfordelt luftporesystem i betongen gir en avlastning for vanntransporten som induseres av frost (se mekanismer beskrevet over). NS-EN 206 stiller krav om minimum 4 % luftinnhold for betong i eksponeringsklassene XF2, XF3 og XF4. Statens vegvesen stiller i Prosesskode 2 (2015) krav om $4,5 \pm 1,5$ % luft for fasthetsklasser opp til B45, og $3,5 \pm 1,5$ % for høyere fasthetsklasser. Det stilles altså normalt ikke krav til at luftporestrukturens kvalitet skal dokumenteres. Et poresystem med mange små og finfordelte porer regnes imidlertid for å være mer effektivt. Luftporestruktur kan spesifiseres som avstandsfaktor og/eller spesifikk overflate. Slike krav gis ikke rutinemessig i Norge, men har vært gitt for enkelte prosjekter. I slike tilfeller dokumenteres luftporestruktur i herdet betong ved analyser av planslip i henhold til NS-EN 480-11. Eksempel på anbefalte materialparametere for å oppnå god frostbestandighet vises i Tabell 18.

Tabell 18 Anbefalte materialparametere for god frostbestandighet av betong. Utdrag fra Tabell 511 i Byggetalblad 520.067 (1999).

Materiale	Parameter	Grense/krav
Betong utsatt for rent vann	-Mengde luft	> 4,5 volumprosent
	-Avstandsfaktor (L)	< 0,25 mm
	-Masseforhold	< 0,60
	-PF (porebeskyttelsesfaktor)	> 0,20
Betong utsatt for salt	-Mengde luft	> 4,5 volumprosent
	-Avstandsfaktor (L)	< 0,18 mm
	-Masseforhold	< 0,45
	-PF (porebeskyttelsesfaktor)	> 0,25
	-Avskalling ved «Boråsmetoden»*	$\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ etter 56 sykler (3 % NaCl)

* NS-EN 206 stiller krav om maksimal avskalling på $0,5 \text{ kg/m}^2$ etter 56 sykler ved kvalifisering av nye sementer/bindemidler.

Begrepet «porebeskyttelsesfaktor» (PF) er definert som forholdet mellom makroporøsitet (luftporevolum) og total porøsitet. Makroporer er porer som ikke fylles ved kapillært sug, men kan bestemmes ved hjelp av trykkmetning i trykktank. Total porøsitet er altså summen av sug-porøsitet og makro-porøsitet. Eksempelvis vil det ved en PF-faktor på 20 % selv ved 100 % kapillær vannmetningsgrad være 20 % porer som ikke er vannfylte, og som dermed kan virke avlastende ved frysing.

Erfaring har vist at andel «mikroporer», dvs. luftporer < 0,30 mm har størst betydning, og det anbefales ofte at minst 2,0 % av betongen skal være i form av porer < 0,30 mm for å oppnå fullgod frostbeskyttelse, blant annet referert av Mortensvik et al. (2012).

Som et alternativ til «spesifiserende» krav som luftporer etc. kan det stilles funksjonskrav basert på ulike laboriemetoder. I Europa er NS-CEN/TS 12390-9 som er basert på den svenske «Borås-metoden» SS 137244 en av de vanligste metodene. Den velkjente metoden måler avskalling ved repeterte fryse/tine-sykler ned til $-20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ enten ved vann som frysemedium, eller mer vanlig med 3 % NaCl

løsning som frysemedium. Den svenske standarden (SS 137244) gir også et system for kravspesifikasjon som også er velkjent i Norge.

Borås-metodens «rating-system» for frostbestandighet, basert på avskallet masse etter 56 sykler, samt forholdet mellom avskallet masse ved 56 og 28 sykler (m_{56}/m_{28}):

- Meget god: $\leq 0,1 \text{ kg/m}^2$ avskalling etter 56 sykler
- God: $\leq 0,2 \text{ kg/m}^2$ avskalling etter 56 sykler
- God: $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$ avskalling etter 56 sykler, samtidig som forholdet $m_{56}/m_{28} < 2$
- Akseptabel: $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ avskalling etter 56 sykler, samtidig som forholdet $m_{56}/m_{28} < 2$
- Ikke akseptabel: dersom kravet om akseptabel frostbestandighet ikke oppfylles

I NS-EN 206 stilles det krav om frostprøving ved kvalifisering av nye sementer/bindemidler, kravet er da maksimal avskalling på $0,5 \text{ kg/m}^2$ etter 56 sykler testet med 3 % NaCl løsning som frysemedium.

Den europeiske standarden for frostprøving (NS-CEN/TS 12390-9) åpner imidlertid også for to alternative metoder:

- Terningmetoden: hvor 100 mm betongterninger neddykkes i rent vann eller 3 % NaCl løsning og utsettes for fryse/tine-sykler. Frostmotstand evalueres som avskallet masse etter 56 frostsykler. Frysetemperatur er $-15^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.
- CF/CDF-test: Basert på prøvestykker som ligger med prøveflaten vendt ned, enten i rent vann eller i NaCl-løsning. Frostmotstand evalueres som avskallet masse etter 28 (vann) eller 56 (NaCl-løsning) frostsykler. Frysetemperatur er $-20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Internasjonalt finnes det en rekke andre testmetoder, og også modifiserte versjoner av kjente tester. ASTM C 672 er en metode som er prinsipielt lik «Borås-metoden». Som frysemedium brukes her normalt 4 % CaCl_2 - løsning. Fryse-tine regimet er tilsvarende som for «Borås-metoden». Metoden benytter et «rating-system» basert på visuell vurdering av overflaten fra 0 (no scaling) og opp til 5: «severe scaling». Rating 2: «very slight scaling, no coarse aggregate visible» brukes ofte som «akseptkriterium» (Bektas et al 2012). I mange tilfeller rapporteres også avskallet masse på tilsvarende vis som for «Borås-metoden». I Canada (Ontario-provinsen) brukes en omtrent tilsvarende metode, MTO LS-412 (med 3 % NaCl-løsning), hvor akseptgrense for avskalling ligger på $0,8 \text{ kg/m}^2$ etter 50 fryse/tine-sykler.

De omtalte metodene måler avskalling, og brukes primært for å teste avskalling i nærvær av salt. Intern oppsprekking kan imidlertid også detekteres, eksempelvis som permanent ekspansjon eller som redusert dynamisk E-modul. En annen type metode som brukes primært for å teste intern oppsprekking er den amerikanske metoden ASTM C 666, hvor prøvestykker utsettes for 300 raske fryse/tine-sykler i rent vann, i temperaturintervall fra -18°C til 4°C . Metoden har vært mye brukt både i USA og i andre deler av verden. Dette er ifølge Sellevold (2009) en metode som kan gjøre stor intern skade på betonger som klarer seg veldig bra i «Borås-metoden». Ulike metoder gir med andre ord ulik «frost-belastning», og dette kan gjøre det vanskelig å sammenligne resultater fra ulike metoder.

Et ankepunkt mot mange prøvingsmetoder for frost(salt)-bestandighet er at de er utviklet for CEM I, og at i den grad lab-felt korrelasjon er dokumentert, er denne gyldig kun for CEM I. Ved bruk av disse metodene for betonger med slagg og flygeaske er det flere spørsmål knyttet til eksempelvis karbonatisering, herdetid, lagringsbetingelser og pre-kondisjonering, blant annet diskutert av Rønning (2012). Det er viktig å være klar over usikkerheten og mangelen på felt-lab korrelasjon som foreligger når det gjelder «nye sementer». Se ellers Kapittel 6.6.1 hvor svenske erfaringer mht. lab-felt korrelasjon for ulike bindemidler er omtalt.

6.3 Luftporer – stabilitet og effekt på frostmotstand

Positiv effekt av luftinnføring mht. fryse/tinmotstand er dokumentert også for betonger med flygeaske, se blant annet Jacobsen & Lahus (2001) og Bilodeau & Malhotra (1993). Stark & Ludwig (1997) refererer imidlertid til tysk forskning som viser at luftinnføring ikke forbedrer frost/salt-motstanden for slaggbetonger, selv ved så lave avstandsfaktorer som 0,12 mm og i et annet tilfelle 0,04 mm. Dette er i tråd med svensk forskning som viser minimal effekt av luftinnføring for CEM III/B med ca. 70 % slag (Utgenannt & Petersson 2012).

Luftinnføring i betong er et svært komplisert samspill mellom en rekke parametere som betongsammensetning, sandkurvens gradering, sementtype, type plastiserende og luftinnførende tilsetningsstoff etc. I tillegg er det kjent at type blandemaskin og blandedprosedyre i seg selv kan ha stor betydning. Det er også kjent at luftinnholdet kan endre seg under transport og pumping. Dette vil som oftest gi seg utslag i redusert mengde luft, men luften kan også øke under transport og pumping. For beskrivelse av mekanismer for luftinnføring i betong henvises det til Du & Folliard (2005) og Jacobsen et al. (2012).

Betonger med flygeaske og slag krever generelt høyere dosering av luftinnførende tilsetningsstoff (L-stoff), opp til 5 ganger doseringsnivå for flygeaskebetong sammenlignet med tilsvarende betong med CEM I (Du & Folliard 2005, Malhotra & Rameizanpour 1994). Noe av effekten kan forklares ved at disse materialene ofte har høyere spesifikke overflater, blant annet vil hule flygeaskepartikler bidra sterkt til dette. For flygeaske regnes imidlertid mye av problemstillingen til luftinnføring å være knyttet til gjenværende karbon fra ufullstendig forbrenning av kull (Jacobsen et al. 2012). Parameteren «Loss On Ignition» (LOI) brukes som regel som en indikator på mengde ubrent karbon. Karbon reduserer effekten av luftinnførende stoffer fordi mye av L-stoffet vil adsorberes av karbon.

Giergiczny et al. (2009) har i en studie påvist at økende mengde slag (opp til 57 % slag) førte til dårligere kvalitet på luftporestystemet med redusert spesifikk overflate. Økt mengde slag ga seg også utslag i økt avskalling.

Jacobsen et al. (2012) har gjort en litteraturstudie av forhold som innvirker på stabilitet av luft i fersk betong, og viser her til at bortsett fra de kjente problemene med variabelt karboninnhold er det i liten grad kjent hvilken effekt flygeaske har på luftstabilitet. Stabilitet av betongens luftporesystem er imidlertid et generelt problem, blant annet refererer artikkelen til studier som viser at pumping av betong i mange tilfeller gir reduksjon av luftinnhold, og også redusert mengde fine luftbobler. Tilsetning av silikastøv virker stabiliserende på luftporesystemet både i forhold til betong med CEM I og betonger med flygeaske. Langley & Leaman (1998) har rapportert at det generelt oppnås noe høyere avstandsfaktorer ved bruk av flygeaske, mye av dette skyldes ifølge forfatterne bruk av høyere slump for å kompensere for flygeaske-betongenes noe høyere grad av kohesivitet.

Praktisk erfaring fra betongproduksjon i Norge har vist at det er fullt mulig å oppnå stabil luft i betonger med flygeaske, men at dette i praksis er noe vanskeligere å få til enn for betonger med rene Portlandsementer. Det kreves generelt høyere fokus på materialsammensetning og blandedprosedyrer enn ved ren Portlandsement. Forfatterens egne erfaringer fra Bjørvika senketunnel viste at nødvendig dosering L-stoff varierte med en faktor på 3 i løpet av prosjektperioden, hovedsakelig som følge av variasjoner i flygeaske-sementen.

Rescon Mapei (Mortensvik et al. 2012) har gjennomført forsøk med flere serier med fullskala-betonger hvor det er tatt ut betong ved ulike tidspunkter, henholdsvis etter blanding, etter transport og etter pumping og utstøping. I Tabell 19 er resultater fra en av disse seriene gjengitt. Disse resultatene viser at luftporestrukturen uttrykt ved avstandsfaktor generelt er blitt forbedret ved transport og pumping/vibrering, og at den forbedrede porestrukturen har gitt seg utslag i forbedret frostmotstand. Studien viser videre en relativt god sammenheng mellom porestruktur målt på herdet betong (mikroskopering av planslip) og porestruktur målt på fersk betong ved såkalt «air-void analyzer» (AVA).

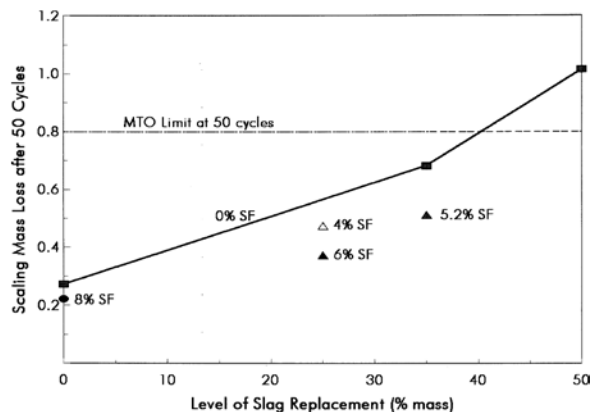
Tabell 19. Luftmengder og luftporekarakteristikk i fersk og herdet betong samt resultater fra fryse/tine-forsøk. SV-40 betong med masseforhold 0,36 og Standard FA-sement. L-stoff av kombinert tensid og talloljederivat. A-målinger rett etter blanding, B-målinger etter transport, D-målinger etter pumping og vibrering, dvs. tatt ut fra konstruksjonsdel etter utstøping. Fra Mortensvik et al. 2012.

Test Method	Air pressure meter	Air-void Analyzer 3000			Microscopical scanning			Freeze-Thaw 56 cycles
Test sample #	% air volume	% air volume	Specific surface mm ² /mm ³	Spacing factor mm	% air volume	Specific surface mm ² /mm ³	Spacing factor mm	Scaling kg/m ²
1A	2.6	1.8	15.8	0.33	2.6	20.5	0.53	1.05
1B	4.6	4.2	21.2	0.33	2.9	19.3	0.27	0.38
1D	4.7	3.8	21.4	0.19	3.2	32.5	0.28	0.25
2A	3.1	3.0	17.6	0.28	3.0	22.2	0.38	0.35
2B	4.7	4.7	21.6	0.25	2.9	24.7	0.25	0.29
2D	5.3	5.2	28.8	0.18	4.2	29.0	0.18	0.20

6.4 Laboratorieforsøk flygeaske og slag

Årskog og Gjorv (2007, 2010) har rapportert fryse/tine-forsøk for betonger med tysk slaggsement CEM III/B med 70 % slag i forbindelse med Tjuvholmen-prosjektet. Betongene ble proporsjonert med masseforhold på 0,37 og 10 % silikastøv. Betongene ble testet både i henhold til Borås-metoden (SS 13 72 44-3) og etter den tyske CDF-metoden. 3 betongvarianter ble testet: uten luftinnføring, med 3 % luft og med 6 % luft. Alle 3 betongvariantene oppnådde svært gode resultater testet etter begge metodene. Oppnådd avskalling etter 56 frostsyklus i Boråsmetoden (med 3 % NaCl løsning som frysemedium) var henholdsvis 0,18, 0,16 og 0,14 kg/m² for betonger uten luft med 3 % luft og med 6 % luft. Luftinnføringen hadde altså i dette tilfellet liten betydning i og med at betongen var dokumentert til å være frostbestandig selv uten luftinnføring.

Effekten av økt mengde slag på salt/frost avskalling vises i Figur 48 (Bleszynski et al. 2002). Alle betongene vist i figuren hadde et masseforhold på 0,42 og luftmengde på minst 5 %. Det er en tydelig tendens til økt avskalling ved økende innblanding av slag, men mengde slag måtte opp i ca. 40 % før «akseptgrensen» på 0,8 kg/m² ble overskredet. I tillegg viste studien en generelt positiv effekt av silikastøv.

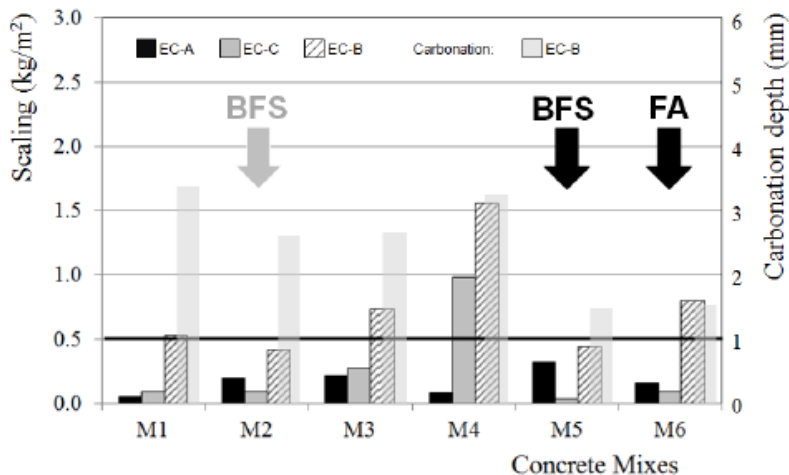


Figur 48 Salt/frost avskalling etter 50 sykler. Effekt av slag og silikastøv. Fra Bleszynski et al. 2002.

Stark & Ludwig (1997) har vist at frostbestandighet (frysing og tining i rent vann, 100 syklar +/- 20 grader, ultralydhastighet som mål på skade) for betong med masseforhold 0,5 uten luftinnføring kan relateres direkte til hydratiseringsgrad ved oppstart av forsøkene. Slaggbetonger (med masseforhold 0,50) trenger en hydratiseringsgrad på 50-60 % for å oppnå et tilstrekkelig fint poresystem til å være frostbestandige. Hvor lang tid dette tar avhenger av type sement og mengde slagg, men for betonger med masseforhold på 0,50 vil det kunne ta fra i størrelsesorden 3-4 uker til flere måneder ut fra data i artikkelen. Finheten av poresystemet ved 50 % hydratasjonsgrad tilsvarer omtrent 85-90 % hydratasjonsgrad for CEM I. For hydratasjonsgrader > 50 % er altså poresystemet hos slaggsementer vesentlig finere enn for CEM I.

Stark & Ludwig (1997) har vist at frost/salt-motstanden for slaggbetonger i svært stor grad er avhengig av fortutgående karbonatisering. Økt karbonatiseringsdybde gir en sterk reduksjon av frostmotstand (målt ved såkalt CDF-metode). Dette forklares dels ved at det karbonatiserte sjiktet i slaggbetonger blir mer porøst, fordi C-S-H-fasen blir karbonatisert og dermed mer porøst. I tillegg pekes det på at ved karbonatisering dannes det metastabile karbonat-faser som vateritt og aragonitt som gir redusert frost/salt-motstand. Det er flere eksempler fra litteraturen på at karbonatisering kan gi redusert frostmotstand for betonger med slagg, se også avsnitt 6.6.1.

Ferreira et al. (2012) har gjennomført en studie av salt/frost motstand for betonger med ulike bindemidler utsatt for ulike eksponeringsbetingelser før fryse/tine-prøvingen. Resultatene er vist i Figur 49, mens forklaring med hensyn til bindemidler og eksponeringsbetingelser er gitt i tekst under figuren. Som vist i Figur 49 ga alle betonger herdet etter standard betingelser (EcA) gode resultater som alle ligger under grensen på 0,5 kg/m² etter 56 syklar. Blanding M5 med 50 % slagg hadde høyest avskalling. For karbonatisert betong (EcB) har betongen med 50 % slagg (M5) klart seg bra mht. avskalling, og er den eneste betongen i tillegg til betong M2. Testing av aldret betong hvor de ytterste 10 mm karbonatisert betong er fjernet (EcC) ga for betonger uten slagg og FA noe høyere avskalling enn for standard betingelser (EcA). Betongene M5 og M6 (med henholdsvis slagg og flygeaske) fikk på den annen side forbedret motstand (redusert avskalling) ved aldring. Merk ellers at M5 og M6 har gitt de laveste karbonatiseringsdybdene, betydelig lavere enn tilsvarende betonger med CEM I.



Figur 49 Frost-salt avskalling etter 56 syklar for betonger utsatt for 3 ulike eksponeringer, se forklaring i tekst. I tillegg gis karbonatiseringsdybder (for EC-B) etter ca. 1,3 års karbonatisering. Fra Ferreira et al. (2012).

Forklaring til Figur 49: Bindemidler og oppnådd avstandsfaktor i herdet betong (L)

- M1: CEM 1 42,5 N-SR. L = 0,35 mm
- M2: CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N (7% slag, 6% kalkstein) L = 0,28 mm
- M3: CEM II/A-LL 42,5 R (1 % slag, 6 % kalkstein), L = 0,24 mm
- M4: CEM I 52,5 R, L = 0,33 mm
- M5: Som M3, men med 50 % slag, L = 0,18 mm
- M6: Som M3, men med 24 % flygeaske, L = 0,30 mm

Proporsjonering av betonger: Masseforhold 0,42 for alle betonger unntatt M6 som hadde 0,45. Varierende vann og bindemiddelmengder. Merk at tilsatt slag har k-faktor 0,6 og tilsatt flygeaske har k-faktor 0,4.

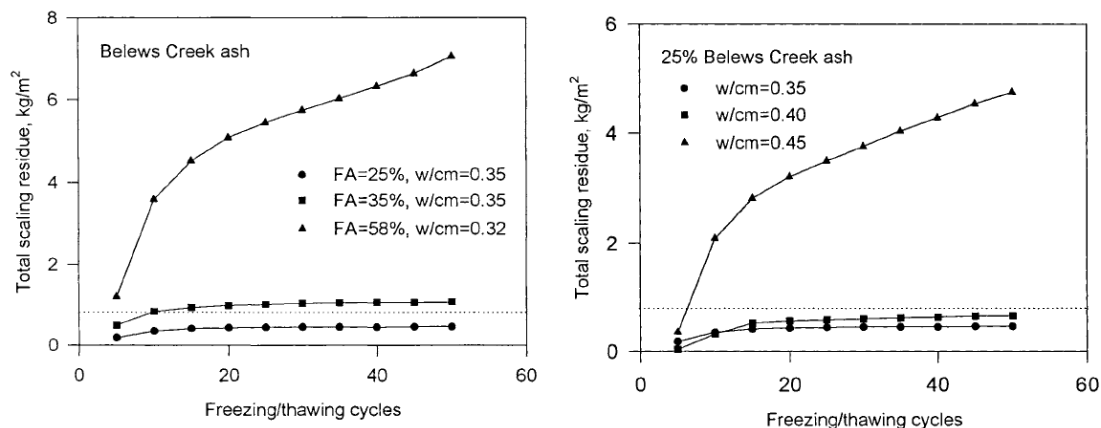
Eksponeeringsbetingelser i henhold til følgende notasjon:

- EcA: Standard lagringsbetingelser og prøving iht. CEN/TS 12390-9 med 3 % NaCl-løsning
- EcB: Lagring ved 65 % RF ved 20°C i ca. 1,3 år, deretter tilsvarende prøving som EcA
- EcC: Lagring ved 65 % RF ved 20°C i ca. 1,3 år, deretter ble et 10 mm sjikt saget av for å fjerne karbonatisert betong. Deretter tilsvarende prøving som EcA.

Det er flere ting som kan være med på å forklare forskjellene fra Figur 49. Oppnådd avstandsfaktor var svært ulike for betongene, fra 0,18 for M5 til 0,33 for M4. En annen viktig faktor for betongene M5 og M6 er at det ble benyttet k-faktorer på henholdsvis 0,6 og 0,4 for tilsatt slag og flygeaske. Resultater for tilsvarende mengder slag og flygeaske med k-faktor på 1 (f.eks. ved bruk av blandingssementer) ville kunne gitt andre resultater, og antagelig betydelig lavere motstand mot frost/salt avskalling.

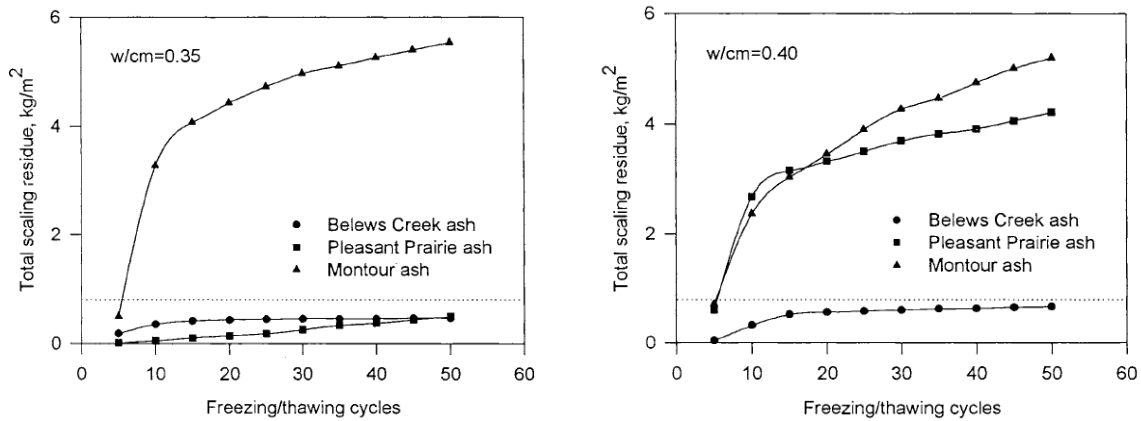
Effekten av k-faktor er vist tydelig av Lindvall et al. (2012), som har vist at ved bruk av k-faktor på 0,4 har betonger med opptil 25 % tilsatt flygeaske tilsvarende frostbestandighet som CEM I (ved like masseforhold), mens ved benyttet k-faktor på 1 er frostbestandigheten noe redusert.

Som påpekt tidligere er det en klar sammenheng mellom masseforhold og motstand mot frost/salt avskalling. Både betonger med og uten flygeaske gir generelt lavere frostmotstand ved økende masseforhold. Zhang et al. (1989) har vist at selv betonger med ren Portlandsement krever et masseforhold rundt 0,40 eller lavere for å gi tilfredsstillende frostbestandighet når de testes i henhold til ASTM C672. Men selv ved lave masseforhold er det likevel en klar tendens til at økt innblanding av flygeaske gir redusert motstand mot avskalling i slike tester. I Figur 50 (venstre) vises resultater for betonger med flygeaskemengder i intervallet 25-58 %. Den rene effekten av masseforhold ved 25 % flygeaske vises til høyre i Figur 50.



Figur 50 Effekt av mengde FA (venstre) og masseforhold (høyre) på salt/frost avskalling iht. ASTM C672. Alle betonger herdet i 28 døgn. Luftmengde > 5,2 % for alle betongene. k-faktor er lik 1,0 for tilsatt flygeaske. Fra Zhang et al. (1998).

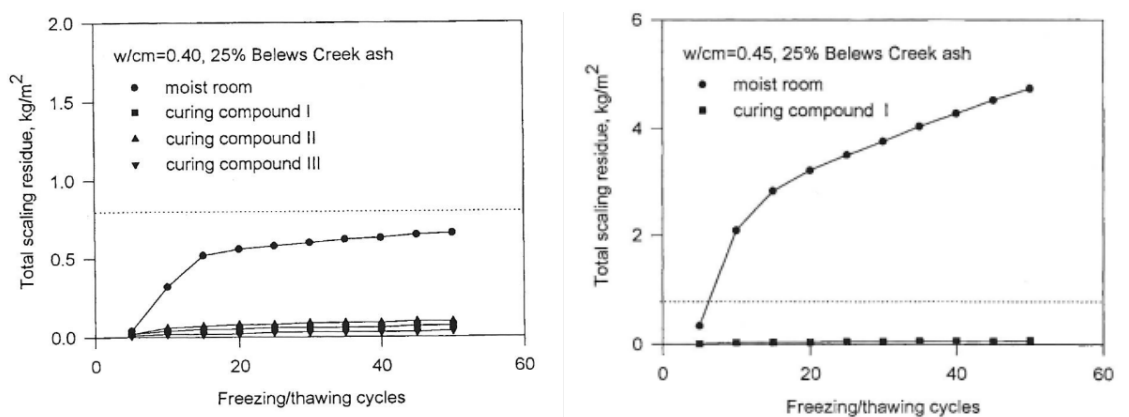
Også type flygeaske har stor betydning for salt/frost motstand, dette er vist i Figur 51 for to ulike masseforhold. Flygeasken som kommer best ut (Belews Creek) er en type F aske (silikatholdig flygeaske iht. EN-terminologi). Også asken som kommer dårligst ut (Montour) er en type F aske. Montour-asken er marginalt grovere, og har ellers betydelig høyere LOI (som indikerer høyere mengde uforbrent karbon). Pleasant prairie- asken som legger seg mellom de to øvrige er av type C, dvs. det er en flygeaske med relativt høy mengde CaO.



Figur 51 Effekt av ulike typer flygeaske på salt/frost-avskalling iht ASTM C672. 25 % flygeaske i % av totalt bindemiddel. Mengde luft > 5,2 % for alle betongene. Fra Zhang et al. 1998.

Studier ved bruk av elektronmikroskopi (BEI) har påvist at etter 28 døgns herding er det en porøs overgangssone rundt flygeaskepartiklene, mens det etter 180 døgn har skjedd en markant fortetting. Flygeaske-betongenes betydelig større porøsitet og lavere styrke ved tidlig alder (økende ved økende mengde flygeaske) antas å være en viktig årsak til den lavere frostmotstanden (Zhang et al. 1998). Dette indikerer at økt modenhet av flygeaskebetonger vil kunne gi betydelig forbedret frostmotstand.

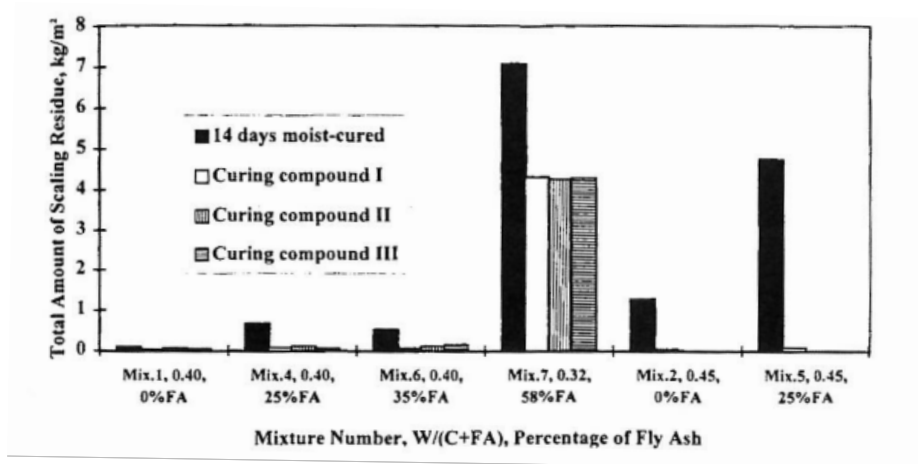
Data presentert i Figur 50 og Figur 51 er for betonger som har vært fuktherdet ved 100 % RF i 14 døgn og, deretter lagret i laboratorieluft fram til 28 døgns alder. Et antall av betongene fra denne studien ble imidlertid påført herdemembraner av ulike typer i tidlig fase og deretter herdet i laboratorieluft fram til 28 døgns alder. Betongene med påført herdemembran viste betydelig bedre frostmotstand enn de fuktherdede betongene, se Figur 52. For betongen med masseforhold 0,45 og 25 % flygeaske var forbedringen i frostmotstand ved påføring av herdemembran ekstrem.



Figur 52 Effekt av herding ved 100 % RF kontra påføring av herdemembran og herding i laboratorieluft for betonger med 25 % flygeaske ved masseforhold på henholdsvis 0,40 (venstre) og 0,45 (høyre). Luftmengde > 5,2 % for alle betongene. Fra Zhang et. al (1998).

Forfatterne gir en mulig forklaring på den gunstige effekten av herdemembran ved at denne fremgangsmåten gir en mer gradvis uttørring av overflaten enn metoden med fuktherding påfulgt av lagring i laboratorieluft, da sistnevnte prosedyre forventes å gi høyere grad av mikroriss.

En studie av Bilodeau et al. (1998), se Figur 53, bekrefter den positive effekten av herdemembran i forhold til herding ved 100 % RF. Effekten er tydelig for de fleste av betongene. Studien viste ellers at betonger med flygeaskemengde på 35 % og masseforhold 0,40 klarte seg bra i ASTM C 672, dvs. hadde avskallet masse <math>< 0,8 \text{ kg/m}^2</math> etter 50 sykler. På den annen side ser vi at betongen med 58 % flygeaske og masseforhold på 0,32 har klart seg dårlig i denne testen. Alle betongene i studien var luftinnførte, og det er dokumentert spesifikk overflate og avstandsfaktor for betongene. Oppnådde avstandsfaktorer var generelt svært gode med en spredning fra 0,11 til 0,18 mm.



Figur 53 Effekt av betongsammensetning og herdebetingelser på frostmotstand. Fra Bilodeau et al (1998).

Den samme studien (Bilodeau et al. 1998) viste ikke noen generell forbedring ved fuktherding utover 14 døgn. For flere av betongene med flygeaske forårsaket fuktherding utover 14 døgn (til 28 eller 56 døgn) en økning i avskallingen. Lufttørring av betong før prøving ga en signifikant negativ effekt på frostmotstand, spesielt for flygeaske-betongene.

Naik et al. (1995) har i en studie testet betonger med henholdsvis 40 % innblanding av flygeaske type F og 50 % flygeaske type C. Referansebetongen var med 20 % innblanding av flygeaske av type C. Resultatene gjengis kort nedenfor:

- Frostprøving iht. ASTM C666, 300 frostsykler: Betongen med 40 % flygeaske klarte seg meget tilfredsstillende, og best av alle betonger. Varianten med 50 % klasse C flygeaske hadde marginalt dårligere frostbestandighet, mens betong med 20 % klasse C flygeaske var signifikant dårligere. Vurderingen var basert på måling av relativ dynamisk E-modul, resonansfrekvens og pulshastighet.
- Salt/frost- prøving i henhold til ASTM C 672 viste omtrent tilsvarende rating som for ren frostprøving, hvor variantene med 20 % (type C) og 40 % (type F) flygeaske oppnådde omtrent like resultater (klasse 2: «slight to moderate scaling», med avskalling på ca 0,6 kg/m²). Betongen med 50 % (type C) flygeaske oppnådde markant dårligere resultater, med «rating» på 4 og avskalling på over 2 kg/m².

Langley & Leaman (1998) har i en studie vist at betonger med 56 % flygeaske av type F og masseforhold på henholdsvis 0,30 og 0,35 har noe bedre frostmotstand (testet i henhold til ASTM C666) enn tilsvarende referansebetonger uten flygeaske, dette på tross av at det er anmerket at flygeaskebetonger

ofte har noe høyere avstandsfaktor (L) enn for tilsvarende betonger med ren Portlandsement. Det er imidlertid ikke angitt avstandsfaktorer for denne studien. Det er ikke rapportert forsøk med salt-frost avskalling for betongene i denne studien. Det ble imidlertid anmerket at det var noe overflateavskalling etter 50 sykler for flygeaskebetongene, men at det ikke forekom videre avskalling fra 50 til 300 sykler.

Jacobsen & Lahus (2001) har rapportert en studie av frostmotstand for henholdsvis valsebetong til damkonstruksjon (masseforhold 0,53 og flygeaskemengde 67 % av bindemiddel, men med bindemiddelmengde på kun 180 kg/m³), samt en betong med masseforhold på 0,50 og flygeaskemengde på 30 % av totalt bindemiddel – total bindemiddelmengde på 270 kg/m³). Valsebetongen uten luft viste dårlig frost-motstand (målt ved UPV og dilatasjon), mens luftinnføring forbedret frostmotstanden. Normal-betongen med 30 % flygeaske viste svært god frostmotstand, tilsvarende som for betong med CEM I. Prøvingen ble utført på luftinnførte betonger med god luftporekarakteristikk. Prøvingen iht. Borås-metoden ble imidlertid utført med rent vann, og ikke ved 3 % NaCl-løsning som er en langt «tøffere» metode.

6.5 Laboratorieresultater fra prosjekter i Statens vegvesen

Det har vært gjennomført fryse/tine-forsøk for en rekke betonger med ulike mengder flygeaske, både fullskalablandede betonger fra utbyggingsprosjekter, og laboratorieblandede betonger fra FoU-prosjekter. Når det gjelder betonger med slagg, spesielt høyere slaggmengder > 33 %, er det imidlertid få tilgjengelige resultater.

I forbindelse med forundersøkelsene til Bjørvika-prosjektet ble det gjennomført frostprøving. Hovedresultatene er sammenstilt i Tabell 20. Flygeaskebetongene hadde dårligere frostmotstand enn referansebetongen. Flygeaskebetongene hadde imidlertid et masseforhold på 0,45 mens referansebetongen SV-40 (uten flygeaske) hadde et masseforhold på 0,40. Det ble benyttet k-faktor for tilsatt flygeaske på 1,0.

Tabell 20 Frost/salt bestandighet iht. SS 137244. Masseforhold: 0,40 for SV-40, 0,45 for øvrige betonger. K-faktor for flygeaske = 1,0. Mengde flygeaske angitt som FA/(FA+c). Resultater fra Larsen (2004).

Betong	Avskalling, 56 sykler	M56/m28	Vurdering iht. SS 137244
SV-40, ANL	0,12	1,76	God
29 % flygeaske	0,50	1,39	Akseptabel
38 % flygeaske	1,26 (0,52 – 0,53 - 0,91)*	2,10	Ikke akseptabel
38 % flygeaske, feltprodusert	0,60	1,54	Akseptabel

*Resultater fra tidligere prøvingsserier med samme betongresept

Rapporten angir ikke data for kvaliteten av luftporesystemet, bortsett fra for betongserien merket med * med 38 % flygeaske. For denne serien ble det ved analyser av planslip dokumentert lavt luftinnhold og høye avstandsfaktorer (1,75 og 7,27 mm).

Frostprøving med nederlandsk slaggsment ble startet opp, men resultater måtte forkastes pga. feil ved prøving.

I forbindelse med selve produksjonen av betongelementene til Bjørvika senketunnel ble det gjennomført analyser av porestruktur og frostmotstand fra prøver som ble boret ut fra prøvestøpte elementer med 2 alternative betonger. Betongen ble støpt i november 2005, og prøvene ble boret ut etter ca. 14 dagers

herding. Frostprøving ble gjennomført ca. 14 dager senere enn det, dvs. at betongene var altså omlag 1 måned gamle på prøvingstidspunktet.

Tabell 21 Luftinnhold og luftporestruktur dokumentert ved analyse av planslip. Betongserie merket 30 med flygeaskemengde på 23 %, betongserie merket 50 med flygeaskemengde på 31 % FA/(FA+c). Masseforhold 0,45 (k-faktor på 0,7 for flygeaske). Fra Smeplass et al. (2010).

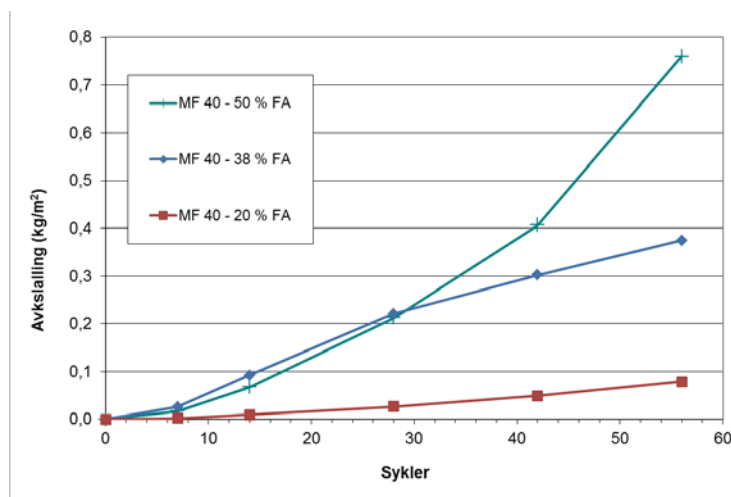
Serie mrk	30			50		
	F1	F2	Middel	F1	F2	Middel
Borkjerne mrk						
Totalt luftinnhold, %	6,1	5,8	6,0	4,4	2,7	3,6
Spesifikk overflate, mm ⁻¹	17	17	17	25	21	23
Avstandsfaktor, mm	0,27	0,27	0,27	0,21	0,31	0,26

Tabell 22 Målt avskalling opp til 56 fryse/tine-sykler, 3 % NaCl-løsning som frysemedium. Betongserie merket 30 med flygeaskemengde på 23 %, betongserie merket 50 med flygeaskemengde på 31 % FA/(FA+c). Masseforhold 0,45 (k-faktor på 0,7 for flygeaske). Fra Smeplass et al. (2010).

Serie		30	50
Avskalling i kg/m ² etter (standardavvik)	7 vekslinger (m ₇)	0,01 (0,01)	0,04 (0,02)
	14 vekslinger (m ₁₄)	0,02 (0,01)	0,15 (0,04)
	28 vekslinger (m ₂₈)	0,04 (0,01)	0,33 (0,09)
	42 vekslinger (m ₄₂)	0,07 (0,01)	0,43 (0,12)
	56 vekslinger (m ₅₆)	0,08 (0,02)	0,56 (0,19)
m ₅₆ /m ₂₈		1,78	1,67

Det er markant forskjell i oppnådd avskalling som vist i Tabell 22, betongen med 23 % flygeaske klassifiseres som «svært god», mens betongen med 31 % flygeaske klassifiseres som «god». Betongen med 23 % flygeaske hadde et betydelig høyere luftinnhold enn varianten med mer flygeaske, men spesifikk overflate var lavere og indikerer at 23 % varianten hadde en grovere luftporestruktur enn 31 % varianten.

I forbindelse med en bachelor-oppgave ved Universitetet i Agder (Ulstein et al. 2011) ble det på Statens vegvesens sentrallaboratorium gjennomført en begrenset studie av frost/salt-avskalling for 3 betonger. Disse betongene hadde alle masseforhold på 0,40, 5 % silikastøv, ca. 5 % luft og flygeaskemengder i intervallet 20-50 % (flygeaske i % av flygeaske + sement). Det ble benyttet k-faktorer på 1,0 for flygeaske og 2,0 for silikastøv. Resultatene fra prøvingen vises i Figur 54. Betongen med 20 % flygeaske oppnådde svært liten avskalling, og klassifiseres som «svært god» iht. SS 137244. Betongen med 38 % flygeaske ga en markant høyere avskalling og klassifiseres som «god». For betong med 50 % flygeaske var avskallingen etter 56 sykler 0,75 kg/m², men økningen i avskalling fra 28 til 56 sykler gjør at denne betongen klassifiseres som «ikke akseptabel» iht. klassifiseringssystemet gitt av SS 137244.



Figur 54 Kumulativ salt/frost- avskalling for betonger med 3ulike nivåer flygeaske (i % av FA + sement). Upubliserte resultater fra egen prøving ved Sentrallaboratoriet. Betongene ble støpt i bachelor-oppgave ved Universitetet i Agder (Ulstein et al. 2011).

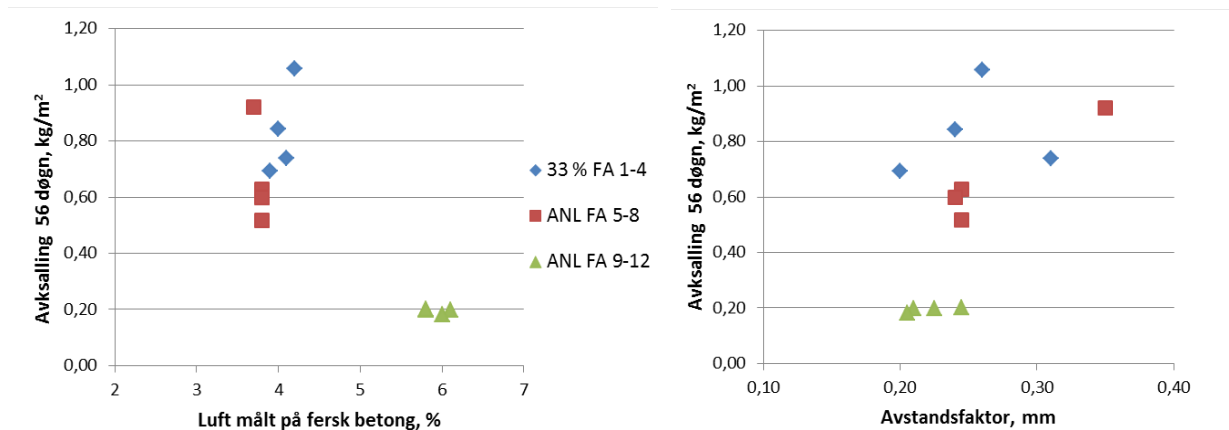
For å få egne data på intern spredning både for oppnådd luftporestruktur i herdet betong, samt oppnådd motstand mot frost/salt-avskalling ble det i løpet av 2013 gjennomført forsøk hvor det ble tatt ut 4 betongprøver fra samme billass på ulike tidspunkt i leveransen. Dette ble gjennomført for 2 ulike betongresepter:

- **Resept 1:** Betong med Anlegg FA-sement og tilsatt flygeaske til 33 % flygeaske. Masseforhold 0,37 ved k-faktor 1,0 for flygeaske (merket prøve 1-4 i Figur 55).
- **Resept 2:** Betong med Anlegg FA-sement, masseforhold 0,39. (2 serier, merket 5-8 og 9-12 i Figur 55).

For resept 2 ble altså dette repetert, slik at det ble tatt betong fra 2 billass med ca. 3 måneders mellomrom. Oppnådd luftmengde for de to uttakene av resept 2 ble utilsiktet ganske forskjellige, med henholdsvis i underkant av 4 % og rundt 6 %. Variasjonene ligger imidlertid innenfor det som er normalt variasjonsområde.

Prøvene ble tatt ut i løpet av den tiden det tok å tømme hver betongbil, og prøvestykker ble støpt ut på stedet. Det ble gjennomført frostprøving, fasthetsprøving samt karakterisering av betongens luftporestruktur. Frostavskalling som funksjon av målt luft i fersk betong, samt som funksjon av oppnådd avstandsfaktor (L) i herdet betong vises i Figur 55.

Dataene i Figur 55 (venstre) viser at betongen med høyest luftmengde (resept 2 med 6 % luft, serie 9-12) har oppnådd best resultater mht. avskaling, og at den interne spredningen for denne serien er svært lav. De to andre seriene som begge har betydelig lavere luft har på den annen side betydelig høyere gjennomsnittlig avskalling, og ikke minst langt høyere intern spredning. Høyre del av figuren viser sammenheng mellom avskalling og avstandsfaktor. Det er ingen klar sammenheng mellom avstandsfaktor og avskalling i datasettet, og heller ikke noen klar sammenheng mellom spesifikk overflate og avskalling (ikke vist i plott). Resultatene viser tydelig at spredningen i avstandsfaktor innenfor en og samme betongserie kan være relativt stor.



Figur 55 Sammenheng mellom luft i fersk betong og avskalling ved «Boråsprøving» med 3 % NaCl (venstre), sammenheng mellom oppnådd avstandsfaktor og avskalling (høyre). Serie 1-4 med 33 % FA, Serie 5-8 og 9-12 med ANL FA. Betongene hadde herdet i ca. 2 måneder i vannbad før prøveprepareringen. Alle eksponerte overflater var sagflater. (Pedersen 2014)

I forbindelse med prosjektet Møllenberg løsmassetunnel (Bjøntegaard 2015) ble det boret ut sylindere fra 6 måneder gamle felt-betonger, disse ble testet i henhold til «Borås-metoden» med 3 % NaCl-løsning som frysemedium. Fasthet ved utboring var: 60,1 – 40,8 og 45,5 MPa for betonger med henholdsvis 20, 33 og 50 % flygeaske FA/(FA+C) (sylinderfasthet for utborede sylindere med $h/d = 2$ etter 6 måneders herding i felt). Det var som vi ser av resultatene i Tabell 23 svært store forskjeller i salt/frost-avskalling. Betongen med ren Anlegg FA-sement (20 % FA) blir klassifisert som «god» med 0,19 kg/m² avskalling. De to øvrige klassifiseres som «ikke akseptable». Betongen med 50 % flygeaske hadde hele 3,66 kg/m² avskalling. Luftporestrukturen for betongen med høyest flygeaskemengde ser tilsynelatende svært god ut, men kommentaren fra laboratoriet som gjennomførte analysene (se tekst under tabellen) viser at det er betydelig usikkerhet knyttet til analyseresultatene.

Betongen ble støpt ut sent om høsten, og med en etterfølgende meget kald vinter var det dårlige herdebetingelser for betonger. Det er gjort beregninger som viser at modenhetsalder for betongen var 3 måneder på prøvingstidspunktet (mens reell alder altså var 6 måneder).

Tabell 23 Frostprøving og luftporekarakteristikk for kjerneprøver fra 6 måneder gamle støpte felt-betonger (Runde 1). Masseforhold 0,39 – 0,41 for betongene ved $k=1$ for flygeaske. Frostprøving iht. «Borås-metoden» med 3 % NaCl-løsning. Fra Bjøntegaard 2015.

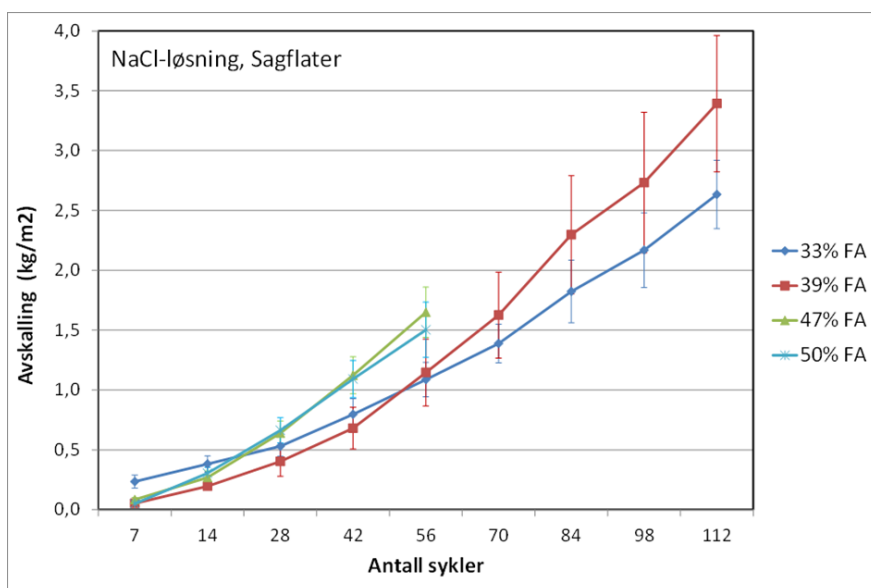
	Betonger (total mengde flygeaske)		
	ANL FA (20)	33	50
FA/(C+FA), %			
Avskalling 28 sykler, kg/m ²	0,12	1,06	1,91
Avskalling 56 sykler, kg/m ²	0,19	1,52	3,66
56/28 sykler	1,58	1,44	1,92
Luftinnhold, %	4,1	4,2-4,3	1,8-5,5
Spesifikk overflate, mm ⁻¹	39	23-25	47-70
Avstandsfaktor, mm	0,15	0,22-0,24	0,10-0,12

Kommentar fra VBM-laboratoriet A/S i epost til Sintef (forkortet og oversatt fra dansk), gjelder betonger med 50 % flygeaske:

«Prøvene i dette settet er meget forskjellige, og resultatene er derfor rapportert som enkeltverdier. I disse planslipene er det mange meget små porer, som ikke er kuleformede. Det er mulig at disse ikke er luftporer i alminnelig forstand, men metoden kan ikke skille mellom porene etter deres form, og når de

er veldig små (ca. $<30\mu\text{m}$) kan de heller ikke sorteres manuelt. Det er derfor mulig at det er talt for mange porer, og at de oppgitte verdier er «for gode». Kun en analyse av tynnslip kan avgjøre dette.»

For å få data på hvordan økt herdetid påvirker bestandighetsmessige egenskaper, ble det ca. et halvt år senere tatt ut prøver av 4 betonger, hvor 2 av betongene var tilsvarende de som er vist i Tabell 23 (33 % og 50 %), i tillegg til 2 andre betonger med flygeaskemengder i intervallet mellom disse to. Resultatene for fryse/tine-forsøkene fra runde 2 (for sagflater) er vist i Figur 56. Økende FA-dosering gir tendens til økende avskalling, men sammenhengen er ikke helt systematisk. Alle disse betongene blir klassifisert som «ikke akseptable» iht. det svenske klassifiseringsystemet. For betong med 50 % FA er resultat i runde 2 forbedret sammenlignet med runde 1, noe som indikerer at den økte herdetiden kan ha gitt en positiv effekt.



Figur 56 Resultater fra fryse/tine-forsøk med 3 % NaCl (runde 2, betonger med 11-15 måneders alder). Prosent flygeaske beregnet som $FA/(C+FA)$. Fra Bjøntegaard 2015.

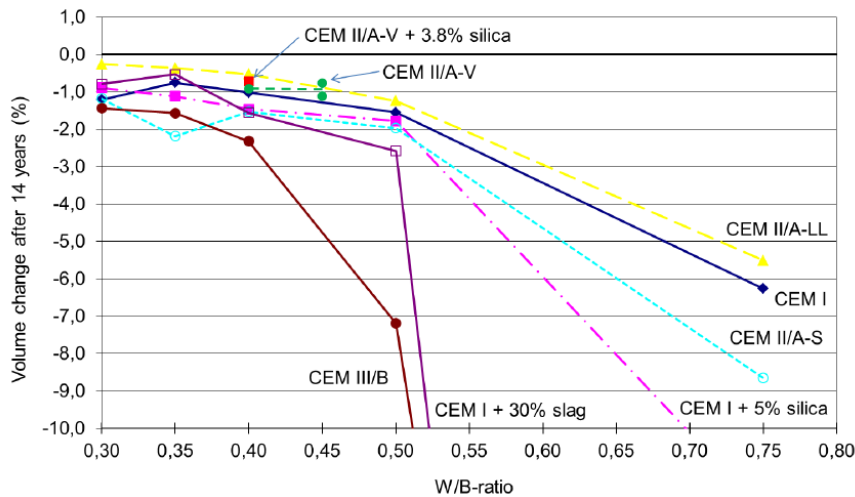
I tillegg til fryse/tine-forsøk i 3 % NaCl-løsning ble det for alle betongene vist i Figur 56 også gjennomført fryse/tine-forsøk med rent vann som frysemedium. Alle betongene, både med sagflater og støpehud, klarte seg svært bra i den prøvingen. Alle betongene hadde avskalling $<0,07\text{ kg/m}^2$ etter 56 sykler.

6.6 Feltforsøk og kombinerte lab- og feltforsøk

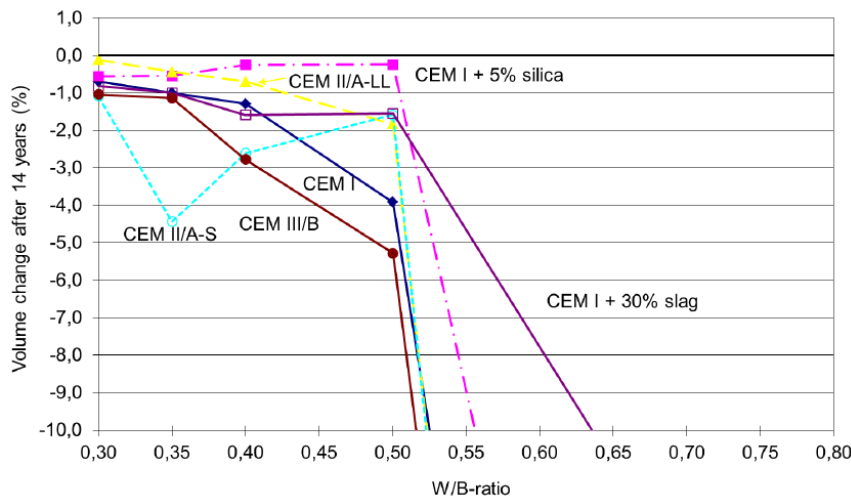
6.6.1 Erfaringer fra Sverige

Utgenannt & Petersson (2012) har rapportert en omfattende felt- og laboratoriestudie av betonger med ulike bindemidler ved masseforhold fra 0,30 til 0,75 (bortsett fra for betongene med CEM II/A-V som ble testet med masseforhold 0,40 og 0,45). Figur 57 gir en oppsummering av frostmotstand for betongprøver utplassert ved saltet motorvei etter 14 års felteksponering. Frostmotstand er her uttrykt ved volumendring. Som forventet er det en tydelig effekt av masseforhold, ved at økende masseforhold ga redusert frostbestandighet. Ved masseforhold på 0,30 var alle betongene frostbestandige, mens ved masseforhold 0,50 var det store forskjeller. Ved masseforhold 0,50 peker slaggbetongen CEM III/B seg ut med stor volumreduksjon. Ved masseforhold 0,75 ble betong med CEM III/B totalt disintegert.

Alle betongene vist i Figur 57 er luftinnførte betonger. Tilsvarende forsøk med betonger uten luftinnføring er vist i Figur 58. Sammenligning av resultatene viser at luftinnføring har gitt økt frostbestandighet i de fleste tilfeller, i større eller mindre grad. Unntaket er for betonger med CEM III/B, hvor luftinnføring ikke har ført til forbedret frost-salt bestandighet. Denne trenden er også bekreftet i laboratorieforsøk ved bruk av «Boråsmetoden» og 3 % NaCl løsning som også viser relativt små forskjeller i frostmotstand ved luftinnføring. Artikkelen gir imidlertid ikke data for oppnådd luftporestruktur for de luftinnførte betongene med ulike bindemidler.



Figur 57 Volumendring for betonger eksponert i 14 sesonger ved siden av saltet motorvei. Betonger med ulike bindemidler ved masseforhold fra 0,30 til 0,75. CEM II/A-V (Norcem Standard FA) kun ved masseforhold 0,40 og 0,45. Alle betonger er luftinnførte, med mengde luft i intervallet 4-5 %. Fra Utgenannt & Petersson 2012.



Figur 58 Volumendring for betonger eksponert i 14 sesonger ved siden av saltet motorvei. Betonger med ulike bindemidler ved masseforhold fra 0,30 til 0,75. Alle betonger uten luftinnføring. Fra Utgenannt & Petersson 2012.

Tidligere rapporterte data etter 5 og 10 år for de samme betongene har vist at noen av betongene uten luftinnføring har gitt volumøkning (Utgenannt 2004, 2008). Dette skyldes antagelig intern oppsprekking av betongen. I enkelte tilfeller kan en volumøkning som følge av intern oppsprekking sammen med avskalling fremstå som en «tilsynelatende» lav skadegrad. For å avdekke slike ting ble det også

gjennomført forsøk med ultralyd, hvor endring i transmisjonstid er målt. Resultatene er vist i Tabell 24. For «friske» betonger uten skade forventes en redusert transmisjonstid (negativ verdi) ved økende alder, mens en økning (positiv verdi) indikerer en betong med intern skade.

Tabell 24 Ultralydprøving, endring i transmisjonstid (%) etter 14 års utplassering ved saltet motorvei. Betonger med ulike bindemidler, masseforhold og med og uten luftinnføring. Fra Utgenannt & Petersson 2012

Concrete mix \ w/b-ratio	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.75
CEM I, air	-3	-2	-2	-	-2	-8 ¹⁾
CEM I, no air	-4	-3	-2	-	-3	+10 ¹⁾
CEM I + 5% silica, air	-2	-2	0	-	-2	-10 ¹⁾
CEM I + 5% silica, no air	-2	-2	+3	-	+13	+31 ¹⁾
CEM II/A-LL, air	-6	-6	-5	-	-4	-2
CEM II/A-LL, no air	-6	-5	-3	-	-2	+3 ¹⁾
CEM II/A-S, air	-5	-3	+2	-	+6	+5
CEM II/A-S, no air	+1	+6	-1	-	-0	+3 ¹⁾
CEM I + 30% slag, air	-3	-3	-2	-	+1	-18 ¹⁾
CEM I + 30% slag, no air	-5	-3	-3	-	-6	-14 ¹⁾
CEM III/B, air	-4	-3	-1	-	-1 ¹⁾	TD
CEM III/B, no air	-2	-3	-2 ¹⁾	-	-3 ¹⁾	TD
CEM II/A-V, air	-	-	+3	0; -3	-	-
CEM II/A-V + 3,8% silica, air	-	-	-3	-	-	-

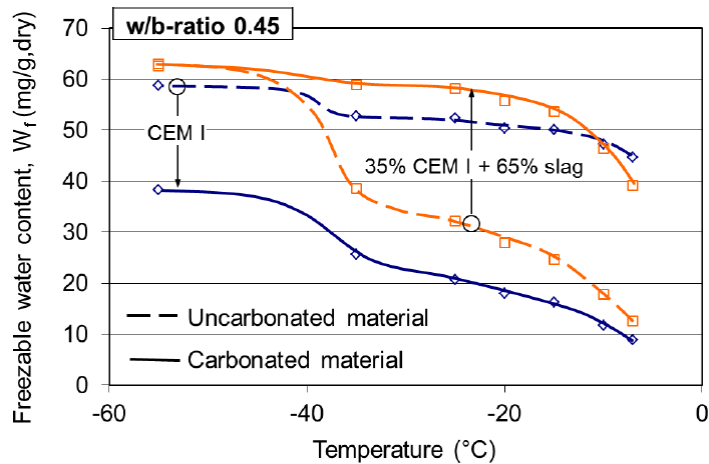
¹⁾ Result after 10 years. No detection could be made after 14 years because of to severe surface damage.

TD = Totally disintegrated

Merk at det for flere betonger med slagg, også ved lave slaggmengder som hos CEM I + 30 % slagg (k-faktor 0,6) og CEM II/A-S med 15 % slagg, ikke var mulig å måle ultralyd etter 14 år pga. for store skader i overflaten. Betong med CEM III/B og masseforhold på 0,75 var totalt desintegret etter 14 år, uavhengig av om de var luftinnførte eller ikke. (For betong med CEM II/A-S er det bemerket dårlig kompatibilitet mellom tilsetningsstoff og sement, noe som antagelig har gitt et dårlig luftporesystem).

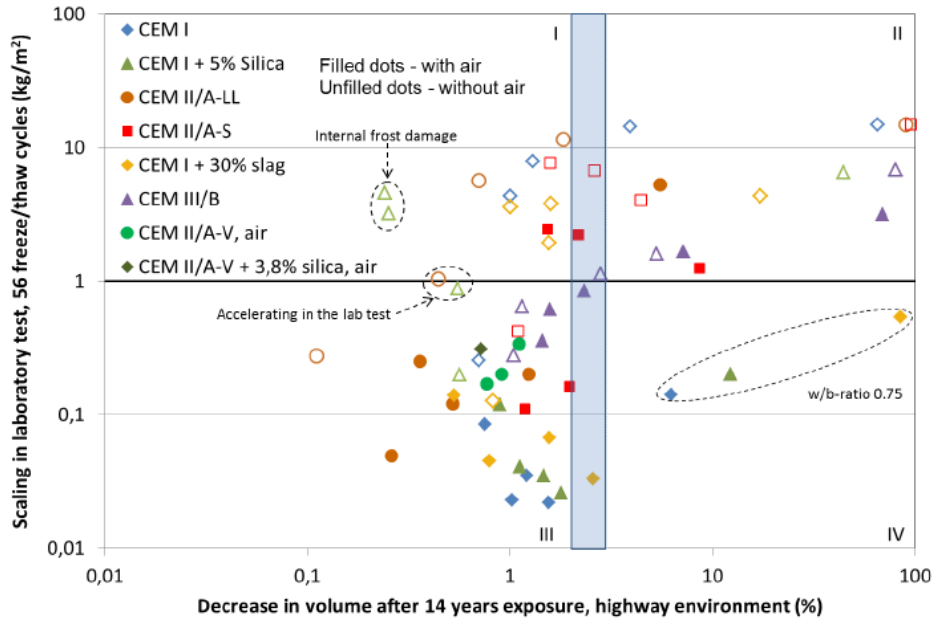
Ved masseforhold 0,40 og lavere har alle betonger med luftinnføring, bortsett fra CEM II/A-S og CEM II/A-V uten silikastøv, redusert transmisjonstid, dvs. ingen indikasjon på intern skade. For betong med CEM II/A-V (Norcem Standardsement FA) ser det ut til å være en viss forskjell på betongen med og uten silikastøv, hvor tilsetning av silikastøv har en positiv effekt på frostmotstand.

En av årsakene til at slaggbetonger, og spesielt betonger med høyt slagginhold (CEM III/B) har redusert frostmotstand er at karbonatisering av slaggbetong gir et mer porøst yttersjikt, og dermed økt mengde frysbar vann. Dette er illustrert i Figur 59. Se også omtale under avsnitt 5.2.1.



Figur 59 Mengde frysbar vann som funksjon av temperatur. Karbonatiserte og ukarbonatiserte betonger med masseforhold 0,45 med henholdsvis CEM I og CEM III/B. Utgenannt & Petersson (2012).

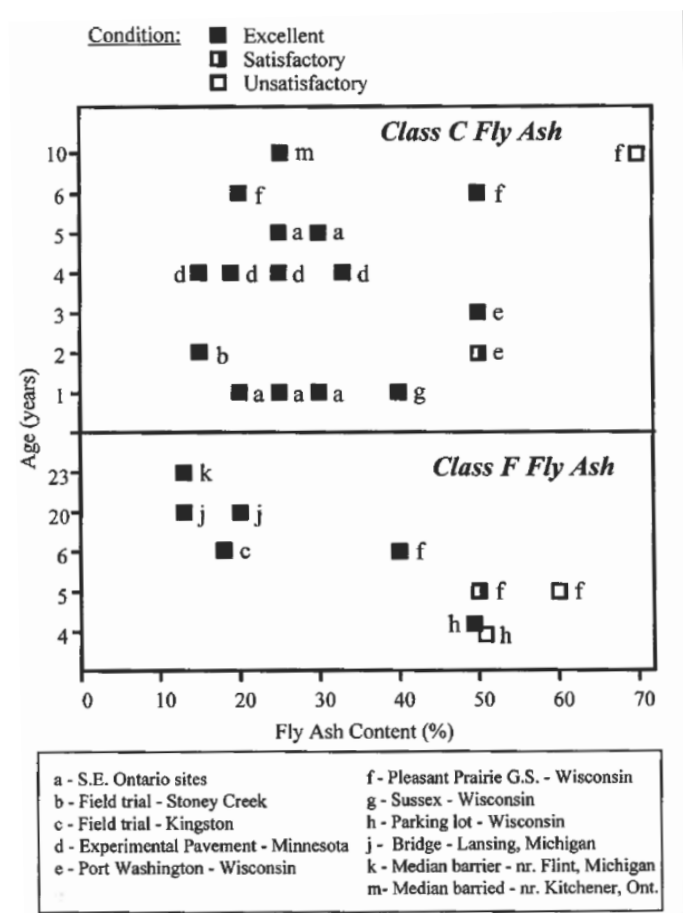
Det omfattende datasettet fra felt- og laboratoriestudier rapportert av Utgenannt & Petersson (2012) er sammenstilt i Figur 60. Det er her lagt inn «akseptkriterier» på 1 kg/m^2 (horisontal linje) for laboratorieforsøk etter 56 døgns akselerert prøving, samt 2-3 % volumreduksjon (vertikalt farget felt) for feltbetonger etter 14 år. Som vist i figuren havner veldig få betonger i kvadrant IV, dvs. med aksept i laboratorieforsøk, men ikke tilfredsstillende egenskaper i felt. De tre betongene dette gjelder har alle masseforhold på 0,75. De fleste betongene havner i kvadrantene II og III, hvor lab og feltresultater generelt korresponderer bra med hverandre. Imidlertid havner ganske mange betonger i kvadrant I, hvor betongene «stryker» i lab-forsøk men viser tilfredsstillende feltegenskaper. Det bemerkes i artikkelen at de alle fleste av betongene i kvadrant I er uten luftinnføring. Forfatterne påpeker at dette gjør at de kan være utsatte for nedbrytning i et mer aggressivt vinterklima enn feltprøvene har vært eksponerte for. Som vist i figuren er det anmerket interne frostskafer for to av disse betongene (CEM I, 5 % silikastøv, uten luft). Dog viser mengden av betonger i kvadrant I at «Borås-metoden» i mange tilfeller klassifiserer betonger som «ikke akseptabel» mens de i virkeligheten har potensiale til å klare seg meget bra i felt.



Figur 60 Frost-saltmotstand for laboratoriebetonger (avskalling etter 56 døgns ved fryse-tine forsøk med 3 % NaCl løsning) samt for betonger eksponert i 14 år ved saltet motorvei utenfor Borås (volumendring etter 14 år). Utgenannt & Petersson 2012

6.6.2 Erfaringer fra USA og Canada

Thomas (1997) har publisert en oversikt over felt-betonger utsatt for frost i nærvær av tinesalter, se Figur 61. Den generelle konklusjonen er at betonger med mengde flygeaske på godt over 30 % har klart seg svært bra. Thomas (1997) påpeker videre at betongenes gode bestandighet i mange tilfeller står i stor kontrast til deres dårlige resultater ved laboratorieprøving iht. ASTM C 672, som er prinsipielt lik «Borås-metoden». Spesielt gjelder dette for betonger med flygeaske-mengder over 30 %.



Figur 61 Feltefaringer for flygeaske-betonger med varierende type flygeaske (C og F), varierende mengde flygeaske ved varierende alder. Alle betonger utsatt for frost i nærvær av tinesalter. Fra Thomas (1997).

Erfaringer fra forsøksfeltet Treat Island i Maine, USA etter 25 års felteksporing (Thomas et al. 2011) viser at ved masseforhold 0,60 ga økende mengde av slagg og flygeaske redusert frostmotstand. Ved høye innblandingmengder var betongblokkene i noen tilfeller ikke lengre intakte i ett helt stykke. Ved masseforhold 0,40 var derimot frostmotstanden generelt god, også betonger med tilsetning av flygeaske og slagg. Det anmerkes imidlertid at betonger med høye mengder FA eller slagg, eksempelvis 45 % slagg eller mer, ga noe mer tendens til avskalling på sidekanter og hjørner av blokkene. Det anbefales å bruke moderate mengder FA og slagg selv ved masseforhold på 0,40 i slike tøffe klimatiske forhold, uten at det angis spesifikt i artikkelen hva «moderat» innebærer. Forholdene ved Treat Island er svært aggressive, med tidevannsforskjeller på 6 m og med gjennomsnittlig 100 frostsykler per år.

Hooton (2000, 2012) beskriver Canadiske erfaringer fra Ontario-provinsen, hvor man har 35 års erfaring med slaggbetonger. Han beskriver at feltefaringer viser at innblandingnivåer opp til 35 % er uproblematiske med tanke på salt/frost avskalling, mens nivåer på 50 % kan gi problemer. Ontario Ministry of Transportation setter imidlertid begrensninger på 25 % slagginnblanding i sine spesifikasjoner. Slike begrensninger er basert på det faktum at betonger med høyere mengder slagg ofte kommer dårlig ut når de testes i laboriemetoder som ASTM C 672 eller MTO LS-412.

6.6.3 Nederlandske felt- og lab- erfaringer

6.6.3.1 Feltefaringer

I følge Bijen (1998) og Gulikers (2012) er alvorlige frostskafer knapt registrert i Nederland, mens salt/frost- avskalling kan observeres flere steder. Selv om avskalling i løpet av den første vinteren kan være større ved bruk av CEM III, vil avskallingen på sikt bli lavere enn ved bruk av CEM I. Gulikers (2012) påpeker imidlertid at det etter de tøffe vintrene i perioden 2009-2011 ble rapportert om flere nederlandske tilfeller med salt-frost avskalling av «ung» betong enn tidligere år. Samtidig knytter han disse tilfellene til utilfredsstillende herdebetingelser av betongen.

Polder et al. (2014) har oppsummert nederlandske erfaringer med slaggsement, og sammenlignet med erfaringer ved bruk av CEM I og CEM II/B-V med ca. 25 % flygeaske. Den generelle erfaringen er at frostskafer, det være seg i nærvær av tinesalter eller ikke, er meget begrenset i Nederland. De klimatiske forhold i Nederland er annerledes enn i de Nordiske land med generelt sett betydelig lavere frostbelastning. Enkelte områder som de nord-østlige deler har imidlertid betydelig frost med temperaturer ned til ca. -11°C og opp til 96 dagers varighet for frostperioden. Men dette er en lav frostbelastning sammenlignet med de mest frostbelastede områdene i Norge. Kystområdene i Nederland har på den annen side svært begrensede frostmengder.

De Nederlandske kravene til betong i eksponeringsklasse XF4 er enten betong med masseforhold 0,45 (og minimum sementmengde 320 kg/m³) uten noe krav til luftinnføring, eller betong med masseforhold på 0,50, minimum 300 kg sement per m³ og krav om luftinnføring (3-5 %). Dette står i kontrast til praksis i mange land som alltid krever luftinnført betong i denne klassen, og også ofte lavere masseforhold.

Polder et al (2014) gjengir data fra en større feltstudie (rapportert av Visser i 1999 og 2000), hvor noen hovedpunkter oppsummeres som følgende:

- Frostskafer opptrer normalt kun i nærvær av tinesalter. Kun ett rapportert tilfelle av frostskafe uten tinesalt er rapportert. Ingen tilfeller av intern oppsprekking har blitt dokumentert.
- Forekommer normalt som avskalling på overflater av dårlig kvalitet pga. høyt masseforhold, dårlig herdebetingelser eller karbonatisering. Forekommer i hovedsak på fukteksponte flater.
- Det finnes registrerte tilfeller for alle typer sementer, men høyere forekomst ved bruk av CEM III/B. Skaden er som regel begrenset til de ytterste 2-3 mm. Skadene kan i de fleste tilfeller knyttes til karbonatisering i ung alder, som gir en åpnere porestruktur.
- Avskalling i ung alder følges normalt ikke av progressiv avskalling de etterfølgende vintrene, dvs. avskallingen «stopper opp» etter første vinter.

Polder et al. (2014) har videre rapportert feltstudier for New-Jersey elementer utplassert i 4 ulike prøvefelt, alle utsatt for tinesalter. En oversikt over resultatene av disse er gitt i Tabell 25, mens resepter er gitt i Tabell 26. Det bemerkes at 3 av feltstasjonene er i såkalt kystklima, som er lite frostutsatt, se oversikt over feltstasjonenes lokasjon og alder ved inspeksjon i Tabell 27.

Tabell 25 Oppsummerte feltefaringer for New Jersey elementer. Detaljer mht. resepter er gitt i Tabell 26. Fra Polder et al (2014)

Site	Mix	Nr. of inspected profiles	Number of elements with mass loss				
			Average cm ³	No loss	0 – 1 cm ³	1 – 10 cm ³	> 10 cm ³
1	HOC	54	22.1 ± 33.3	2	7	23	22
1	PC1	7		3	0	2	1
1	PC2	9		7	2	0	0
1	PC3	5		5	0	0	0
1	PC4	3		5	0	0	0
2	PC	4		3	1	0	0
2	HOC1	4		3	1	0	0
2	HOC2	5		3	0	0	2
3	PC1	30		25	4	1	0
3	PC2						
4	PVC	45	3.2 ± 8.1	18	13	12	3

Skadene fremkommer som avskalling og ofte som såkalte «pop-outs» på toppflaten. Det totale bildet er noe sammensatt, men betonger med CEM I kommer generelt best ut. For betong med CEM I med tilsatt silikastøv (blanding PC3 og PC4) er det ikke rapportert skader i det hele tatt, selv om disse betongene ikke er luftinnførte. Betonger med CEM III/B kommer generelt noe dårligere ut enn betonger med CEM I. I det potensielt «tøffeste» prøvefeltet (felt 3) er det kun betonger med CEM I, så her får vi ingen sammenligning med slaggsment.

I tillegg til slaggbetongene er betongen med CEM II/B-V som inneholder ca. 25 % flygeaske interessant. Denne betongen har gitt relativt omfattende avskalling, til tross for at den er plassert i en kystsone med lav frostbelastning. Det er imidlertid en faktor å ta med i betraktning at disse elementene med CEM II/B-V er 19 år, dvs. 8-12 år eldre enn betongene fra de 3 andre prøvefeltene.

Tabell 26 Resepter for betongene referert i Tabell 25. Silikastøv er tilsatt som slurry, 1 liter slurry tilsvarer 0,65 kg silikastøv. Fra Polder et al 2014.

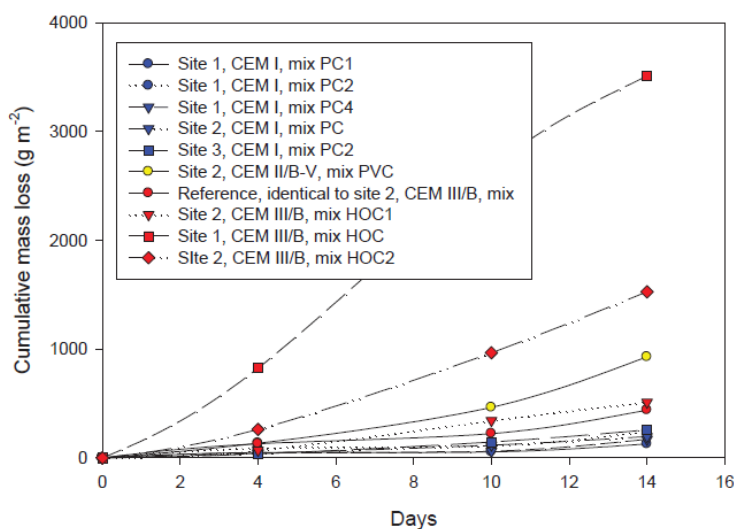
Site	Mix	Cement	Cement content (kg m ⁻³)	(Super)plasticizer (l m ⁻³)	Air entraining agent (l m ⁻³)	Hollow microspheres (l m ⁻³)	Silica fume (l m ⁻³)	Aggregate (mm)	W/b
1	HOC	CEM III/B	350	3				4 – 16	0.44
1	PC1	CEM I	350	3		1.7		4 – 16	0.44
1	PC2	CEM I	350	3				4 – 16	0.44
1	PC3	CEM I	350	3			17	4 – 16	0.44
1	PC4	CEM I	350	4			25.5	4 – 16	0.44
2	HOC1	CEM III/B	375	1.3	0.16			4 – 16	0.44
2	HOC2	CEM III/B	375	1.3	0.16		0.6 ?	4 – 16	0.44
2	PC	CEM I	375	1.3	0.16		0.6 ?	4 – 16	0.44
3	PC1	CEM I	340	Yes			25	Unknown	0.45
3	PC2	CEM I	340	Yes		1.7	25	Unknown	0.45
4	PVC	CEM II/B-V	350		5.5		26.2	4 – 22	0.45

Tabell 27 Oversikt over prøvefelt og alder ved inspeksjon for betonger vist i Tabell 25. Fra Polder et al (2014).

Site	Location	Climate zone	Age (year)
1	N of Amsterdam	Coastal zone	9
2	Amsterdam	Coastal zone	11
3	Grouw	Moderate-severe	7
4	Amsterdam	Coastal zone	19

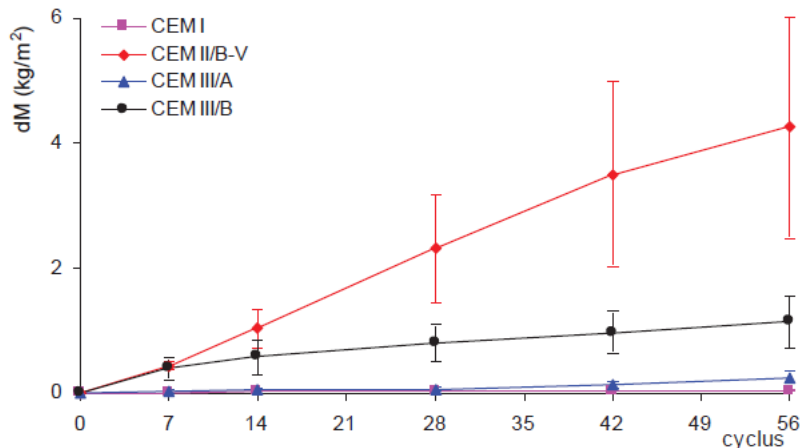
6.6.3.2 Laboratorieerfaringer

I Figur 62 vises laboratorieforsøk for betonger tatt ut fra nederlandske feltstasjoner, se Tabell 26 for resepter. Prøvingen er utført med såkalt «Nederlandsk metode», som er en prøvingsmetode basert på samme prinsipp som CDF-metoden, men med fryse/tine-syklus som er mer tilpasset Nederlandsk klima. Slaggbetongen fra felt 1 uten silikastøv og uten luft viser høyest avskalling, mens betong fra felt 2 med luftinnføring uten silikastøv viser lavest avskalling. Laboratoriestøpt betong har ellers gitt lik avskalling som betong tatt ut fra felt. Betonger med CEM I har gjennomgående lav avskalling ved prøving iht. denne metoden, mens betong med CEM II/B-V plasserer seg betydelig over CEM I-variantene, og også med høyere avskalling enn de beste CEM III/B-variantene.



Figur 62 Kumulativ avskalling av betong med ulike bindemidler/resepter basert på «Nederlandsk metode». Betongprøver er utborede kjerner fra feltstasjoner, bortsett fra «Reference» som er laboratoriestøpt betong. Se Tabell 10 for resepter. Fra Visser 2002, i Polder et al. (2014).

Polder et al (2014) har også rapportert prøving i henhold til «modifisert nordisk metode», se Figur 63. CEM III/A har i disse forsøkene bare gitt marginalt dårligere frost/saltmotstand enn CEM I, mens CEM III/B har gitt markant dårligere frostmotstand enn CEM I. Det er imidlertid interessant å merke seg at flygeaskebetongen CEM II/B-V kommer betydelig dårligere ut enn CEM III/B. Herdetid på betongene før prøving var 31 døgn.

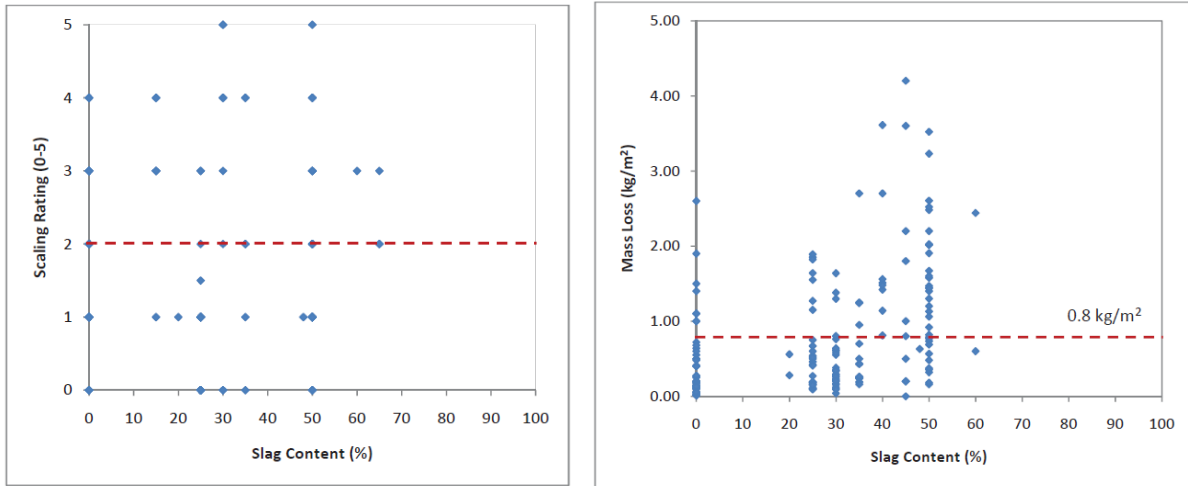


Figur 63 Frostavskalling for betonger med ulike bindemidler. CEM II/B-V ca. 25 % flygeaske. Sagede flater. Alder ved oppstart av prøving var 31 døgn. Prøving iht. nederlandsk modifisert versjon av "Borås-metoden" med 3 % NaCl løsning, modifiseringen går ut på isolert herding fra 2-7 døgn i stedet for lagring i vann. Fra Visser & Heijnen (1998), i Polder et al. (2014).

6.7 Avsluttende diskusjon

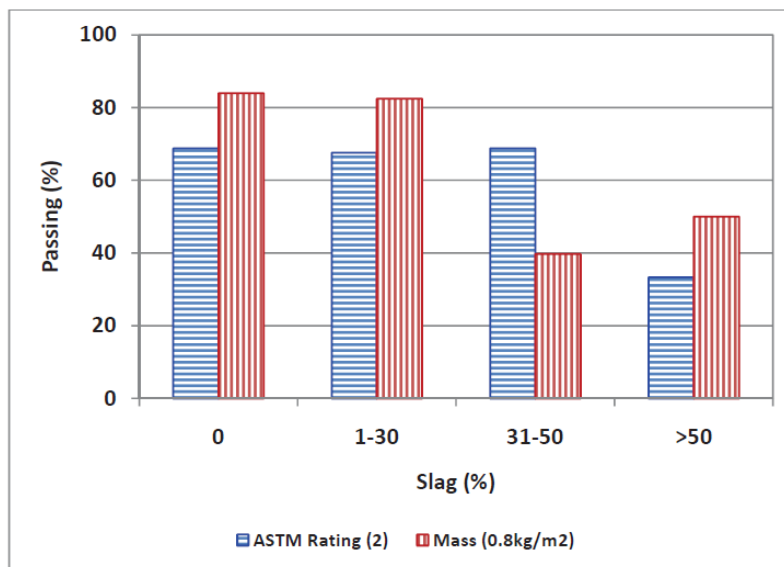
Som forventet tegner det seg et noe sammensatt bilde etter gjennomgang av utvalgt litteratur på området, og det er en rekke usikre momenter. Ulike laboriemetoder gir ulik frostbelastning, og dermed ulike resultater. I tillegg er det stor grad av usikkerhet knyttet til forhold som herdetid før prøving, fuktbetingelser i herdefasen, effekt av karbonatisering, effekt av overflatenes beskaffenhet, effekt av sagflater kontra støpte flater og så videre. Det er generelt betydelig grad av usikkerhet rundt i hvilken grad laboriemetodene som brukes avspeiler virkelig oppførsel i felt – og i så fall under hvilke klimatiske betingelser. Laboriemetodene som brukes er i hovedsak utviklet for dokumentasjon av betonger med CEM I, og er ikke uten videre egnet til dokumentasjon av betonger med flygeaske og slag.

Bare for å illustrere graden av usikkerhet rundt laborieprøving av slaggbetonger vises avslutningsvis noen plott hvor Bektas et al. (2010) har sammenstilt resultater fra ulike prosjekter. I Figur 64 vises en sammenstilling av visuell vurdering av overflate iht. system gitt av ASTM C672 (venstre) samt målt avskalling (høyre) plottet mot mengde slag. Som det fremgår av plottene er det ikke noen klare sammenhenger mellom mengde slag og frostskafer i overflaten. Det kan se ut som frost/saltmotstanden er nærmest uavhengig av mengde slag, det vil dermed si at andre parametere totalt sett har større innvirkning enn slagmengde.



Figur 64 Sammenstilling av data fra flere forskningsprosjekter på effekt av mengde slag på frost/salt-avskalling. Venstre: visuell rating av avskalling iht. ASTM C672. Høyre: målt avskalling i kg/m². Fra Bektas et al. (2010).

Bektas et al. (2010) har også gruppert og plottet de samme dataene basert på akseptkriteriene visuell «rating» 2 eller lavere, alternativt avskalling på 0,8 kg/m² eller lavere, se Figur 65. Figuren viser at det tross alt er en redusert sannsynlighet for at betonger med slagmengder > 30 % klarer akseptkriteriene. Men like fullt viser sammenstillingen at det er mulig å produsere betonger med slagmengder > 50 % som klarer akseptkriteriene, selv om sannsynligheten for å oppnå det er lavere enn ved bruk av CEM I.



Figur 65 Akseptgrad for ulike mengder slag basert på ASTM-rating og avskallingskriterie. Fra Bektas et al. (2010).

Forfatterne påpeker også det faktum som allerede er vist flere ganger, at resultatene fra ASTM C 672 i relativt liten grad sammenfaller med feltresultater. Spesielt betonger med høye mengder slag klarer seg ofte langt bedre i felt enn resultatene fra den akselererte avskallingstesten skulle tilsi.

6.8 Konklusjoner

- Motstand mot frostnedbrytning i form av intern oppsprekking og volumnedbrytning er i flere tilfeller rapportert å være bedre for betonger med slagg og flygeaske enn for CEM I, og i andre tilfeller å være tilsvarende som for CEM I. Forbedret frostmotstand kan henge sammen med det finere poresystemet som oppstår ved bruk av flygeaske og slagg, fordi vannet i de fineste porene vil fryse ved lavere temperatur enn vann i grovere porer.
- Slaggbetonger, og i enda større grad flygeaskebetonger, har en langsommere egenskapsutvikling enn CEM I. Dersom betongene utsettes for frysing før de har utviklet et tilstrekkelig fint poresystem kan det resultere i redusert frostmotstand.
- Når det gjelder avskalling, og spesielt i nærvær av tinesalter, gir betonger med flygeaske og slagg i mange tilfeller redusert motstand mot frost/salt-avskalling. Flere studier har vist at økende mengde flygeaske og slagg gir økende grad av avskalling ved testing i «Borås-metoden» eller i tilsvarende metoder.
- Den negative effekten av slagg og flygeaske synes å være økende med økende masseforhold. Ved tilstrekkelig lave masseforhold (0,4 eller helst enda lavere) kan betonger med flygeaske og slagg oppnå svært god salt/frostmotstand.
- Noen laboratoriestudier har imidlertid vist at andre forhold, eksempelvis herdebetingelser og forkondisjonering av prøvestykker før prøvingen kan ha langt større betydning enn mengde slagg eller flygeaske.
- Luftinnføring har dokumentert god effekt på flygeaskebetonger, på tilsvarende vis som de har god effekt for CEM I-betonger. For betonger med slagg er bildet noe mer sammensatt, da flere studier viser at luftinnføring har ingen eller svært begrenset effekt.
- Flere studier har påvist negativ effekt av karbonatisering på frost/salt motstand av slaggbetonger. Det spesielle med slaggbetong er at det karbonatiserte sjiktet blir mer porøst og at mengden frysbar vann dermed øker. Karbonatisering av CEM I-betong gir på den annen side en motsatt effekt ved at det karbonatiserte sjiktet blir tettere enn bulk-betongen.
- Det er motstridende rapporter når det gjelder i hvilken grad laboriemetoder kan forutsi oppførsel i felt. Svenske erfaringer er at «Borås-metoden» generelt gir en relativt god indikasjon på oppførsel i felt. Men samtidig vil metoden i mange tilfeller være «for konservativ» da mange betonger som «stryker» i testen vil kunne klare seg bra i felt. Det er på den annen side veldig få tilfeller av at betonger som klarer seg bra i «Borås-metoden» klarer seg dårlig i felt.
- Det kan virke som om det er større grad av avvik mellom lab og felt-erfaringer i USA og Canada enn de svenske erfaringene viser. Flere studier peker på mange betonger med moderate til høye mengder flygeaske og slagg har klart seg veldig bra i felt, på tross av dårlige resultater ved testing i henhold ASTM C672 eller tilsvarende metoder.
- Prøvmåte-metodene som brukes er utviklet for prøving av CEM I-sementer, og kan ikke uten videre brukes for prøving av flygeaske- og slaggbetonger. Videreutvikling og spesialtilpassing av metodene til bruk for «nye sementer» er svært viktig. Det pågår slikt arbeid på europeisk nivå.
- Det finnes en del gode data med hensyn til felterfaringer av betonger med slagg og flygeaske, men det synes å være et behov for økt innsats for å kalibrere laboriemetoder mot virkelig feltoppførsel.

7 Kjemisk bestandighet

7.1 Innledning

Betong som utsettes for kjemisk angrep fra grunnvann, jord eller fra kjemisk industri vil kunne brytes ned. Allerede ved pH under ca. 12,5 vil nedbrytning av kalsiumhydroksid (forkortet CH) og etter hvert også C-S-H starte. Rent vann, spesielt bløtt vann med lavt innhold av kalsiumioner er relativt aggressivt på sementpastaen og vil løse opp CH-fasen.

Nedbrytningen kan være i form av direkte nedbrytning av sementlimets komponenter med påfølgende tap av fasthet og tetthet, eller i form av volumøkning av sementpastaen med sprengvirkning på betongen. Felles for kjemisk nedbrytning er at angrepet kommer fra væsker og gasser som trenger inn i betongen fra overflaten. Tetthet er derfor en helt sentral egenskap, hvor høy tetthet vil redusere omfanget av kjemiske angrep, eller i alle fall medføre at angrepene går saktere. Lavt masseforhold er derfor positivt, noe som også gjenspeiler seg i Betongstandarden NS-EN 206, hvor betonger i eksponeringsklasse XA3 (meget kjemisk aggressivt miljø) skal ha et masseforhold på 0,40 eller lavere. Utover tetthet er mengden kalsiumhydroksid (CH) viktig, fordi det er den delen av sementlimet som lettest angripes. Redusert mengde CH som følge av pozzolane tilsetninger er derfor positivt (Neville 1995). Ved angrep fra sulfater (og også nitrater) vil disse reagere med hydratasjonsproduktene fra C_3A i sementen og danne sprengende produkter. Bruk av såkalte sultatresistente sementer med lavt innhold av C_3A vil kunne gi god motstand mot sulfat- og nitratangrep, og det er dette virkemiddelet som tradisjonelt har vært foreskrevet for betonger utsatt for sulfatangrep. Men som denne gjennomgangen av litteratur har vist, vil bruk av silikastøv, flygeaske og slagg kunne gi tilfredsstillende motstand mot kjemiske angrep, og i mange tilfeller være et bedre alternativ enn bruk av sulfatresistente sementer.

Kjemisk bestandighet er et stort og komplisert området, og vil ikke bli behandlet fullt ut her. I de videre avsnitt vil imidlertid effekter av flygeaske og slagg på sulfatbestandighet og syrebestandighet bli behandlet. Sulfatbestandighet er meget relevant for norske forhold, spesielt med tanke på alunskiferområdet på Østlandet.

7.2 Sulfatangrep

7.2.1 Innledning

Betong som kommer i kontakt med jord eller grunnvann som inneholder sulfater vil kunne utsettes for sulfatangrep. Sulfationer som trenger inn i betongen kan reagere med ulike bestanddeler i sementlimet, og reaksjonen kan arte seg som en svellende reaksjon, ofte assosiert med dannelse av ettringitt, eller en reaksjon med nedbrytning og desintegrering av sementlimet med tap av styrke. Collepardi (2003) beskriver 4 varianter av **eksterne sulfatangrep**:

1. Sulfatangrep på CH og C-S-H og dannelse av gips. Fører til ekspansjon/svelling, men det mest alvorlige er «dekalsiferingen» (utlekking av kalsium) fra C-S-H med tap av styrke og tetthet. Kan skje for alle salter av sulfat, utenom kalsium- og magnesiumsulfat.
2. Sulfatangrep på kalsium-aluminat-hydrat (C-A-H) og monosulfat, og dannelse av ettringitt som gir ekspansive reaksjoner. Kan skje for alle sulfat-salter utenom magnesiumsulfat.
3. Sulfatangrep på C-S-H og CH i samvær med karbonat-ioner, dannelse av thaumasitt. Gir nedbrytning av sementpasta og generell svekkelse av fasthet og tetthet.
4. Angrep av magnesiumsulfat på C-S-H. Gir ikke dannelse av ettringitt, men en nedbrytning av C-S-H fasen som i variant nr. 3.

En generell forutsetning for eksterne sulfatangrep av de 4 typene nevnt over er i tillegg til tilgang på sulfat følgende: fuktig miljø og relativt høy permeabilitet pga. høyt masseforhold, dårlige herdebetingelser eller opprissing (Collepari 2003).

I tillegg til eksterne sulfatangrep som nevnte over kan det forekomme såkalte **interne sulfatangrep**. Forutsetning for slike angrep er ifølge Collepari (2003) mikrorissing av betong, høy fukt og frigivelse av sulfat i fremskreden fase. Sementer som brennes i svovelrike miljøer, f.eks. gamle gummidekk, kan inneholde betydelige mengder sulfater som kan frigis i en sen fase. En annen mekanisme som er godt kjent fra litteraturen er termisk dekomponering av «primær ettringitt» dannet naturlig i tidlig fase av hydratiseringen (og som normalt omdannes til monosulfat senere i hydratasjonsforløpet) dersom betongen utsettes for høy herdetemperatur > ca. 70°C. Interne sulfatangrep omtales gjerne som «forsinket/sekundær ettringittdannelse», på engelsk DEF (delayed ettringite formation). Collepari (2003) mener imidlertid at begrepet DEF kan brukes om all ettringittdannelse i sen fase, uavhengig av om det er snakk om internt eller eksternt sulfatangrep. Dette synspunktet støttes ikke av alle, og i internasjonal litteratur er som oftest begrepet DEF koblet til «varmeindusert» ettringittdannelse.

En spesiell undergruppe av sulfatangrep er reaksjonen mellom kis-mineraler i tilslaget og sementhydrater (NB 18). Spesielt farlig i så henseende er magnetkis. Også svovelkis kan reagere, men anses kun å medføre et estetisk problem. Tilslagsstandarden (NS-EN 12620) setter strenge grenser for tillatt mengde magnetkis gjennom at mengden svovel skal være < 0,1 % dersom det er påvist magnetkis i tilslaget, slik at dette skal være ivaretatt uten bruk av spesielle sementer eller tilsetningsmaterialer.

Som nevnt er sulfatangrep svært relevant med tanke på alunskifer-området på Østlandet. I tidligere undersøkelser ble det konkludert med at dannelse av sekundær ettringitt er den primære nedbrytningsmekanismen for betonger i alunskifer-området (Moum & Rosenqvist 1959). Hagelia & Sibbick (2009) har gjennom undersøkelser av historisk betong fra Blindtarmen forsøksfelt, i tillegg til undersøkelser av moderne sprøytebetong i tunneler, dokumentert at nedbrytning har skjedd i form av thaumasitt-sulfat angrep, og også dannelse av såkalt popcorn-kalsitt. De eksterne angrepene på betong var forårsaket av sulfat- og karbonatholdig grunnvann med utgangspunkt i alunskifer, med pH i området fra surt til nøytralt. Sprøytebetongen som var utsatt for denne nedbrytningsmekanismen var basert på sulfatresistent sement med $C_3A \approx 1\%$, SF = 5-10 % og masseforhold ned til 0,40 (Hagelia et al. 2001).

7.2.2 Beskyttelse mot sulfatangrep

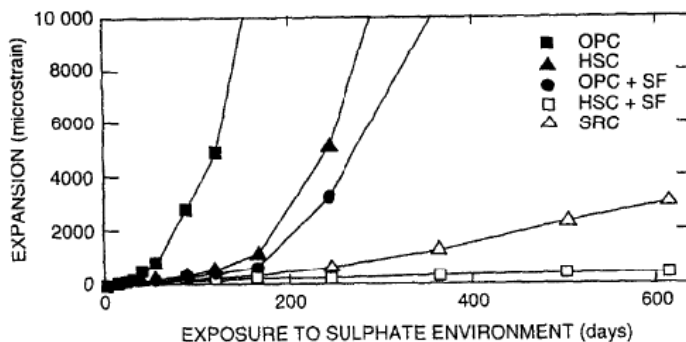
Som nevnt i innledningen vil reduksjon i mengde CH og tettere porestruktur medføre redusert risiko for sulfatangrep, noe som innebærer at bruk av silikastøv, slagg og flygeaske generelt er forventet å være effektive virkemidler (Neville 1995, Bertolini et al. 2004). Bruk av sementer med lavt C_3A -innhold (sulfatresistente sementer) er også generelt effektivt. Sulfatresistente sementer har i mange tilfeller vært brukt i marine konstruksjoner for å redusere faren for sulfatangrep fra sjøvann. Redusert innhold av C_3A har imidlertid negativ effekt på kloridinntrengning på grunn av redusert kloridbindingsevne. Bertolini et al. (2004) har omtalt tilfeller hvor bruk av sulfatresistente sementer i marine konstruksjoner i Midtøsten har ført til omfattende armeringskorrosjon. Bruk av sementer med flygeaske eller slagg er derfor anbefalt løsning i sjøvann. Bijen (1998) påpeker at problemer med sulfatbestandighet i sjøvann generelt er neglisjerbart sammenlignet med det langt større problemet kloridinitiert armeringskorrosjon. Løsningen med bruk av slaggsementer med > 65 % slagg som brukes i Nederland sikrer konstruksjonene både mot kloridinntrengning og mot angrep av sulfater fra sjøvann, og er derfor en foretrukket løsning. Bijen (1998) påpeker videre at kloridinntrengning fører til blokkering av porer som gjør inntrengning av sulfationer langsommere, slik at faren for sulfatreaksjoner generelt er liten i sjøvann.

Resultater fra Blindtarmen testfelt i Oslo, som ble etablert i 1952, har vist at tilsetning av 15 % silikastøv, alternativt bruk av naturlige pozzolaner (trass og molere), har gitt god bestandighet. Resultatene har vært omtrent på linje med det som er oppnådd vha. sulfatresistent sement med lavt C_3A -innhold på ca. 3 %. Resultatene som «Alunskiferkomiteen» rapporterte dokumenterte i tillegg at testprismer med tilsatt kalkfiller førte til de største skadene. Resultater fra studien er gjengitt av Hagelia (2011).

I en japansk studie av Torii et al. (1995) ble betonger med opptil 50 % flygeaske eksponert i 10 % Na_2SO_4 -løsning i 2 år. 2 varianter av flygeaske ble testet, begge silikatholdige flygeasker med CaO-innhold på 8-9 %. I tillegg til ekspansjon ble det målt trykkfasthet og dynamisk E-modul over tid. Spesielt betongene med 50 % flygeaske og masseforhold på 0,40 viste seg å gi svært god sulfatbestandighet. Det ble imidlertid også dannet ekspansive reaksjonsprodukter i flygeaskebetongene, men da kun i et begrenset omfang nær overflaten. Det ble konkludert med at årsaken til den gode bestandigheten dels er knyttet til redusert mengde CH i herdet betong, og dels til tettere porestruktur som gir langsommere inntrengning av sulfationer.

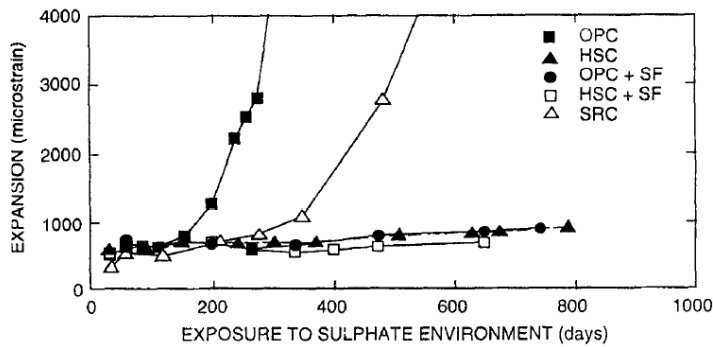
Khatri et al. (1997) har gjennom en studie av både betong- og mørtelprismer forsøkt å kvantifisere hvor stor den forbedrede kjemiske motstandsevnen er kontra effekten av redusert permeabilitet. Betonger med slaggsement (slaggmengde ikke spesifisert), slaggsement i kombinasjon med 7 % silikastøv samt Portlandsement i kombinasjon med 7 % silikastøv kom generelt svært godt ut ved testing i 5 % Na_2SO_4 -løsning. Betongene ble proporsjonert med tanke på lik fasthet etter 28 døgnet, noe som resulterte i variasjon i masseforhold fra 0,36 – 0,49 for betongene i fasthetsklasse «grade 40».

Resultater for mørtelprismeforsøkene er vist i Figur 66, mens resultater for betongprismeforsøkene er vist i Figur 67. For mørtelprismeforsøkene som har små tverrsnitt antas det at permeabilitet spiller en langt mindre rolle enn i betongprismeforsøkene med mye større tverrsnitt. Dette innebærer at mørtelprimeresultatene i stor grad vil si noe om ren kjemisk motstandsevne, uavhengig av sementpastaens tetthet. Vi ser av mørtelprismeforsøkene at sulfatresistent sement (SRC) ga gode resultater sammenlignet med OPC. Også betongene med slagg og Portlandsement (OPC) + silikastøv kom betydelig dårligere ut enn betong med sulfatresistent sement. Den mest kjemisk resistente varianten var imidlertid betong med kombinasjon av slagg og silikastøv.



Figur 66 Mørtelprismer (25x25x285 mm) eksponert i 5 % Na_2SO_4 -løsning. pH=7 ved oppstart, men oppløsning av CH fra mørtelprismer øker pH til 12-12,5 etter få timer. Betonger med ordinær Portlandsement OPC, høy mengde slagg (mengde ikke spesifisert) HSC og sulfatresistent sement SRC. Betonger merket SF ble tilsatt 7 % silikastøv. Masseforhold fra 0,47-0,51. Utført iht. ASTM C1012. Fra Khatri et al. (1997).

For betongprismeforsøkene, se Figur 67, endret bildet seg veldig. Sulfatresistent sement var fortsatt bedre enn OPC, men variantene med OPC + silikastøv, slagg (HSC) og slagg + silikastøv oppnådde veldig mye bedre sulfatbestandighet. Mye av forskjellene antas å skyldes at permeabiliteten har langt større effekt i disse forsøkene enn i mørtelprismeforsøkene, hvor sulfationene vil trenge svært langsomt inn i de tette betongene med slagg og silikastøv. De tetteste betongene med slagg og/eller silikastøv kommer derfor svært godt ut.



Figur 67 Betongprismer (75x75x285 mm) eksponert i 5 % Na_2SO_4 -løsning. pH holdt konstant mellom 7,5-8 i hele prøveperioden. Notasjon for betongtyper som i Figur 66. Betonger proporsjoner for lik fasthet etter 28 døgn («grade 40»), varierende masseforhold fra 0,36 (HSC+SF) til 0,49 (SRC, OPC+SF). Fra Khatri et al. (1997).

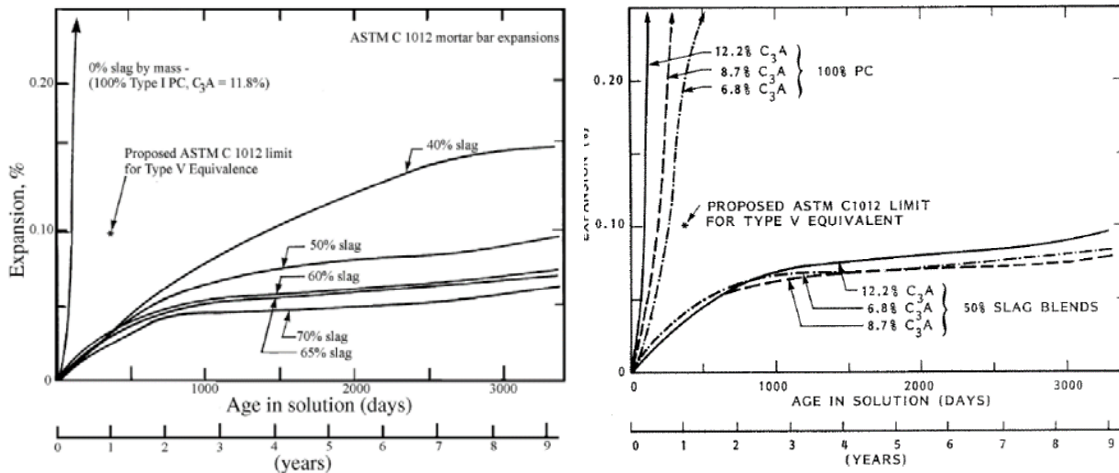
I tillegg til variasjon i tverrsnitt mellom betong- og mørtelprismeforsøkene var det også forskjeller i pH. I betongprismeforsøkene ble løsningens pH opprettholdt på 7,5 – 8 ved tilsetning av svovelsyre, mens i løsningene hvor mørtelprismene lå ble det ikke gjort noe for å opprettholde konstant pH. Dette innebar at pH ble økt til 12-12,5 kun etter få timer pga. oppløsning av kalsiumhydroksid fra prismene. Den lavere pH ved betongprismeforsøkene er generelt mer aggressiv enn løsningen for mørtelprismeforsøkene (Cao et al. 1997). Nedbrytningsmekanismene endrer seg imidlertid ved redusert pH. Ved pH på ca. 12 vil dannelse av ettringitt være dominerende, mens ved lavere pH vil det i større grad være dannelse av gips som gir ekspansiv reaksjon. I tillegg vil dekomponering av C-S-H fasen, som vil gi generell nedbrytning og tap av fasthet (Cao et al 1997, Khatri et al 1997, Revertegat et al. 1992), i større grad gjøre seg gjeldende ved lavere pH. Måling av ekspansjon er derfor i mange tilfeller ikke tilstrekkelig for å danne seg et bilde av motstand mot sulfatnedbrytning, supplerende forsøk kan være måling av trykkfasthet, dynamisk E-modul og tap av vekt.

Det ble konkludert med at både permeabilitet, som styrer inntrengningshastighet for sulfationer, og kjemisk sammensetning, som styrer fordelingen av hydratasjonsprodukter og dermed «sårbarheten» for kjemiske angrep, har stor betydning. De beste løsningene (f.eks. kombinasjon av slag og silikastøv) gir betydelig redusert permeabilitet og har samtidig en sammensetning som gir god kjemisk bestandighet ved at mengden kalsiumhydroksid er svært lav. Resultatene indikerer at slaggbetonger i seg selv er mer kjemisk resistente mot sulfatangrep enn betonger med sulfatresistent sement, samtidig som slaggbetonger er betydelig tettere.

Det er flere studier som tyder på at innhold av aluminium i slagget har stor betydning for hvor effektivt slag er med tanke på sulfatbestandighet. Hooton (2012) viser til Canadisk forskning som indikerer at ved nivåer av Al_2O_3 over 11 % må mengde slag generelt være høy for å motvirke sulfatreaksjoner. Moranville-Regourd (1998) har referert til resultater av Locher som også viser at høyt innhold av aluminium har negativ betydning. Det er referert til tilfeller hvor bruk av relativt lave doseringer slag i intervallet 20-50 % med høyt Al_2O_3 -innhold (17,7 %) i noen tilfeller førte til redusert sulfatresistens. Bruk av slag med lav aluminiuminnhold (11 %) ga på den annen side alltid økt sulfatbestandighet, uavhengig av doseringsnivå av slag. For høye slagmengder (> 65 %) synes følsomheten for høyt innhold av aluminium å være redusert, og selv slagtyper med høyt Al_2O_3 -innhold gir sulfatresistent betong.

I Figur 68 (venstre) vises resultater fra en Canadisk studie (Hooton & Emery 1990) som viser at for sement med C_3A -innhold på 11,8 % var ikke 40 % slagmengde tilstrekkelig, mens høyere doseringsnivåer av slag ga god sulfatmotstand. Det skal her påpekes at 11,8 % C_3A -innholdet i denne sementen er uvanlig høyt. Vi ser videre i høyre del av figuren at ved 50 % slagginnblanding var følsomheten for varierende C_3A -innhold i sementen lav. Normal benyttet grenseverdi for denne

prøvmingsmetoden er maksimalt 0,10 % ekspansjon etter 12 måneder for at betongen skal bli kategorisert som «high sulphate resistant».



Figur 68 Effekt av ulike slagmengder på sulfatresistens ved sement med konstant C₃A-innhold på 11,8 % (høyre). Effekt av 50 % slaginnblanding på sulfatresistans for sementer med 3 ulike C₃A-nivåer (høyre), Målt ved ekspansjon iht. ASTM C1012 på prøvelegemer lagret i 5 % Na₂SO₄løsning. Fra Hooton & Emery (1990).

Ifølge Hooton (2012) ble det i den samme studien av Hooton & Emery (1990) også støpt betonger av sement med C₃A-innhold på 12,3 % og varierende mengder slagg. Disse ble lagret i 8 år i 0,3 % Na₂SO₄-løsning, deretter i 5 % Na₂SO₄ løsning. Etter 35 år har betongene med henholdsvis 45 %, 65 % og 72 % slagg klart seg svært godt og fremstår som uskadede ved visuell vurdering. Betongene uten slaggtilsetning, både sementer med moderat og lavt C₃A-innhold, har på den annen side gått totalt i oppløsning.

Irassar et al. (1996) har rapportert en fullskala-studie hvor betongsyndere på 150x300 mm ble gravd halvveis ned i sulfatholdig jord. Det ble benyttet ordinær Portlandsement med 8,5 % C₃A-innhold, i tillegg til en sulfatresistent sement med 2 % C₃A. Videre ble det brukt resepter med 20 og 40 % flygeaske, samt en variant med 80 % slagg. I tillegg ble det også støpt betonger med naturlig pozzolan i tilsvarende doseringer som for flygeaske. Resultatene var svært forskjellige avhengig av om det var nedgravd del eller atmosfærisk del av sylindere som ble undersøkt:

For nedgravd del av sylindere:

- Betonger med ordinær Portlandsement viste visuelle tegn på sulfatangrep etter 2-3 år, mens betonger med 20 % flygeaske eller naturlig pozzolan viste tegn på angrep etter 4-5 år. For disse betongene ble det dokumentert dannelse av ettringitt og gips i overflatesjiktet. De øvrige betongene med 40 % flygeaske eller naturlig pozzolan, samt betonger med 80 % slagg eller sulfatresistent sement, viste ingen tegn til skade etter 5 år, og ingen tegn til dannelse av ettringitt eller gips.

For betong i atmosfærisk sone:

- Betonger med ren Portlandsement og sulfatresistent sement klarte seg bra. På den annen side fikk betongene med 40 % flygeaske eller naturlig pozzolan, samt betong med 80 % slagg store skader allerede etter 6-12 måneder. Dette skyldes såkalte fysiske sulfatangrep, hvor sulfatløsning stiger pga. kapillært sug til de tørrere overliggende delene hvor det skjer en avdampning. Når konsentrasjonen overstiger metningsnivået skjer en krystallisering av sulfatsalter, som skaper opprissing og avskalling av betongen. En mulig årsaken til at betongene med høye mengder pozzolaner samt slagg får meste skade, er fordi disse betongene har finere

porestruktur og dermed økt kapillært sug. Det som er en fordel under de fleste omstendigheter er altså en ulempe i slike tilfeller.

Også andre (Stark referert av Thomas 2007) har rapportert at ved fysiske sulfatangrep som beskrevet over, gir selv ikke flygeaske i mengder på 40 % forbedrede egenskaper i forhold til bruk av ordinær Portlandsement.

Sahmaran et al. (2007) har rapportert at tilsetning av flygeaske (32 %) med lavt CaO innhold til en portlandsement med C₃A-innhold på 9,5 % resulterte i svært god sulfatmotstand ved neddykking i 5 % Na₂SO₄-løsning i 78 uker sammenlignet med bruk av sultatresistent sement. En observasjon fra studien er at løsninger med flygeaske er betydelig mer robuste for variasjoner i masseforhold enn betonger med sulfatresistent sement.

Slagg med høye mengder Al₂O₃ gir som tidligere omtalt ikke fullgod sulfatbestandighet, dette er eksempelvis vist av Ogawa et al. (2012). Kombinasjon av sement med relativt lavt C₃A innhold (4,9 %) og 60 % slagg med Al₂O₃-innhold på 15,2 % ga ikke tilstrekkelig god sulfatresistens dokumentert ved ASTM C1012 (5 % natriumsulfat-løsning). På den annen side ga slagg med 10,7 % Al₂O₃-mengde god sulfatresistens. Tilsetning av kalksteinsfiller (4 eller 8 %) i kombinasjon med økt mengde kalsiumsulfat (gips eller anhydritt) ga på den annen side økt sulfatbestandighet selv ved bruk av Portlandsement med relativt høyt C₃A-innhold (8,7 %) i kombinasjon med relativt beskjedne mengder slagg (ca. 30 %) med høyt Al₂O₃-innhold. En mulig mekanisme er at ettringitt som dannes i veldig tidlig fase av hydratasjonsforløpet stabiliseres, slik at det dannes mindre monosulfat som kan reagere med eksterne sulfationer på et senere stadium. Det påpekes at det her er snakk om sulfatbestandighet med hensyn til ettringittdannelse. Tilsetning av kalksteinsfiller vil ikke være et egnet virkemiddel for å hindre thaumasittdannelse.

Higgins (2003) har rapportert at tilsetning av 60 % slagg ga forbedret sulfatbestandighet i natriumsulfat-løsning, og at 70 % slaggtilsetning ga enda bedre bestandighet. Magnesiumsulfat-eksponering er mer aggressivt for betonger med slagg enn natriumsulfat-eksponering, og selv ved slaggnivå på 70 % gir lagring i magnesiumsulfat-løsning betydelig tap av styrke og relativt høy grad av ekspansjon. Det er videre rapportert at små mengder kalksteinsfiller (4 %) og økt sulfatnivå i betongen vha. tilsetning av anhydritt sammen med ga ytterligere økning i sulfatbestandighet for betonger med slagg. Mekanismene bak dette er ikke fullt ut forstått.

Dhole et al. (2013) har analysert sulfatbestandighet (ved lagring i 5 % natriumsulfatløsning) for betonger med 6 ulike flygeasker (25-30 % innblanding) opp mot deres kjemiske og mineralogiske sammensetning. De 2 flygeaskene av type F med lavt CaO-innhold (og høyt SiO₂-innhold) kom begge svært bra ut. Av de 4 flygeaskene av type C var det 3 som ga dårlig bestandighet (2 av disse ga høyere ekspansjon enn referanseblanding uten tilsatt flygeaske), og 1 som ga moderat sulfatbestandighet. Klasse C flygeasker er generelt lite effektive med tanke på å forbedre sulfatbestandigheten, men variasjonen er stor og avhenger både av den kjemiske sammensetning av glass-fasen, men også av mengde og type krystalline faser. Flygeasker av type C er ikke i bruk i Norge, men slike flygeasker tillates brukt i blandingssementer iht. sementstandarden NS-EN 197-1 (type W tilsetning i motsetning til type V tilsetning som brukes i Norge).

Sumer (2012) har imidlertid vist at både klasse C og F flygeasker har gitt forbedret bestandighet ved eksponering i 15 % MgSO₄-løsning, i dette tilfellet var det relativt små forskjeller mellom typer flygeaske. Selv om tilsetning av flygeaske generelt ga forbedret motstand var forskjellene mellom referansemørtel og mørtel med 34 % innblanding av flygeaske relativt små (reduksjon i ekspansjon fra ca. 1,2 til ca. 0,7 % etter 12 måneders eksponering).

Higgins & Crammond (2003) har rapportert en større britisk langtidsstudie opp til 6 år. Studien inneholdt betonger med 5 ulike tilslag, hvorav 4 varianter av kalkstein. Bindemidlene varierte fra ordinær Portlandsement, sulfatresistent sement og 70 % innblanding av slagg med 2 ulike nivåer av Al₂O₃. Betongene ble lagret i 3 ulike MgSO₄-løsninger med konsentrasjoner fra 0,14 - 1,8 %, samt i 1,8 %

Na₂SO₄-løsning. Det ble benyttet 2 temperaturnivåer, henholdsvis 5 og 20°C. Hovedhensikten med studien var å analysere effekt av slaggsement på thaumasitt-sulfatangrep. Denne formen for sulfatangrep opptrer ofte i nærvær av karbonat(bergarter), og forekommer oftere ved lave temperaturer som 5°C enn ved 20°C. Resultatene fra studien er svært komplekse, og trendene varierer med type bergart og temperatur. Men noen hovedkonklusjoner fra studien gis i det følgende:

- Ved 5 °C: Sulfatresistent sement ga ikke bedre bestandighet enn ordinær sement for betonger med kalksteinstilslag. Sulfatresistent sement hadde altså ingen effekt for thaumasitt-sulfatangrep, i motsetning til for andre typer av sulfatangrep. Dette er i tråd med det man kan forvente, ettersom sulfatresistente sementer primært er laget for å hindre forsinket ettringittdannelse.
- For betonger med 70 % slagg var bildet svært sammensatt. For betonger med «gode» kalksteinstilslag ga 70 % slagg en svært god beskyttelse. For betonger med kalksteinstilslag av dårlig kvalitet (henholdsvis dolomitt og oolittisk kalkstein) ga ikke slagg forbedret bestandighet.
- Slagg ga i noen tilfeller dårligere bestandighet mot «konvensjonelle» sulfatangrep (dvs. andre varianter enn thaumasitt-sulfatangrep) enn ordinær Portlandsement, spesielt for betonger uten kalksteinstilslag lagret ved 20°C.

Andre bemerkelsesverdige resultater fra studien er at karbonatbergarter i kombinasjon med slagg gir forbedret motstand mot sulfatangrep, tilsvarende som Ogawa 2012 og Higgins 2003 har rapportert. I tillegg har studien vist at herding i luft (i motsetning til vannlagring) gir forbedret bestandighet, spesielt for slaggbetonger. En mulig årsak til dette er at karbonatiseringen som skjer i overflatesjiktet gir forbedret motstandsevne.

Det finnes en del studier som viser hvordan flygeaske og slagg kan motvirke thaumasitt-sulfatangrep i forbindelse med Portland-kalkfillersementer. Slike sementer med innblandet kalksteinsfiller har blitt populære i Europa og øvrige deler av verden. Den europeiske sementstandarden EN 197-1 tillater slike sementer med innblanding av inntil 35 % kalksteinsfiller. Ifølge Ramezaniapour & Hooton (2012) er et av de store potensielle problemene med denne type sementer mangelfull motstand mot sulfatangrep, spesielt ved lavere temperaturer. I følge Rahman & Bassuoni (2013) skal det relativt store mengder kalksteinsfiller (10 % av bindemiddelmengde eller høyere) før det utgjør et potensielt problem, mens andre har rapportert at selv 5 % kalksteinsfiller kan føre til skadelig thaumasitt-sulfatangrep (Hartshorn et al. 1999). Norcem benytter 4 % kalksteinsfiller i sin nye Standard FA-sement i klasse CEM II/B-M, men da i kombinasjon med 18 % flygeaske. Det er en positiv effekt av inntil 5 % kalksteinsfiller sammen med flygeaske i form av redusert porøsitet og økt trykkfasthet, som dokumentert av de Weerd (2011).

Ramezaniapour & Hooton (2012) har vist at 50 % innblanding av slagg kan gi god motstand mot thaumasitt-sulfatangre (testet ved neddykking i 5 % natriumsulfatløsning ved 5°C) så vel som «konvensjonelle» sulfatangrep basert på ettringittdannelse (testet ved 23°C). 30 % slagg var på den annen side ikke tilstrekkelig til å gi tilstrekkelig motstand mot thaumasitt-sulfatangrep. Det var 5 ulike sementer med i studien, med mengde kalksteinsfiller fra 0-22 %.

Også Tsivilis et al. (2003) har også vist at 50 % slagg ga god motstand mot thaumasitt-sulfatangrep. 30 % flygeaske forsinket angrepet betydelig, men ga ikke tilsvarende god motstand. Det ble benyttet en sement med 15 % kalksteinsfiller, og prøvene ble nedsenket i 1,8 % magnesiumsulfat-løsning ved 5°C.

Borsoi et al. (2000) har dokumentert at 30 % flygeaske eller alternativt 50 % slagg eliminerte sulfatangrep. Det ble benyttet 10 % innblanding av kalksteinsfiller, og prøvene ble eksponert i magnesiumsulfat-løsninger med varierende styrke opp til 3 % ved 5°C. Også sement helt uten C₃A reduserte sulfatangrepet, mens ved bruk av kalksteinsfillersement fikk betongen økende grad av overflateskader med tiden, forårsaket av en kombinasjon av thaumasitt- og ettringittdannelse.

7.3 Syreangrep og kombinasjoner av syre- og sulfatangrep

Revertegat et al. (1992) har studert effekt av 3 ulike pH-nivåer (13, 11,5 og 4,6) i løsninger uten aggressive salter. De ulike pH-nivåene ble oppnådd på følgende vis: pH 13: tilsetning av NaOH og KOH. pH 11,5: tilsetning av $\text{Ca}(\text{OH})_2$. pH 4,6: ved å styre partial-trykket av CO_2 i atmosfæren som var i kontakt med løsning til oppnådd konsentrasjon av CO_2 i løsningen var på 50 mg/l. Forsøkene ble utført på sementpasta med ren Portlandsement (masseforhold 0,37), samt en sement med innblanding av 25 % flygeaske og 25 % slagg (masseforhold 0,39). Prøvestykkene var fuktherdet i 3 måneder før skiver på 4 mm tykkelse ble eksponert for ulike pH-nivåer i 3 år. Selv ved et moderat pH-nivå på 11,5 skjedde det en betydelig nedbrytning av sementpasta med utlekking av kalsium. CH-fasen angripes først, og deretter følger nedbrytning av C-S-H fasen og aluminatfasene. Ved pH-nivå på 11,5 var blandingssementer mer motstandsdyktige, i hovedsak fordi C-S-H fasen er mer stabil. Et pH-nivå på 4,6 er svært aggressivt, og ved dette nivået fant Revertegat et al. (1992) små forskjeller mellom sementpasta av ren Portlandsement og pasta av blandingssement, med en «dekalsifisering» på 70-75 % etter 3 år (målt som tap av CaO). Disse forsøkene viser at ved slike lave pH-nivåer er den kjemiske bestandigheten for sementpasta svært lav selv ved bruk av blandingssementer, og det må gjøres spesielle tiltak i form av overflateforsegling for å skape bestandig betong. For tette betonger med veldig lave masseforhold og høy andel flygeaske/slagg/silikastøv vil imidlertid nedbrytningshastigheten kunne bli lav.

De Belie et al. (1996) har testet motstand av ulike bindemidler mot angrep fra eddiksyre og melkesyre. Disse syrene, som er funnet å være typiske i forings-områdene i grisehus, er svært aggressive mot betong og danner lettløselige kalsiumsalter ved nedbrytning av CH. Dannelse av krystaller av kalsiumlaktat (fra reaksjon mellom melkesyre og CH) kan også føre til ekspansjon og opprissing. Betonger med bindemidler av CEM I, sulfatresistent sement (0 % C_3A), to varianter av CEM II/B-M, CEM III/(både A, B og C) samt en komposittsement CEM V med blanding av slagg og flygeaske ble benyttet, med masseforhold i området 0,37 – 0,39. Betongene ble eksponert for syreløsninger med pH fra 2 - 5,5. Hovedkonklusjoner fra studien er:

- Ved moderat aggressivt miljø (pH = 5,5) var det små forskjeller mellom bindemidlene.
- For pH i området 2 - 4,5 var det forskjeller, og bindemidlene kunne grupperes i 4 grupper etter deres motstandsevne mot syreangrep (motstandsevne i stigende rekkefølge):
 - Sulfatresistent sement med C_3A -innhold på 0 %
 - Ordinær Portlandsement
 - Sementer med flygeaske
 - Sementer med slagg
- Ved sterkt aggressivt miljø (pH =2) ble fastheten for alle betongene kraftig redusert. Det ble ikke funnet noen korrelasjon mellom reduksjon i fasthet og tap av volum/masse.

Det ble ikke funnet noen sammenheng mellom mengde slagg og motstandsevne mot syreangrep, noe som innebærer at alle varianter av slaggsementer ga relativt god motstand mot syreangrep.

Chang et al. (2005) har testet effekt av ulike bindemidler, og også effekt av ulike tilslag, på motstand mot angrep av svovelsyre (H_2SO_4). Betongene ble lagret i en 1 % svovelsyreløsning i 168 døgn, hvor pH ble holdt konstant på ca 1,3 i hele perioden. Betong med 33 % flygeaske i kombinasjon med 7 % silikastøv, ved samtidig bruk av kalkstein som tilslag, ga svært god bestandighet. Betonger med 60 % slagg, og 60 % slagg i kombinasjon med 7 % silikastøv var på den annen side noe mindre bestandige enn tilsvarende betonger med ren Portlandsement. En interessant observasjon fra studien er at betong med tilslag av knust kalkstein er mer bestandig enn kvartsholdig tilslag i nærvær av syre. Årsaken til dette er rapportert å være dels at kalkstein «ofrer» seg ved syreangrep og reduserer syrekonsentrasjonen i overflaten av betongen, dels skyldes det mindre opprissing av overgangssonen mellom tilslag og sementpasta for kalksteinstilslag.

Li & Zhao (2003) har testet effekt av 40 % flygeaske, alternativt 25 % flygeaske i kombinasjon med 15 % slagg, mot angrep fra svovelsyre. Betongene ble neddykket i 2 % H_2SO_4 -løsning allerede etter 3 døgns herding. Betonger med kombinasjon av flygeaske og slagg klarte seg best både målt ved tap av

vekt og målt som relativ fasthetsutvikling (forskjell mellom fasthetsutvikling i vann og fasthetsutvikling i syreløsning). Betongen med flygeaske var noe dårligere, men likevel bedre enn betongen med ren Portlandsement. Betongen med 40 % flygeaske hadde en svært langsom egenskapsutvikling sammenlignet med de 2 andre betongene, og en såpass tidlig eksponering for syreløsning er derfor svært «brutalt» for denne betongen.

Torii & Kawamura (1994) har studert effekt av silikastøv og flygeaske i henholdsvis magnesium- og natriumsulfat, i tillegg til svovelsyre. Hovedresultater er vist i Figur 69, og kommenteres i de følgende avsnitt:

Prøver i svovelsyre (H_2SO_4), se Figur 69, øvre del):

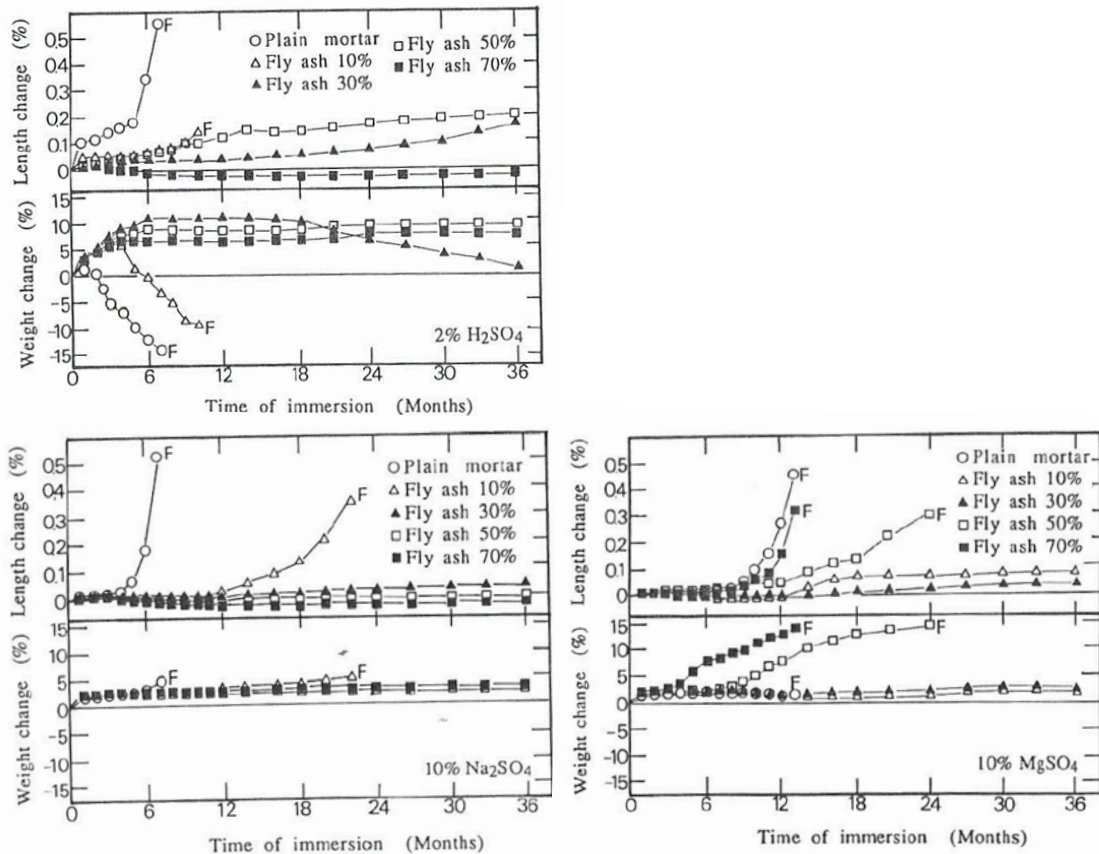
- Mørtel uten flygeaske gikk totalt i oppløsning etter ca. 7 måneder
- 10 % flygeaske ga begrenset effekt, men mørtler med 30 % flygeaske eller mer klarte seg langt bedre. Men selv ved høye doseringer flygeaske skjedde det nedbrytning på lang sikt
- Det var relativt høy ekspansjon i tidlig fase for 50 % flygeaske. Høye vektøkninger tyder på dannelse av reaksjonsprodukter
- 10 % silikastøv motvirket reaksjon effektivt, men 5 % silikastøv var langt mindre effektivt
- Primær nedbrytningsmekanisme var nedbrytning av CH + dannelse av gips

Prøver i 10 % Na_2SO_4 -løsning, se Figur 69, nedre venstre del:

- Mørtel med ren Portlandsement gikk mer eller mindre i oppløsning etter 5 måneder
- Det var relativt begrenset effekt av 10 % flygeaske, men 30 % eller mer flygeaske var meget effektivt
- Det ble registrert dannelse av både ettringitt og gips
- Silikastøv var svært effektivt, det var ingen ekspansjon ved 10 %, ved 5 % mengde var det en liten tendens til ekspansjon etter 3 år

Prøver i 10 % $MgSO_4$ -løsning, se Figur 69, nedre høyre del:

- Det er kjent at magnesiumsulfat er mer aggressivt enn natriumsulfat, fordi det i større grad leder til dekomponering av C-S-H i tillegg til CH (Bertolini et al 2004). Resultatene viser at mørtel uten flygeaske gikk i oppløsning etter 13 måneder, mens mørtel med 30 % flygeaske klarte seg bra.
- Mørtler med 50 og 70 % flygeaske klarte seg på den annen side svært dårlig, med tydelig ekspansjon, opprissing og dekomponering i relativt tidlig alder
- Mørtler med 5 og 10 % silikastøv klarte seg bra, mens for høyere doseringer av silikastøv var det tilsvarende tendens som for flygeaske
- Dannelse av ettringitt, gips og magnesiumhydroksid (brusitt), høyere mengder av reaksjonsproduktene ved høyere doseringsnivåer av flygeaske. Generell nedbrytning av C-S-H og CH bekreftet ved SEM, omdanning til mer porøs natur.



Figur 69 Vekt- og lengdeendring for mørtelprismer lagret i henholdsvis 2 % H₂SO₄-løsning (øvre figur), 10 % Na₂SO₄-løsning (nedre venstre figur) samt 10 % MgSO₄-løsning (nedre høyre figur). Masseforhold i intervallet 0,48-0,55. Mengde flygeaske i vek % av totalt bindemiddel fra 10-70 %. Fra Torii & Kawamura (1994).

Cao et al. (1997) har gjennomført en studie av effekten av innblanding av flygeaske (20 og 40 %), slag (40, 60 og 80 %) og silikastøv (5 og 10 %). Studien ble gjennomført ved neddykking av mørtelprismer i 5 % Na₂SO₄-løsning i ett år, og måling av ekspansjon og fasthet. I tillegg til «normal» løsning med pH på 12 ble det brukt løsninger med konstant pH på henholdsvis 7 og 3, noe som ble oppnådd vha. tilsetning av H₂SO₄ (svovelsyre) ved automatisert titrering. Ved synkende pH vil dekalsifisering av C-S-H-fasen og tap av styrke spille større rolle enn ekspansive reaksjoner med ettringitt- eller gipsdannelse. En oppsummering fra studien er gitt nedenfor:

- 20 % flygeaske ga god sulfatbestandighet ved pH på 12 og 7. Ved pH på 3 var ikke 20 % flygeaske tilstrekkelig, og ga et betydelig dropp i trykkfasthet fra ca. 200 døgn lagring. 40 % flygeaske ga på den annen side god motstand ved alle pH-nivåer.
- 5 % silikastøv ga en god motstand over hele pH-området, selv om det ved pH på 3 var redusert trykkfasthet på lang sikt. 10 % silikastøv førte til noe lavere sulfatresistens enn 5 % silikastøv.
- Slaggbetongene var i større grad følsomme for variasjon i pH enn betongene med flygeaske og silikastøv. 40 % slag ga relativt god sulfatresistens ved pH på 12, men ga både økt ekspansjon og tap av fasthet ved lavere pH-nivåer. Ved pH på 7 var selv 60 % slagmengde ikke «godt nok», mens 80 % slag ga god sulfatresistans for alle pH-nivåer.

Det må imidlertid påpekes at slagget som ble benyttet i studien av Cao et al. (1997) hadde et relativt høyt innhold av Al₂O₃ på 14,9 %, se tidligere diskusjon om effekten av dette.

En observasjon fra forsøkene er at sement med lavere C_3A -innhold enn 5 % ikke behøver å være veldig god med tanke på sulfatbestandighet (av typen som gir forsinket ettringittdannelse). Det ble også funnet at lavt C_3S -innhold er en viktig faktor, altså at en effektiv sulfatresistent sement både skal ha. Et moment her er at lavt innhold av C_3S normalt vil føre til høyere innhold av C_2S , som ved hydratasjon gir lavere mengde CH enn C_3S gjør.

7.4 Konklusjoner

Litteraturgjennomgangen har vist at bruk av flygeaske og slagg i veldig mange tilfeller gir forbedret kjemisk bestandighet. Forklaringen på dette er sammensatt, hvor de 3 viktigste årsakene er:

- Forbedret tetthet pga. «forfining» av porestruktur. Denne effekten kan også delvis oppnås vha. redusert masseforhold.
- Redusert mengde CH gjennom pozzolan reaksjon (primært for flygeaske og silikastøv), samt gjennom «uttynningseffekten» ved at mindre mengde Portlandsement fører til mindre dannelse av CH.
- Redusert mengde C_3A ved «uttynning». Viktig for sulfatangrep som følge av ettringittdannelse, i mindre grad viktig for syreangrep. Har mindre betydning for thaumasitt-sulfatangrep som angriper CH og C-S-H fasene.

Flygeaske gir generelt forbedret sulfatbestandighet. Nødvendig mengde flygeaske er avhengig av styrken på sulfatangrepet, i tillegg til Portlandssementens kjemiske sammensetning. I de fleste tilfeller gir høyere doseringsnivåer (> 30-40%) bedre motstand enn lavere nivåer. Det er imidlertid rapportert om to unntak:

- For fysiske sulfatangrep, som skyldes krystallisering av sulfatsalter, er det rapportert at flygeaske generelt ikke er effektivt, og i flere tilfeller kan gi større skader enn bruk av Portlandsement
- Ved angrep av $MgSO_4$ er det litteratur som viser god motstandsevne med 30 % flygeaskedosering, men at motstandsevnen reduseres ved høyere doseringsnivåer

Slagg gir generelt forbedret sulfatbestandighet. Generelt behøves det 50 % eller mer slagginnblanding, men nødvendig mengde avhenger blant annet av mengde Al_2O_3 i slagget. Ved høye mengder (> 11 %) behøves det generelt høyere slaggdoseringer.

Det er rapportert at relativt små mengder av kalksteinsfiller, og også kalsiumsulfat (i form av gips eller anhydritt) i kombinasjon med slagg kan gi forbedret motstand mot sulfatangrep som gir ettringittdannelse. Kalksteinsfiller i mengder > ca. 5 % vil på den annen side kunne føre til thaumasitt-sulfatangrep.

Det er gitt eksempler på at slaggsementer kan gi relativt god motstand mot syreangrep. Også flygeaskebetonger gir forbedret motstand mot syreangrep. Generelt er kombinasjonen av flygeaske og silikastøv gunstig med tanke på syrebestandighet.

8 Norske erfaringer

8.1 Innledning

Norske kystbruer bygget fram til slutten av 1980-tallet har gitt omfattende problemer med armeringskorrosjon. Årsaken til de store problemene er en kombinasjon av relativt høye masseforhold, bruk av ren Portlandsement, og alt for liberale overdekningskrav. Typiske brubetonger på 1980-tallet var fasthetsklasse C35, med masseforhold på ca. 0,50. På det laveste var kravene 30 mm nominell overdekning. Etter «oppvåkningen» man fikk på 1980-tallet, hvor det ble avdekket et stort omfang av armeringskorrosjon på kystbruene, kom det i 1988 nye betongbestemmelser og krav til masseforhold på 0,40 eller lavere. Fra 1997 ble betongspesifikasjonene SV-40 og SV-30 innført. SV-30 betong med masseforhold på maksimalt 0,38 og med 8-11 % silikastøv ble foreskrevet for de mest kloridutsatte konstruksjonsdelene. I samme periode ble det gjort kraftige innskjerpinger av overdekningskrav, og i 1994 kom det også nye regler for utførelse og sikring av overdekning nedfelt i Intern rapport 1731 (Kompen og Liestøl 1994).

Siden 1990-tallet har det vært svært høy fokus på bestandighet, spesielt relatert til armeringskorrosjon. I tillegg til bruk av silikastøv, har det fra 1990-tallet blitt mer og mer fokus på bruk av flygeaske og slagg. Sementer med flygeaske (og også slagg) ble introdusert på det norske markedet på 1980-tallet gjennom de såkalte «MP-sementene» til Norcem, med bruk av først 10 % og deretter 20 % flygeaske. Innblanding av flygeaske har etter hvert blitt normalt i Norcems sementer. Det har vært gjennomført en hel del forskningsaktiviteter knyttet til bestandighetsaspektene ved bruk av flygeaske i betong. I tillegg til kloridinntrengning har det vært høy fokus på «lavvarmeegenskapene» til flygeaskesementer.

I de følgende avsnitt gis en kort oppsummering av noen av de viktigste forskningsaktivitetene rundt slagg og flygeaske i Norge. Kapitlet gir ikke en fullstendig oversikt over gjennomførte aktiviteter, men kun et utvalg. Det er viet spesiell fokus på aktiviteter og prosjekter som har vært gjennomført i regi av Statens vegvesen.

Erfaringene som presenteres her er relatert til konstruksjonsbetong. Erfaringer innen området sprøytebetong vil bli rapportert i egen rapport innenfor Varige konstruksjoner.

8.2 Kloridbestandig betong, Fase I

8.2.1 Innledning

Prosjektet «Utvikling av kloridbestandig betong» ble igangsatt i 1993, som oppfølger til det tidligere FoU-prosjektet «Kloridbestandighet for kystbruer av betong». Prosjektet la til rette for å dokumentere bestandighetsegenskaper gjennom felteksponering. Men samtidig ble det gjennomført grundig laboratorieprøving for å forsøke å etablere korrelasjon mellom laboratoriemetoder og målinger fra felteksponert betong. Betongene produsert på betongstasjon og støpt ut under «feltmessige forhold». Det ble støpt ut søyleelementer som ble eksponert delvis neddykket i sjøvann i Kristiansand og bjelkeelementer som ble opphengt delvis neddykket i sjøvann i Sandnessjøen. I tillegg ble det støpt ut veggelementer for eksponering langs saltet hovedvei (Oslo), i skvalpesonen under Helgelandsbrua, langs veien ut mot Helgelandsbrua og innendørs på Mosjøen vegstasjon. I det følgende vil det vises resultater fra feltstasjonen i Sandnessjøen, se bilde i Figur 70.



Figur 70 Bjelkeelementer opphengt delvis neddykket i sjøvann i Sandnessjøen. Fra Rannem Isaksen & Holtmoen (1994).

Det ble i denne undersøkelsen lagt vekt på å designe betongtyper som gir bedre beskyttelse mot armeringskorrosjon for betonger eksponert i aggressivt kloridholdig miljø, eksempelvis kystbruer. Studien tar i betydelig grad for seg variasjon i masseforhold og mengde silikastøv. Kun en av betongene inneholder flygeaske. En oversikt over betongene som ble fremstilt er gitt i Tabell 28.

Tabell 28 Oversikt over mix-design for betongene i Kloridbestandig betong Fase I. Oppgitte masser i kg/m^3 . K-faktor for silikastøv = 2,0. Flygeaske i betong E var innmalt i sementen, dvs. at $k = 1,0$ for. Fra Larsen (2006).

Concrete	Cement	FA	SF	w/b	Paste volume	Cement type	Comments
A	326	-	-	0.51	28.3 %	P30	Reference concrete
B	373	-	15.5	0.38	28.6 %	P30	Lower w/b, 4% csf
D	379	-	29.7	0.39	30.8 %	SR	SR cement, 8% csf
E	307	77	13.4	0.39	29.5 %	MP30	Three-powder mix
F	398	-	49.9	0.42	34.8 %	P30	12.5% SF
G	324	-	32.5	0.46	29.6 %	P30	10.0% SF
H	381	-	15.1	0.40	29.8 %	P30	With filler 70kg/m^3
I	378	-	16.4	0.39	29.5 %	P30	Corrosion inhibitor *
J	432	-	28.8	0.34	32.1 %	P30	Low w/b, 7% SF
K	380	-	16.1	0.37	29.0 %	P30	Corrosion inhibitor □
L	379	-	15.7	0.37	28.8 %	P30	Hydrophobic agent #
M	397	-	50.0	0.42	35.0 %	P30	Corrosion inhibitor □
N	399	-	49.5	0.41	34.4 %	P30	Hydrophobic agent #
O	377	-	15.6	0.40	29.5 %	HS65	Slower cement
P	381	-	8.2	0.37	28.4 %	P30	Latex §
Q	379	-	15.5	0.39	29.6 %	V P30	Different cement type
R	399	-	49.9	0.41	34.6 %	V P30	Different cement type

P30: Norwegian (NORCEM) OPC cement, not used today, type CEM I

MP30: Norwegian fly ash blended (20%) OPC, not used today, type CEM II/A-V

HS65: Norwegian high strength OPC, not used today, type CEM I

SR: Norwegian sulphate resistant OPC, type CEM I

V P30: Imported OPC from UK (Blue Circle Cement), not used today, type CEM I

* Water based organic corrosion inhibitor (inh1), dosage 0.5% of OPC

□ Water based organic corrosion inhibitor (inh2), dosage 0.9 (M) - 1.2 (K) % of OPC

Hydrophobic agent based on stearin acid, dosage 1.0 (N) - 2.1 (L) % of OPC

§ Butadiene-styrene based polymer dispersion, dosage 9.6% of OPC

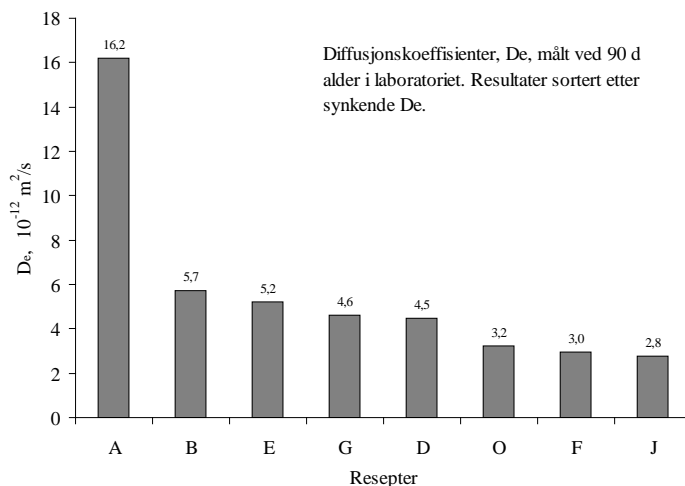
Forklaringer til valg av betonger er gitt i Liestøl et al. (1995):

- Resept A: Referanseresept ment å tilsvare gammel brubetong C35 som ble brukt inntil 1988. Satt opp uten L-stoff fordi luftinnholdet i denne betongen ofte var ustabil
- Resept B: Referanseresept, tilsvarer vanlig brubetong etter Prosesskode-2 av 1988
- Resept D, E, O og Q: Som resept B, men alternative sementtyper. Nedjustert mengde silikastøv for MP30-sement (resept E) for å motvirke økt seighet for sementen. Motsatt for resept D med SR-sement, med økt mengde silikastøv for å motvirke separasjonstendens.
- Resept F og R tester teorien om at høy andel av silikastøv (inntil 12,5 %) reduserer kloridinnmengningen for 2 ulike sementer.
- Resept G har noe lavere mengde silikastøv og høyere masseforhold enn resept F for å teste hvor mye man taper på det kvalitetsmessig
- Resept H tester om tilsetning av kalksteinsfiller har betydning for kloridtetthet
- Resept J tester effekten av redusert masseforhold. Inneholder 7 % silikastøv, ikke L-stoff
- Reseptene I, K, L, M og N tester effekt av «eksotiske tilsetningsstoffer» som korrosjonsinhibitor, hydrofoberingsmiddel og lateks, se detaljer i tabellen.

Det tydeligste skillet er at betong A representerer en lavkvalitetsbetong, mens alle de øvrige betongene var forventet å være høykvalitetsbetonger.

8.2.2 Resultater fra lab- og feltundersøkelser

Laboratorieforsøk av kloriddiffusivitet iht. NT Build 443 etter 90 døgns herding ble utført for 8 av betongene, se resultater i Figur 71. Den mest slående forskjellen er at «gammel brubetong» (prøve A) har høy diffusjonskoeffisient, mens alle de andre betongene har gode diffusjonsegenskaper. Det er riktignok noen forskjeller også mellom de øvrige betongene, hvor betong J med lavest masseforhold og relativt høy mengde silikastøv hadde lavest diffusjonskoeffisient, D_e .



Figur 71 Kloriddiffusjonskoeffisient målt på prøvestykker fra utborede kjerner (sagflater) ved neddykket kloriddiffusjon iht. NT Build 443 målt ved 90 døgns alder. Fra Larsen (2005).

Beregnete diffusjonskoeffisienter fra henholdsvis 2,5 og 10 års felteksponering er vist i Tabell 29. Resultatene viser at diffusjonskoeffisientene for neddykket betong (SUB) i gjennomsnitt er noe høyere enn for betong i atmosfærisk (ATM) og tidevannssone (TID). Resultatene viser ellers at for mange av betongene har verdien av D_e økt fra 2,5 til 10 år, mens man normalt vil forvente en redusert D_e med

tiden pga. «aldringseffekten». Noen hovedkonklusjoner etter 10- års felteksponering (Larsen 2005, 2006):

- Betong med flygeaske og silikastøv (betong E) ga lavest D_e etter 10 år, det er også den betongen som ga størst reduksjon fra 2,5 til 10 år
- Tilsetning av silikastøv ga redusert diffusjonskoeffisient, men det er ikke noen klar sammenheng mellom mengde silikastøv og D_e
- Det var store forskjeller mellom ulike typer CEM I, hvor f.eks. HS65 (betong O) hadde betydelig lavere D_e enn P30 (betong B)
- Det var ikke noen entydig effekt av maseforholdet. Betong med høyest masseforhold (betong A) ga høyest D_e , men dette var også den eneste betongen uten silikastøv

I og med at valg av betonger ikke var gjort ut fra systematisk variasjon av parametere (som masseforhold, silikastøv etc.) er det vanskelig å trekke entydige konklusjoner ut fra materialet.

Tabell 29 Kloriddiffusjonskoeffisienter etter henholdsvis 2,5 og 10 års felteksponering. For detaljer om betongtyper, se Tabell 28. Målt for henholdsvis betong alltid over vann (ATM), betong i tidevannsonen (TID) og betong som alltid er neddykket (SUB). 10 års verdi for betong B (SUB) er usikker. Fra Larsen (2006).

Concrete	2.5 years exposure			10 years exposure			Average	
	ATM	TID	SUB	ATM	TID	SUB	2.5 yrs	10 yrs
A	0.76	1.70	1.17	1.08	2.11	1.52	1.21	1.57
B	0.53	0.46	0.82	0.30	0.51	(2.30)	0.60	1.04
D	0.28	0.37	0.57	0.25	0.32	0.50	0.41	0.36
E	0.94	0.30	0.64	0.22	0.14	0.25	0.63	0.20
F	0.70	0.37	0.51	0.26	0.19	0.36	0.53	0.27
G	0.53	0.56	0.79	0.35	0.36	0.52	0.63	0.41
H	0.45	0.45	0.79	0.30	0.25	0.45	0.56	0.33
I	0.47	0.65	0.64	0.34	0.55	0.75	0.59	0.55
J	0.45	0.18	0.42	0.19	0.23	0.43	0.35	0.28
K	0.38	0.51	0.69	0.24	0.36	0.88	0.53	0.49
L	0.66	0.55	1.09	0.32	0.45	1.56	0.77	0.78
M	0.22	0.35	0.48	0.10	0.15	0.68	0.35	0.31
N	0.21	0.51	0.34	0.17	0.17	0.35	0.35	0.23
O	0.44	0.39	0.57	0.13	0.21	0.46	0.47	0.27
P	0.66	0.38	1.08	0.27	0.33	0.69	0.71	0.43
Q	0.39	0.39	0.48	0.28	0.40	0.31	0.42	0.33
R	0.12	0.14	0.23	0.26	0.32	0.24	0.16	0.27
<i>Average</i>	<i>0.48</i>	<i>0.49</i>	<i>0.67</i>	<i>0.30</i>	<i>0.41</i>	<i>0.72</i>		

Et forhold av stor betydning dersom man skal bruke resultater fra laboratoriet som input i levetidsberegninger, er at diffusjonskoeffisientene som ble oppnådd ved testing i laboratoriet (etter 90 døgn herdig) i gjennomsnitt var ca. 10 ganger høyere enn diffusjonskoeffisient basert på 10 års felteksponering. For betongen med flygeaske (E) var imidlertid laboratorieresultatet hele 25 ganger høyere enn feltemålingen. Dette viser tydelig at den faktiske positive effekten som flygeaske gir på lang sikt i betydelig grad blir underestimert i forhold til øvrige betonger ved akselererte forsøk i tidlig fase. Dette er også i tråd med internasjonale erfaringer vist i Kapittel 5.

Larsen (2006) har også dokumentert overflatekonsentrasjonen C_s for alle betongtyper, alle eksponeringsforhold og alle tidspunkter (ikke vist her). Det var i gjennomsnitt ingen økning i C_s fra 2,5 til 10 år for betonger i tidevannsonen og neddykket sone, mens det i atmosfærisk sone var en økning på 38 %. Etter 10 år var det i gjennomsnitt heller ingen forskjeller mellom overflatekonsentrasjonene for sonene ATM, TID og SUB. Dersom man ser på verdier for en og en betongresept var det imidlertid noen

forskjeller mellom type sement og eksponeringsforhold. C_s er altså ikke en ren «miljøegenskap», men er som forventet også påvirket av betongens egenskaper som for eksempel porøsitet og kloridbindingskapasitet. Spennet i C_s etter 10 år går fra 0,22 (betong A) til 0,79 (betong R).

8.3 Kloridbestandig betong, Fase II

8.3.1 Innledning

Som en oppfølger til Kloridbestandig betong Fase I ble det i 1998 etablert et nytt testfelt under navnet «Kloridbestandig betong Fase II». Testfeltet er lokalisert i Solsvik på øya Sotra vest for Bergen, nær tettstedet Ågotnes. Det ble støpt 3 m lange bjelkeelementer med totalt 14 betongtyper. Betongelementene er eksponert på tilsvarende måte som i Mosjøen, se foregående avsnitt. De 14 betongene representerer både gammel brubetong, betonger som var i bruk på tidspunktet feltstasjonen ble etablert, og betonger man så for seg som mulige fremtidige brubetonger. Tilsvarende som i Fase I ble alle betongene produsert på betongstasjon og støpt ut under «feltmessige forhold». En oversikt over betongene er vist i Tabell 30. Det ble lagt større vekt på flygeaske i denne undersøkelsen enn i Fase I, men det ble ikke prøvd ut høyere doseringsnivåer enn 20 % flygeaske. En betong med slaggsement ble også med. I tillegg var det med 2 lettbetonger, som begge representerer betongresepter som er benyttet i bruer, henholdsvis i Raftsundbrua (betong 13) og i Stolmasundet bru (betong 14).

Tabell 30 Oversikt over betonger fra Kloridbestandig betong Fase II. Beregnet w/b er her basert på $k = 1,0$ både for silikastøv og flygeaske. Fra Larsen et al. (2006b).

Concrete	Cement	PFA	BFS	CSF	Water #	Sand	Gravel	w/b	Cement type
1	326	-	-	-	181	939	886	0.56	CEM I
2	365	-	-	15	180	932	880	0.47	CEM I
3	374	-	-	34	192	861	881	0.47	CEM I
4	378	-	-	34	181	872	898	0.44	CEM I
5	312 *	79	-	16	175	885	918	0.43	CEM II/A-V
6	389 **	-	-	35	186	827	932	0.44	CEM I
7	139 ***	-	254	16	165	889	920	0.40	CEM III/A
8	338	84	-	17	186	795	926	0.42	CEM I
9	443	-	-	40	153	823	913	0.32	CEM I
10	360 *	90	-	40	165	814	928	0.34	CEM II/A-V
11	406	101	-	20	173	742	922	0.33	CEM I
12	384	95	-	19	169	798	926	0.34	CEM I
13	435	-	-	25	185	738	587 □	0.40	CEM I
14	406	-	-	34	188	707	591 □	0.43	CEM I

Free water content (total water minus absorbed water in the aggregate)
 * PFA blended OPC; 20% PFA/80% OPC
 ** Sulphate resistant OPC
 *** BFS blended OPC; 65% BFS/35% OPC
 □ Light weight aggregate (high strength)

Det ble plassert ut totalt 6 bjelker av hver betongtype, 2 urissede bjelker med overdekning på 25 mm, 2 urissede bjelker med overdekning på 60 mm, samt 2 bjelker med overdekning på 25 mm som står eksponert med åpne bøyeriss. 3 prøvestykker av hver betongtype ble instrumentert med innstøpte elektroder.

8.3.2 Resultater fra lab- og feltundersøkelser

Resultater fra Kloridbestandig betong Fase II er i liten grad blitt rapportert/publisert, men det vil her vises noen utvalgte resultater for kloriddiffusjon og resistivitet rapportert av Larsen (2013). Beregnede diffusjonskoeffisienter og overflatekonsentrasjon av klorider for henholdsvis 3 års felteksponering og laboratorieforsøk etter 90 døgns herding er vist i Tabell 31. Det er bemerkelsesverdig store forskjeller mellom beregnet diffusjonskoeffisient for atmosfærisk sone kontra tidevannssone og neddykket sone, med svært lave verdier for atmosfærisk sone. Dataene avviker i betydelig grad fra verdier i Fase I.

Alle betongene det er vist resultater for har meget lave diffusjonskoeffisienter etter 3 års felteksponering. Betongen som hadde aller lavest D_e etter 3 år er betong med Anleggsement, 9 % silikastøv og masseforhold på 0,29. Betongene med trepulverblending av 20 % FA (både STD og ANL) + 4 % silikastøv og masseforhold på 0,41 hadde omtrent tilsvarende egenskaper, og kun marginalt høyere D_e etter 3 år. Betongene med FA+ silikastøv er de betongene med forventet høyest potensiale for å gi ytterligere reduksjon i D_e ved videre eksponering. Det er ellers verdt å merke seg at det ser ut til å bety lite om det er 4 eller 9 % silikastøv, det viktigste er at det er en viss basisdosering av silikastøv i betongen. Det er videre verdt å merke seg hvor stor forskjell det er mellom Anleggsement og Standardsement (for betonger med 9 % silikastøv), hvor Anleggsement gir lavest D_e .

Tabell 31 Utvalgte resultater fra Kloridbestandig betong Fase II. Beregnede masseforhold basert på k-faktorer på 1,0 og 2,0 for henholdsvis flygeaske og silikastøv. Fra Larsen (2013).

Betong	Sement	m	Silika	Alder år	Eksponering	C_0 % bet	C_{max} % bet	D $10^{-12} m^2/s$
KBB S4	Standard	0,46	4,1%	3	0,3-1,5m oh, Solsvik	0,13		0,14
				3	Tidevann, Solsvik	0,24		0,95
				3	Neddykket, Solsvik	0,38		1,30
				90d	Bulkdiff, lab	0,75		14,5
KBB S9	Standard	0,43	9,1%	3	0,3-1,5m oh, Solsvik	0,16		0,18
				3	Tidevann, Solsvik	0,33		0,96
				3	Neddykket, Solsvik	0,36		1,01
				90d	Bulkdiff, lab	0,81		12,9
KBB A9	Anlegg	0,41	9,0%	3	0,3-1,5m oh, Solsvik	0,13		0,07
				3	Tidevann, Solsvik	0,36		0,36
				3	Neddykket, Solsvik	0,45		0,60
				90d	Bulkdiff, lab	0,76		4,1
KBB F4	Standard FA	0,41	4,1%	3	0,3-1,5m oh, Solsvik	0,13		0,05
				3	Tidevann, Solsvik	0,48		0,42
				3	Neddykket, Solsvik	0,55		0,40
				90d	Bulkdiff, lab	0,76		4,4
KBB Af5	Anlegg + FA (tot 19% FA)	0,41	4,0%	3	0,3-1,5m oh, Solsvik	0,17		0,06
				3	Tidevann, Solsvik	0,36		0,48
				3	Neddykket, Solsvik	0,38		0,41
				90d	Bulkdiff, lab	0,89		4,0
KBB 3A9	Anlegg	0,29	9,0%	3	0,3-1,5m oh, Solsvik	0,18		0,03
				3	Tidevann, Solsvik	0,54		0,25
				3	Neddykket, Solsvik	0,63		0,34
				90d	Bulkdiff, lab	0,68		2,8
KBB 3Af5	Anlegg + FA (tot 19% FA)	0,32	3,9%	3	0,3-1,5m oh, Solsvik	0,16		0,06
				3	Tidevann, Solsvik	0,44		0,50
				3	Neddykket, Solsvik	0,69		0,68
				90d	Bulkdiff, lab	0,83		3,3

Data for kloridprøving ved senere aldre enn 3 år er ikke tilgjengelig. Derimot er resultater for resistivitet etter 8 års felteksponering rapportert i en konferanseartikkel av Larsen et al. (2006b). Gjennomsnittsverdier for trepulverblandinger med FA + silikastøv (PFA blended) og betonger med silikastøv (CSF blended) er vist i Tabell 32. Vi ser at initialmålingene viser at betongene med flygeaske

lå noe lavere i resistivitet enn betongene med kun silikastøv. Etter 8 år har imidlertid dette snudd, og resistivitet for flygeaskebetongene var langt høyere. Resistivitetsverdiene for flygeaskebetonger har økt med en faktor på ca. 10 etter 8 år, mens verdien for betongene med kun silikastøv har økt med litt over 2. Merk ellers de store forskjellene i verdier for betonger i de ulike sonene, hvor betongene i atmosfærisk sone har de høyeste verdiene. Resistivitet er som diskutert tidligere en funksjon av porøsitet, ionekonsentrasjon og ikke minst fukt. Forskjellene i fukt har antagelig størst betydning her, men også forskjeller i kloridkonsentrasjon vil kunne ha betydelig effekt som diskutert i Kapittel 5.

Tabell 32 Gjennomsnittlig resistivitet for betonger med flygeaske og silikastøv (PFA blended) og betonger med silikastøv (CSF blended) ved 10°C. Posisjon a) atmosfærisk sone, b) tidevannssone, c) neddykket sone. Verdier i Ωm . Fra Larsen et al. (2006b).

Binder comp.	All beams initially			All beams after 8 years		
	Pos. a)	Pos. b)	Pos. c)	Pos. a)	Pos. b)	Pos. c)
PFA blended	216	201	173	2447	1955	1193
CSF blended	323	288	295	729	630	483

8.4 Kloridinntrengning i ressursvennlig kvalitetsbetong

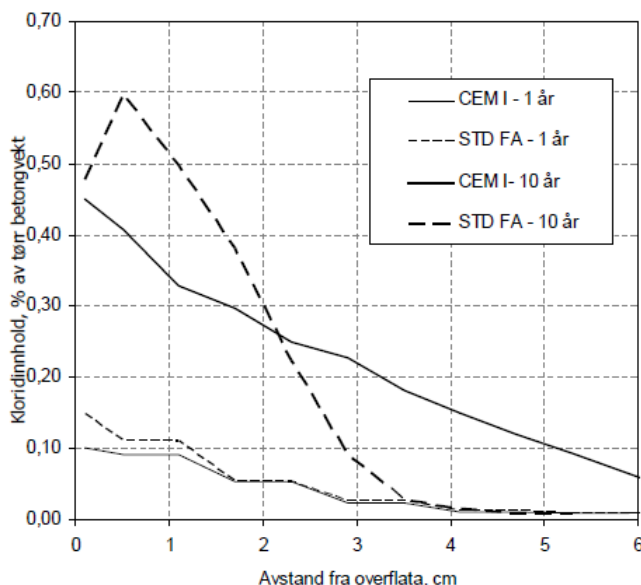
En av de mest omfattende norske studiene av flygeaske som er gjennomført, dokumenterer effekt av både mengde flygeaske og flygeaskens finhet. Studien er rapportert av Kjellsen & Skjølvold (2003) og Skjølvold (2009). Det ble gjennomført målinger for betonger herdet i laboratoriebetingelser, samt ved 2 feltstasjoner. På den ene feltstasjonen i Eidangerfjorden nær Brevik har prøvene (etter 2 måneders forutgående herding) vært konstant eksponert for sjøvann på ca. 5 m dyp. På den andre feltstasjonen på Østmarkneset i Trondheimsfjorden har prøvene (etter 1 måneds forutgående herding) vært eksponert i tidevannssonen. Prøvene fra Østmarkneset er ifølge Skjølvold (2009) mer pålitelige fordi hvert prøveresultat består av flere analyser. I det følgende er derfor resultater fra Østmarkneset vist. I tillegg er det vist resultater for betonger lagret i laboratoriet ved Sintef. Det påpekes imidlertid at målt inntrengning av klorider er gjennomgående lavere for prøvene konstant neddykket i Eidangerfjorden enn prøvene eksponert i tidevannssonen på Østmarkneset. Beregnede diffusjonskoeffisienter er i gjennomsnitt ca. dobbelt så høye for prøvene på Østmarkneset. Kloridkonsentrasjonen er målt til 1,2 % i Eidangerfjorden, men er ikke dokumentert for Østmarkneset som antas å ha høyere kloridinnhold.

Det ble i dette delprosjektet støpt ut 12 ulike betonger med masseforhold på 0,45. De ble i tillegg støpt ut 2 betonger med masseforhold 0,40 (med og uten silikastøv). Hovedmålsetningen med programmet var å studere effekten av bindemiddelsammensetning på kloridinntrengning i betong. Følgende bindemidler ble studert.

- Ulike typer Portlandssementer (CEM I)
- Portland flygeaskement CEM II/A-V
- Tilsatt flygeaske, i varierende mengde og med ulike «malningsgrader»

Kloridprofilene etter 10 års eksponering er veldig forskjellige for CEM I og for betonger med flygeaske. I Figur 72 vises «typiske» kloridprofiler fra delprosjektet. Som det fremgår er profilen for STD FA bratt med en topp like innenfor overflaten, noe som er typisk for flygeaskesementer. For CEM I er kurven flatere. Kurvene etter 1 år var på den annen side ganske like for begge bindemiddeltypene.

Vi kan ellers merke oss at fronten med kloridinnhold på 0,1 % av betongvekt etter 10 år lå på ca. 29 mm for STD FA, mens den lå på ca. 51 mm inn for CEM I. Det er altså en stor effekt av flygeaske på betongens motstand mot kloridinntrengning.



Figur 72 Typiske kloridprofiler for betong med ulike typer sement (CEM I kontra STD FA) etter 1 og 10 års felteksponering. Fra Skjølsvold (2009).

I Tabell 33 vises utvalgte resultater fra forsøksserien fram til felteksponering etter ca. 9 år. Resultatene er for sagflater eksponert i skvalpesonen på Østmarkneset.

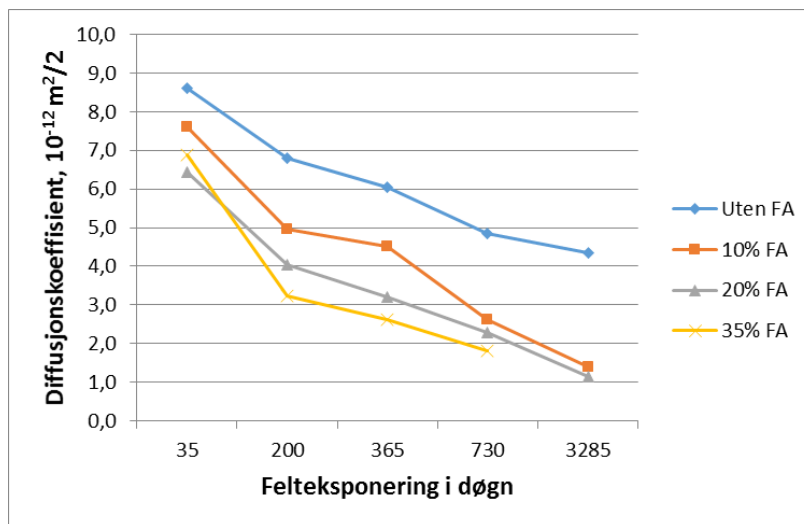
Tabell 33 Utvalgte resultater fra “Kloridinntrengning i ressursvennlig kvalitetsbetong”. Alle viste resultater er for betonger med sagflater eksponert i skvalpesonen på Østmarkneset (bortsett fra resultater merket «lab.test NT Build 443» som ble vannlagret i lab 6 måneder før prøving). $K = 1,0$ for flygeaske og silikastøv. Resultater fra Kjellsen & Skjølsvold (2003) og Skjølsvold (2009).

Resept nr		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Sement, kg/m ³	Anleggsement	374		94	83	74	59	73	73					
	Standard. FA sement		369									407	386	
	Standardsement			280	247	221	178	220	220	369				
	Industrisement										369			
Flygeaske, kg/m ³	Umalt 468							73						
	Finmalt 710				37	74	128							
	Finmalt 1019								73					
Bindemiddelsammensetning	Mengde FA (%)	0	20	0	10	20	35	20	20	0	0	20	20	
	Silikastøv (%)	-	-	-	-	-	-	-	-				4	
	w/b	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.40	0.40	
Klorid-diffusjon	Lab. test, NT Build 443	6 måneder, Da, 10 ⁻¹² m ² /s	9.9	3.1	10.8	5.0	2.8	1.8	2.1	1.6	10.4	11.4	2.4	2.0
		35 dager, Da, 10 ⁻¹² m ² /s	7.3	7.3	10.2	7.6	8.1	6.9	5.8	4.6	8.8	8.1	6.7	4.1
		200 dager, Da, 10 ⁻¹² m ² /s	6.2	5.7	7.1	5.0	4.5	3.2	3.7	2.3	6.8	7.1	5.1	2.4
		1 år, Da, 10 ⁻¹² m ² /s	6.0	4.3	6.5	4.5	3.2	2.6	3.3	2.1	6.2	5.4	4.2	2.0
		2 år, Da, 10 ⁻¹² m ² /s	4.9	3.1	4.9	2.6	2.0	1.8	2.3	1.7	4.7	4.9	2.5	1.5
		9 år, Da, 10 ⁻¹² m ² /s	4.0	1.5	4.2	1.4	1.0			0.9	4.5	4.6	1.0	0.7
	Felteksponering, beregninger	28 dager Da ₀ , 10 ⁻¹² m ² /s	8.0	9.6	10.8	9.7	9.8	8.1	6.8	5.0	9.3	8.6	9.7	4.9
Aldringseffekt α (28d-9å)		0.15	0.36	0.22	0.39	0.47	0.47	0.34	0.36	0.19	0.16	0.43	0.4	
Elektrisk resistiv.	Lab, 2 år	Ωm	88	443	93	298	597	962	516	593	103	99	608	917
		Felt, 2 år, uten klorider	Ωm	150	284	147	237	415	504			155		
		Felt, 2 år, med klorider	Ωm	113	181	116	191	285	357			111		

Resultatene viser generelt at det er samsvar mellom feltforsøk og aksellererte forsøk i laboratorium (etter 6 måneders forutgående lagring). Det er imidlertid en tendens til at flygeaskens positive effekt relativt sett er større i lab-forsøkene kontra i feltforsøkene. Dette kan man se ved å sammenligne verdiene fra 6 måneders lab mot 200 dagers felteksponering. Forskjellen antas å skyldes at flygeaskebetongene som er vannlagret i lab ved 20°C i langt større grad har reagert pozzolant og bidratt til å tette betongen enn tilsvarende betonger lagret i sjø ved betydelig lavere temperaturer.

Forsøksserien viser tydelig at tilsetning av flygeaske har gitt betonger med vesentlig større motstand mot kloridinntrengning enn referansen uten flygeaske, dette er tydelig illustrert i plottet i Figur 73. Den relative forskjellen var økende med økende eksponeringstid, selv om alle betongene ble tettere med økende alder. Vi ser også en tendens til at økt mengde flygeaske har gitt større tettende effekt. Den beregnede aldringseffekten (alfa) som vises i tabellen uttrykker nettopp forbedringen i tetthet uttrykt gjennom diffusjonskoeffisienten (D_e). Høyere alfa-verdier uttrykker at endringen (fra 28 døgn til 9 år i dette tilfellet) er størst. Betonger med flygeaske har gjennomgående mye høyere alfa-verdier enn betonger uten flygeaske.

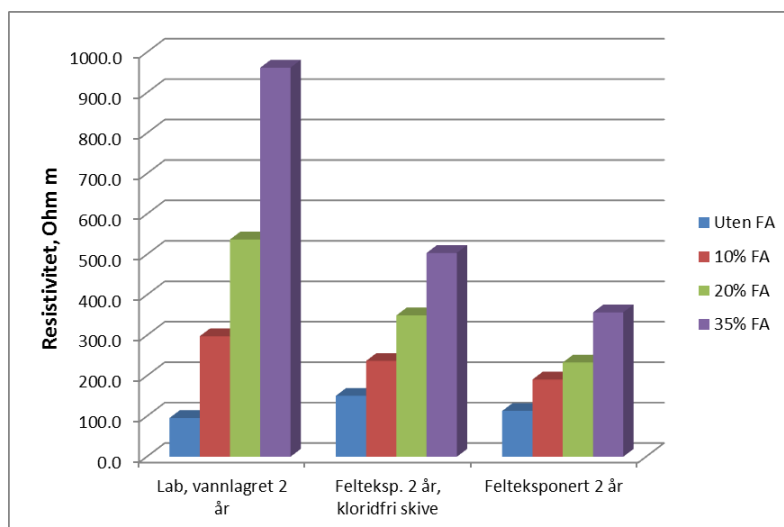
Det er verdt å merke seg at flygeaskebetongene tilsynelatende var tettere allerede etter 35 døgns felteksponering. Det er spesielt bemerkelsesverdig at betongen med 35 % flygeaske hadde så høy grad av tetthet relativt til betongene med CEM I etter såpass kort tid. Man skal imidlertid merke seg at betongene var lagret i vannbad i laboratorium i 1 måned før de ble felteksponert, slik at de hadde fått en betydelig modenhet ved oppstart av eksponering.



Figur 73 Beregnede diffusjonskoeffisienter etter felteksponering i skvalpesonen på Østmarkneset. Grafen for 20 % flygeaske er gjennomsnitt av betonger med STD FA og tilsatt flygeaske med 3 ulike finheter. Grafen uten flygeaske viser gjennomsnittet av betonger med ulike sementtyper men uten tilsetning av flygeaske. Flygeaske i prosent av totalt bindemiddel, alle betonger med masseforhold 0,45 og uten silikastøv. Resultater fra Kjellsen & Skjølsvold (2003) og Skjølsvold (2009).

Forsøksserien viser ellers at effekten av varierende egenskaper hos de ulike CEM I er liten i forholdt til effekten av å tilsette flygeaske. Når det gjelder effekt av flygeaskens finhet ser det ut til å være en effekt ved at økende finhet gir tettere betonger (reduert diffusjonskoeffisient, noe økt resistivitet), men det er for liten datamengde til å si om forskjellene er signifikante.

I Figur 74 vises resistivitet målt etter 2 år. For prøvene som er vannlagret i 2 år i lab ved 20°C hadde betong med 35 % flygeaske ca. 10 ganger høyere resistivitet sammenlignet med CEM I uten tilsatt flygeaske. For felteksponerte betonger var forskjellene betydelig mindre, noe som antageligvis skyldes at mye av flygeasken ikke har reagert selv etter 2 år ved såpass lave temperaturer. Merk ellers forskjellen mellom skiver med og uten klorider, hvor betong med inntrengte klorider altså har noe lavere resistivitet enn betonger uten klorider. Dette er i tråd med det man kan forvente, hvor en økt ionemengde i poreløsningen fører til redusert resistivitet.



Figur 74 Resistivitet målt for 2 års vannlagrede prøver samt for 2 års felteksponerte prøver fra henholdsvis ikke-klorideksponert flate samt fra klorideksponert flate. Gjennomsnittlige verdier for 20 % flygeaske. Resultater fra Kjellsen & Skjølvold 2003.

I forsøkserien var det også med 2 betongter med lavere masseforhold (0,40), en av disse betongene var tilsatt 4 % silikastøv. Som forventet har masseforhold gitt en positiv effekt både på kloriddiffusjon og på spesifikk elektrisk motstand, dette kan ses ved å sammenligne blanding 1 og blanding 11 i Tabell 33. Ellers er det verdt å merke seg at tilsetning av 4 % silika har gitt betydelig positiv effekt på tetthet, spesielt ser man dette i tidlig fase for felteksponert betong. For betong lagret 6 måneder i lab var forskjellene relativt små, fordi flygeasken i det tilfellet har fått optimale betingelser til å reagere og tette betongen. Men for felteksponert betong kan vi se at silika har en relativt stor positiv effekt i tidlig fase. For flygeaskebetonger som ikke har optimale herdebetingelser kan derfor silikastøv gi et spesielt viktig bidrag til egenskapsutvikling i tidlig fase.

8.5 Bjørvikaprojektet

8.5.1 Innledning

I forkant av utbyggingsprosjektet Bjørvikatunnelen i Oslo (nå Operatunnelen) utførte daværende Materialteknisk seksjon ved Teknologidivisjonen i Vegdirektoratet en større studie for å finne egnede betongtyper for å oppnå en vanntett konstruksjon. Veldig mye av dette arbeidet var konsentrert rundt utviklingen av bindemidler som utvikler lite herdevarme. Bakgrunnen for dette er at redusert varmeutvikling i de fleste tilfeller er den viktigste parameteren for å redusere opprissing i tidlig fase (av øvrige materialparametere av betydning er autogent svinn den viktigste og må medregnes). Basert på dette arbeidet ble det valgt en løsning med trepulverblanding av Portlandsement, silikastøv og flygeaske, med flygeaskedoseringer i intervallet 23 – 39 % (av C + FA).

Utviklingsarbeidet er rapportert i en serie på 11 rapporter, som er oppsummert i en egen sluttrapport (Larsen 2004). Det ble i tillegg publisert en rapport som oppsummerer erfaringene med bygging av senketunnelen (Smeplass et al. 2010). I de følgende avsnitt vil det gis en oppsummering av hovedresultater fra utviklingsarbeidet som ble gjennomført i forkant av utbyggingen, samt hovedtrekkene fra erfaringsrapporten fra byggefasen.

8.5.2 Trinn 1 laboratorieundersøkelser

Den innledende undersøkelsen (trinn 1) var en omfattende laboratoriestudie som omfattet totalt 24 betongtyper. Referanse for studiene var betong med Norcem Anleggsement, 5 % silikastøv og

masseforhold 0,45. Det ble benyttet $k = 2,0$ for silikastøv, og $k = 1,0$ for slagg, flygeaske og sement. Det ble gjennomført parameterstudier med følgende materialer:

- Norcem Standard FA (CEM II/B-V)
- Tysk slaggsement (CEM III/B)
- Nederlandsk slaggsement (CEM III/B)
- Finsk slagg, tilsetning opp til 75 % av klinkervekt (43 % av C + FA)
- Engelsk slagg, tilsetning opp til 100 % av klinkervekt (50 % av C + FA)
- Flygeaske, tilsetning opp til 100 % av klinkervekt (50 % av C + FA)
- Silikastøv, variasjon i mengde fra 0 til 10 % av klinkervekt

Følgende betongparametere ble studert:

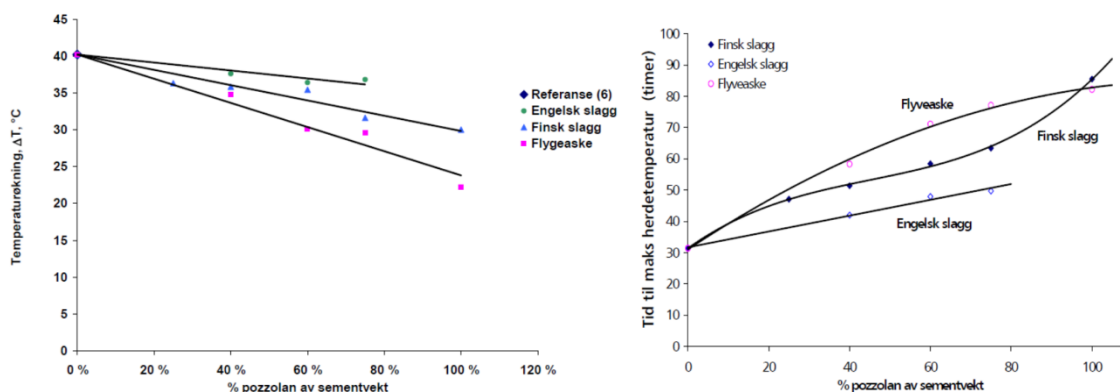
- Hydrasjonsvarme
- Fasthetsutvikling
- Spaltestrekkfasthet
- E-modul
- Elektrisk motstand

I tillegg ble støpelighetsegenskapene i fersk betong vurdert subjektivt under blanding, og betongenes relative vannbehov (eller egentlig tilsetningsstoffbehov) ble registrert.

Detaljerte resultater er rapportert av Larsen et al. (2004) i Rapport nr. 1, revisjon 1. I det følgende vil kun de viktigste resultatene presenteres.

Herdevarme

Varmeutvikling ble målt i isolerte herdekasser (100 mm isolasjon mot alle flater) med betongprøve på 7 liter. Både flygeaske og slagg ga ved økende dosering redusert herdevarme, men effekten varierte i stor grad. Flygeaske viste seg å være mest effektiv for å redusere herdevarme. Dette vises i Figur 75 (venstre) som viser effekt på målt temperaturøkning som funksjon av tilsatte mengder. Slagg hadde også betydelig effekt, men det finske slagget ga i større grad redusert herdevarme enn det engelske slagget. Basert på kjemisk sammensetning og finhet, som er relativt like for benyttet engelsk og finsk slagg, var det ikke mulig å forutse disse relativt store forskjellene. Variasjon i mengde glass for de ulike materialene kan ha hatt stor betydning, men dette er ikke dokumentert i studien. Det var flygeaske kun fra en kilde med i studien.



Figur 75 Temperaturøkning som funksjon av tilsatt mengde flygeaske og slagg (venstre) og tid til maks herdetemperatur (høyre). Merk at mengder flygeaske og slagg er oppgitt i % av sementvekt. Fra Larsen et. al. 2004.

Reduksjon i total herdevarme er vesentlig for å redusere opprissing i tidlig fase, men varmeutviklingens tidsaspekt har også stor betydning. Dette aspektet illustreres i Figur 75 (høyre). Vi ser at tiden til maksimal temperatur oppnås forskyves ut i tid ved tilsetning av flygeaske og slagg. Flygeaske og slagg gir altså ikke bare redusert varmeutvikling, men varmeutviklingen blir også langsom. Begge effektene bidrar til redusert maksimaltemperatur.

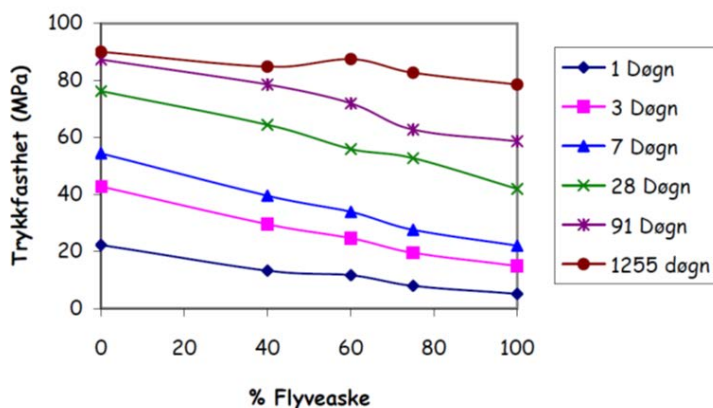
Basert på studiene ble det beregnet virkningsfaktorer for de ulike sementer og tilsetningsmaterialer, disse oppsummeres i Tabell 34.

Tabell 34 Beregnede virkningsfaktorer relativt til Anleggsement for hydrasjonsvarme for sementer og tilsetningsmaterialer. Fra Larsen et al. (2004).

Materiale	Hydrasjonsvarme
Anleggsement	100 %
Standard FA-sement	90 %
Silikastøv	300 %
Flygeaske	30 %
Engelsk slagg	80 %
Finsk slagg	60 %
Nederlandsk slaggsement	75 %
Tysk slaggsement	75 %

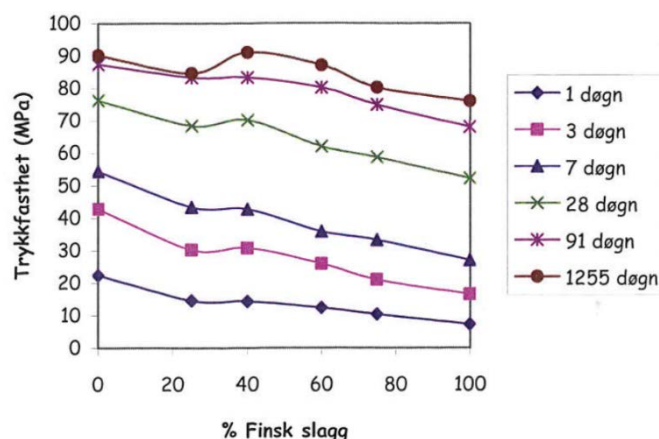
Fasthet

Som illustrert fra varmeutviklingen reagerer flygeaske meget sakte i tidlig fase av hydrasjonsforløpet, noe som gir lav tidligfasthet. På lang sikt er fasthetstilveksten imidlertid større, men selv etter 90 døgns herding er fastheten betydelig redusert for doseringer av flygeaske på ca. 30 % og høyere. Dette vises i Figur 76 som viser fasthetsutviklingen fram til 1255 døgn.



Figur 76 Fasthet ved ulike aldre avhengig av mengde flygeaske (i prosent av sementvekt). Fra Larsen et al. 2004.

Også slagg gir betydelig reduksjon i fasthet ved tidlige aldre, mens bildet er mer nyansert fra 28 døgns herdetid og utover. Dette vises i Figur 77 for finsk slagg. Fra 28 døgns hadde blandingen med 75 % (tilsvarende 43 % av C + FA) engelsk slagg oppnådd 92 % av referansebetongens fasthet, mens betongen med tilsvarende mengde finsk slagg hadde oppnådd kun 77 % av referansefastheten. Ved 90 døgns var verdiene 98 % for engelsk slagg og 86 % for finsk slagg.



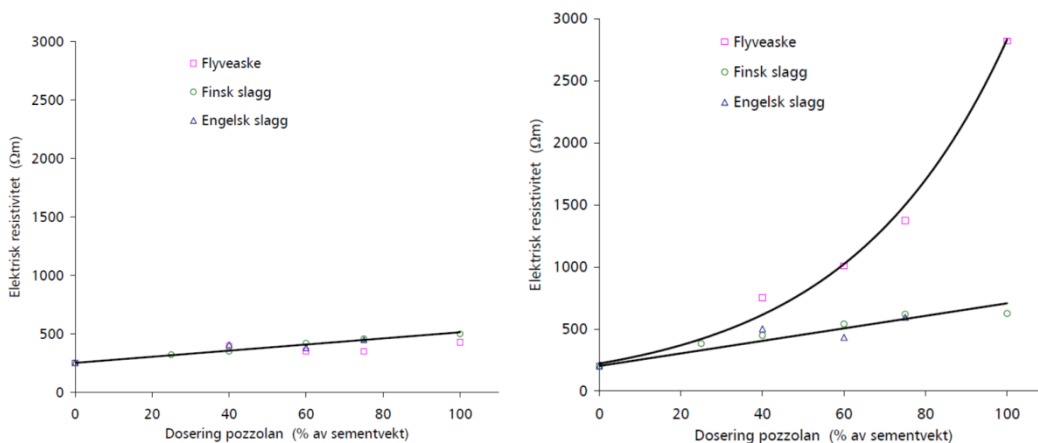
Figur 77. Fasthet ved ulike aldre avhengig av mengde og type slagg (i prosent av sementvekt). Fra Larsen et al. 2004.

På tilsvarende måte som for herdevarme ble det beregnet virkningsfaktorer for trykkfasthet etter 90 døgns og 3 år. Disse vises i Tabell 35. Tabell 35 Beregnede virkningsfaktorer relativt til Anleggsement for trykkfasthet etter 90 døgns og 3 år. Fra Larsen et al. 2004.

Materiale	90 d trykkfasthet	3 års trykkfasthet
Anleggsement	100 %	100 %
Standard FA-sement	90 %	90 %
Silikastøv	> 200 %	> 200 %
Flygeaske	80 %	95 %
Engelsk slagg	95 %	100 %
Finsk slagg	90 %	95 %
Nederlandsk slaggsement	-	95 %
Tysk slaggsement	90 %	95 %

Elektrisk motstand

Det ble målt spesifikk elektrisk motstand (resistivitet) for aldre opp til 3 år. I Figur 78 (venstre) vises resistivitet etter 90 døgn som funksjon av tilsatt mengde flygeaske/slag. Vi ser at ved denne alderen har økende mengde tilsetningsmaterialer gitt en marginal økning i resistivitet, og det er ingen signifikante forskjeller mellom slag og flygeaske. For alderen 3 år (høyre graf) ser vi at flygeaskebetongene skiller seg markant ut. Ved 38 % flygeasketilsetning (tilsvarende 60 % av sementvekt som er brukt i figuren) ble det målt ca. 1000 Ωm , mens tilvarende mengde slag ga ca. halve verdien. Den relative forskjellen er økende med økende doseringsnivå. Vi kan videre merke oss at referansebetongens resistivitet nesten ikke har økt fra 90 døgn til 3 år. Se ellers Figur 44 i Kapittel 5 hvor det er vist utvikling i resistivitet fram til 9 år.



Figur 78 Elektrisk resistivitet som funksjon av tilsatt mengde flygeaske og slag. Til venstre: 90 døgn. Til høyre: ca. 3 år. Fra Larsen et al. 2004.

8.5.3 Videre utviklingsarbeid i forkant av byggeprosjektet

Med basis i det store laboratorieprogrammet som er omtalt i det foregående, ble det kjørt en rekke videre studier. Basert på flygeaskens gode evne til å redusere herdevarme ble det i det videre arbeidet i stor grad fokusert på betonger med tilsatt flygeaske, men med ordinær SV-40 betong som referanse. Men også betong med slag (henholdsvis finsk slag og nederlandsk slaggsment) var med videre i alle prosjektets faser. I det følgende vil noen av hovedtrekkene fra dette arbeidet bli oppsummert.

Støpelighegenskaper ble dokumentert gjennom et feltforsøk med flygeaskedoserings på 38 og 50 % av sementvekt, rapportert av Kompen & Willoughby (2003), rapport 2. Konklusjonen fra forsøkene ble at alt som har med støpelighe å gjøre, dvs. stabilitet, komprimeringsegenskaper, pumpbarhet, pussevnighet etc. var meget positivt for flygeaskebetongene. Luftinnholdet lot seg styre bra, men L-stoffdosering måtte være mange ganger høyere enn for SV-40 betong. Det ble ellers dokumentert at vannbehovet for flygeaskebetong var tilsvarende eller noe lavere enn for ordinær SV-40 betong basert på CEM I.

Utvikling av mekaniske egenskaper ved simulert realistisk temperaturforløp:

Det ble dokumentert at betonger med iht. 38 % flygeaske og 38 % slag hadde høyere fasthet ved 28 døgn ved simulert realistisk temperatur i en massiv konstruksjon sammenlignet med tilsvarende fasthet ved herding under normale laboratoriebetingelser. På den annen side hadde referansebetongen (Anleggsement, SV-40) lavere fasthet ved realistiske forhold enn ved herding i standardiserte laboratorieforhold. (Larsen & Willoughby 2004, rapport 4). Resultatene illustrerer effekten av temperaturfølsomhet, hvor den økte temperaturen i konstruksjon fører til økt reaksjonshastighet for

flygeaske og slagg. Flygeaske og slagg antas også å gi større robusthet for at høye herdetemperaturer kan redusere slutfastheten.

Evaluering av risstendens

Det ble gjennomført omfattende undersøkelser for bestemmelse av relevante betongegenskaper for risstendens i herdefasen for betonger med 29 og 38 % flygeaske, nederlandsk slaggsement samt referanse med SV-40 betong med CEM I. Tilsetning av flygeaske ga i denne studien generelt en lavere termisk utvidelseskoeffisient og lavere autogen deformasjon enn referansebetongen. I tillegg ga flygeaske lav herdevarme som tidligere omtalt. Totalt sett ga betonger med flygeaske betydelig lavere spenningsoppbygging i herdefasen enn referansebetongen. Overaskende kom betongen med slaggsement dårligst ut mht. spenningsoppbygging målt i spenningsriggen ved NTNU, dette skyldes i stor grad at sementen hadde høyt autogent svinn.

Databaserte simuleringer basert på modellparametere fra forsøksprogrammet, samt geometrisk modellering av senketunnelelementene, viste at betong med 60 % flygeaske oppnådde lavest herdetemperatur og lavest forhold mellom strekkspenning og strekkfasthet (såkalt rissindeks) på 0,75 i yttervegg. Simuleringer med data fra nederlandsk slaggsement og SV-40 referanse ga rissindeks på henholdsvis 1,15 og 1,26 (Kanstad & Guomin 2004, rapport 8).

I et storskala feltforsøk ble en “dobbelvegg” med dimensjoner 15 x 2 x 1 (L x H x T) støpt på et fundament. Betongtyper i de to veggene var henholdsvis SV-40 og betong med 60 % flygeaske. Hovedresultatene fra forsøket bekreftet flygeaskebetongens gode egenskaper mht. opprissing ved en betydelig reduksjon i rissvidder (fra 0,11 mm til 0,06 mm) samt også noe kortere risslengder.

For å konkludere i forhold til rissømfintlighet, så peker alle resultatene entydig på at flygeaskebetongene kommer gunstigst ut, hvor den positive effekten er stigende med økende flygeaskedosering. Hovedårsaken til at flygeaske kommer så positivt ut er redusert herdevarme.

Øvrige bestandighetsmessige egenskaper

Det ble i begrenset omfang gjennomført akselererte forsøk av frostbestandighet og kloriddiffusjon. Alle betonger var mellom 106 og 114 døgn gamle ved prøvingsstart. For frostbestandighet testet med 3 % NaCl-løsning som frysemedium viste resultatene at økende mengde flygeaske ga økt avskalling. Laboratorieprodusert betong med 38 % flygeaske resulterte i “ikke akseptabel” frostbestandighet, mens tilsvarende feltproduserte betong ga “akseptabel” frostbestandighet iht. kriteriene etter SS 13 72 44. Det er mangelfull dokumentasjon for luftporestruktur for forsøksserien.

Beregnete kloriddiffusjonskoeffisienter viser at referansebetongen (SV-40) hadde lavest verdi, ($1,78 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), mens betonger med 29 og 38 % flygeaske samt betong med nederlandsk slaggsement lå på henholdsvis 2,29, 2,94 og 2,83 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). En feltprodusert betong med 38 % flygeaske hadde noe høyere diffusjonskoeffisient enn den lab-produserte betongen, med en verdi på $4,11 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

8.5.4 Spesifikasjon og erfaringer fra bygging av senketunnelen, entreprise sjødelen

Basert på den svært omfattende forstudien ble det valgt en betongspesifikasjon i henhold til følgende:

- Fasthetsklasse C40
- Største tillatte masseforhold: 0,45
- Silikastøv: 4-8 % av Portlandsementvekten
- Flygeaske: dosering på minimum 30 % og maksimum 65 % av Portlandsementvekt (tilsvarende 23 – 39 % av C + FA)
- Virkningsfaktor for flygeaske på 0,7

I dette prosjektet ble det for første gang i Norge satt krav til bruk av spenningsbasert herdeteknologi med simuleringer som en del av produksjonsplanleggingen. Det ble satt krav om at opptredende

strekkspenninger til enhver tid skulle holdes under 75 % av betongens strekkfasthet. Risiko forbundet med opprissing ble helt og holdent lagt på entreprenør. Blant virkemidlene som entreprenør hadde til rådighet var justering av mengde flygeaske innenfor grensene gitt av spesifikasjonen, samt utførelsestiltak som f.eks. bruk av kjølerør og lav temperatur på fersk betong.

Av de 3 entreprisene som til slutt dannet Operatunnelen er det kun for sjøentreprisen (senketunnelen) at det ble laget en samlet erfaringsrapport. Derfor er det denne entreprisen som er diskutert i det videre. Senketunnelen ble gjennomført som et samarbeid mellom entreprenøren AFB (Arbeidsfelleskapet Bjørvika bestående av Skanska Norge AS, BAM og Volker Stevin). I de følgende avsnitt vil noen av hovedkonklusjonene fra erfaringsrapporten forfattet av Smeplass et al. (2010) bli gjengitt.

AFB valgte i samarbeid med NorBetong og Norcem å benytte en prosjektsement med 30,5 – 33,5 % flygeaske (dvs 44 – 50 % av sementvekt). Denne sementen (CEM II/B-V) ble spesielt utviklet for dette prosjektet og finnes ikke lengre på det norske markedet. Denne løsningen var enkel logistikkmessig, og førte mest sannsynlig til at egenskapene ble jevnere enn ved separat tilsetning av flygeaske. Ingen separat flygeaske var tilgjengelig på produksjonsstedet, dette begrenset muligheten til å bruke høyere flygeaskedoser. Den valgte løsningen ga en varmeutvikling på ca. 80 % av tradisjonell SV-40 betong, og i tillegg en noe langsommere varmeutvikling. Sammaling av flygeaske og sement ga noen fordeler i form av økt stabilitet i fersk fase, noe som var spesielt viktig for selvkomprimerende betong til veggstøp. På den annen siden ga sammalingen en noe høyere varmeutvikling, det er estimert at denne effekten utgjorde ca. 5 % økning i forhold til en alternativ løsning med separat tilsatt flygeaske.

Den valgte løsningen med lavvarmebetong basert på prosjektsementen med ca. 32 % flygeaske var ikke alene tilstrekkelig til å oppnå kravene til rissindeks på 75 %, det måtte i tillegg benyttes kjølerør i veggene. Kombinasjonen av lavvarmebetong og kjøling i aktuelt omfang var vellykket, og ga rissindekser i området 0,60 – 0,75 i de segmentene hvor kjøling ble benyttet.

Oppnådd luftporestruktur på det begrensede prøvingsutvalget viste at resultatene var noe dårligere enn krav på avstandsfaktor ($< 0,25$ mm) og spesifikk overflate (> 25 mm²/m³). Prøvene fra frostprøving iht. såkalt Borås-metode (SS 137244) viste betong med karakteristikken "akseptabel". Disse resultatene er i tråd med resultater fra forprøvingen.

Det ble gjort observasjoner i form av lekkasjer i riss som antydte at evnen til å tette riss vha. utfelling av kalsiumkarbonat eller magnesiumhydroksid var svakere og langsommere enn for tilsvarende betonger uten flygeaske. Hovedgrunnen til dette er antagelig at flygeaskebetong inneholder mindre CH, da deler av denne blir forbrukt i den pozzolane reaksjonen. Det ble i rapporten påpekt et behov for å studere mekanismene bak selvlegning eller "trutning" av lavvarmebetong i sjøvann nærmere.

8.6 Anlegg FA samarbeidsprosjektet

8.6.1 Innledning

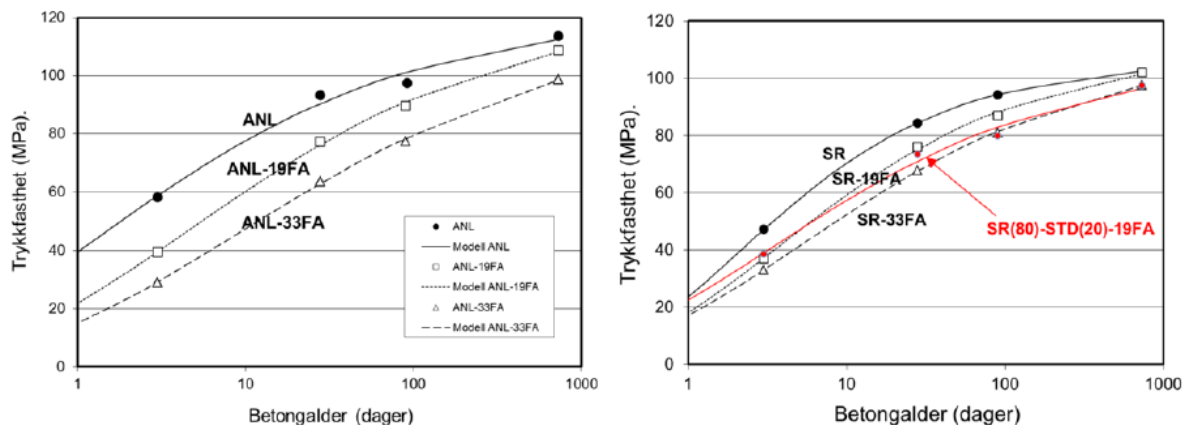
I 2007 ble det igangsatt et samarbeidsprosjekt mellom Tunnel- og betongseksjonen i Statens vegvesen og Norcem. Hovedhensikten med studien var å undersøke effekten av flygeaske i doseringsnivåer på henholdsvis 19 og 33 % sammenlignet med betong uten flygeaske. Flygeaske ble blandet inn i to ulike sementer, henholdsvis Anleggsement og SR-sement (sulfatresistent sement). I tillegg ble det benyttet blanding av SR-sement og Standardsement i forholdet 80:20. I dette avsnittet gis en kort oppsummering av hovedresultater fra laboratorieforskningene.

Betongene ble proporsjonert i henhold til følgende:

- Masseforhold 0,40
- Silikastøv: 5 % av sement + FA
- K-faktor for flygeaske = 1,0 (k-faktor for silikastøv = 2,0)

8.6.2 Fasthetsutvikling

Fasthetsutvikling for ulike doseringsnivåer av flygeaske vises i Figur 79 for henholdsvis ANL-serien (venstre) og SR-serien (høyre). For ANL-serien var det redusert trykkfasthet med økende flygeaske-dosering for alle aldre. Flygeaske-betonger har imidlertid generelt større tilvekst av fasthet over tid, slik at den relative forskjellen mellom referansebetongen og flygeaskebetongene minket med tiden. Etter 2 år hadde betongen med 19 % flygeaske 4 % lavere fasthet enn referansen, mens varianten med 33 % flygeaske hadde 13 % lavere fasthet. For betong med SR-klinker som utgangspunkt var reduksjonen i fasthet generelt noe mindre enn for ANL-serien, og etter 2 år var fastheten i liten grad påvirket av mengde flygeaske.

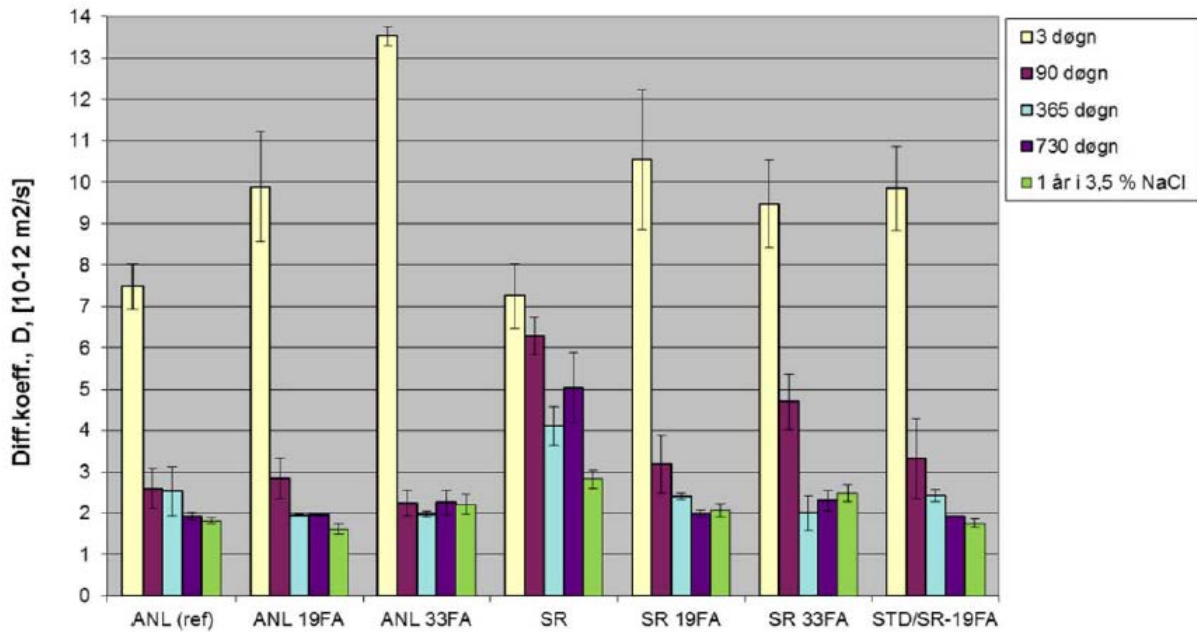


Figur 79 Fasthetsutvikling for serien med ANL (venstre) og SR (høyre) ved ulike aldre til 2 år. Fra Bjøntegaard & Rodum (2014).

Restprøvestykker (terninger og sylindere av varierende størrelse) ble trykkprøvet etter 6 års herding i vannbad ved 20°C. Resultatene er noe usystematiske, men for ANL-serien bekreftes bildet fra 2-års prøving: fastheten var fortsatt avtagende med økende flygeaskedosering etter 6 år, dvs. flygeasken har ikke gitt noen vesentlig fasthetstilvekst etter 2 år. For SR-serien er bildet imidlertid et annet, da spesielt SR-33FA har hatt betydelig fasthetstilvekst fra 2 til 6 år. Fastheten for SR-FA betongene framstod som minst like høy eller noe høyere enn referansebetongen uten flygeaske.

8.6.3 Kloriddiffusjon og elektrisk motstand

Det ble gjennomført prøving av kloriddiffusivitet og elektrisk motstand for alle betongene ved 4 aldre (3, 90, 365 og 730 døgn). Prøving av kloriddiffusjon ble gjennomført iht. NT Build 443, som innebærer at prøvene eksponeres for 16,5 % kloridløsning i 35 døgn. I tillegg ble det kjørt en alternativ prosedyre, hvor betongene ble eksponert i 3,5 % NaCl løsning i ett år, med oppstart allerede ved 3 døgn alder. Alle resultater er vist i Figur 80. Resultatene viser tydelig at alle betongene hadde høye diffusjonskoeffisienter ved eksponering etter 3 døgn, og at økende mengde flygeaske forsterket denne effekten. Resultatene viser videre at fra 90 døgn alder har ANL-betongene utviklet seg til å bli svært tette, mens SR-betongene var relativt diffusjonsåpne. For ANL-serien var diffusjonsegenskapene mer eller mindre uavhengige av tilsatt flygeaske fra 90 døgn alder. For SR-serien økte imidlertid kloridmotstanden noe ved bruk av flygeaske som sementerstatning (bortsett fra ved tidlig eksponering etter 3 døgn). Det er kanskje noe overaskende at flygeaske ikke har gitt noen signifikant forbedring av kloridmotstanden for ANL-serien. Det påpekes imidlertid at disse betongene i utgangspunktet har svært god kloridmotstand forårsaket av lavt masseforhold og tilsetning av 5 % silikastøv.

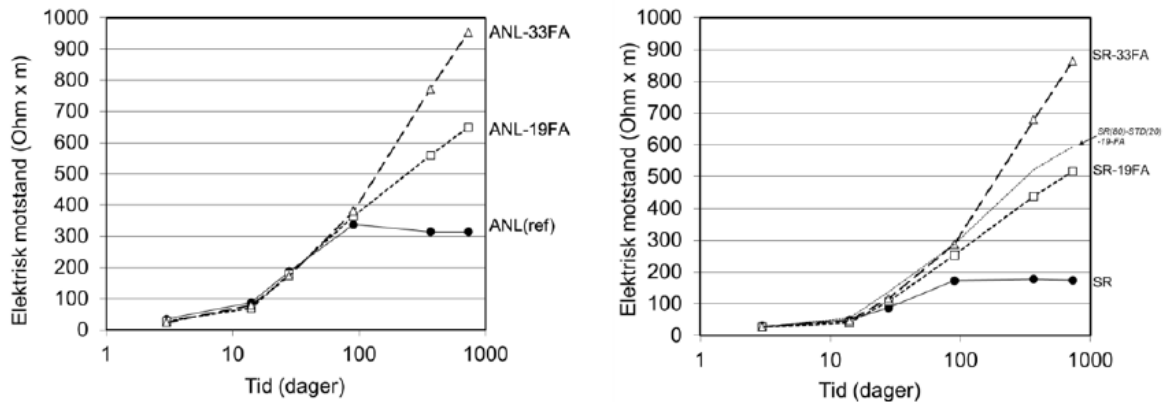


Figur 80 Gjennomsnittlige diffusjonskoeffisienter for alle betonger ved ulike eksponeringstidspunkt. Prosedyre NT Build 443 i alle serier med unntak av «grønn» serie merket «1 år i 3,5 % NaCl». Fra Bjøntegaard & Rodum (2014).

Det har vært reist spørsmål rundt den negative effekten av tidlig eksponering for betonger med flygeaske, noe som også illustreres spesielt godt ved å sammenligne eksponering etter 3 døgner (gule stolper) for ANL-serien. Det er tydelig at flygeaskebetongene er mer åpne i tidlig alder, og effekten ser ut til å forsterke seg ved økende dosering av flygeaske. For SR-serien er ikke effekten av flygeaske like systematisk. Når man ser på forsøk gjennomført ved alternativ metode (grønne søyler), hvor alle betonger ble eksponert etter 3 døgner i 3,5 % NaCl-løsning og lagret i ett år, får man imidlertid et annet bilde. Det var svært små og knapt signifikante forskjeller mellom referansebetongene og betongene med tilsatt flygeaske. Dette innebærer at selv om det er forskjeller i tidlig alder som gjør at klorider trenger lengre inn, synes det meste av denne forskjellen å være «visket ut» allerede etter 1 års prøving.

Norcem har gjennomført forsøk med 5 års felteksponering i sjøvann fra henholdsvis 9 og 90 døgns betongalder for tilsvarende betonger, dette er rapportert av Skjølsvold og Østnor (2013). Også disse resultatene viser at selv om betonger med flygeaske er mer diffusjonsåpne i ung alder enn tilsvarende betong uten flygeaske vil de med tiden «ta igjen» det tapte og på sikt gi lavere kloridinntrengning. Etter 5 års felteksponering av prøvestykker som ble eksponert ved 9 døgns alder var D lavere for alle betonger med flygeaske enn for de respektive referansebetongene uten tilsatt flygeaske. Resultatene indikerer altså at tidlig klorideksponering har liten betydning for kloridinntrengning på lengre sikt.

For resistivitet er det imidlertid en tydelig effekt av tilsatt flygeaske, hvor økende mengde flygeaske har gitt økende resistivitet som det fremgår av Figur 81. Som diskutert i Kapittel 5 er resistivitet en materialparameter som antas å være relatert til motstand mot kloridinntrengning, i tillegg til at den vil være relatert til korrosjonshastighet i propageringsfasen. Resultatene fra denne undersøkelsen (Bjøntegaard & Rodum 2014) viser at det er en sammenheng mellom D og resistivitet for $D > \text{ca. } 3$, ved at avtagende D ga økt resistivitet. Det ble i denne studien imidlertid ikke funnet noen sammenheng for $D < \text{ca. } 3$, i dette området er det et svært stort spekter av resistiviteter for like D. Dette innebærer at betonger som fremstår som omtrent like når de testes iht. NT Build 443 har ulike egenskaper mht. elektrisk motstand. Dette er kanskje ikke så overraskende, i og med at diffusjonsegenskaper er knyttet til porestruktur. Elektrisk motstand er også en funksjon av porestruktur, men er i tillegg også relatert til ionekonsentrasjon i betongens poreløsning, som også diskutert i Kapittel 5.



Figur 81 Elektrisk motstand for serien med ANL (venstre) og SR (høyre) ved varierende aldre til 2 år. Fra Bjøntegaard & Rodum (2014).

Det ble også gjennomført måling av resistivitet for gjenværende prøvestykker som var vannlagret i 6 år. Målingene for ANL-serien ga verdier på henholdsvis 489, 1005 og 1471 Ωm for ANL, ANL-19FA og ANL-33FA (gjennomsnittsverdier for målinger på ulike typer prøvestykker). Målingene bekrefter at elektrisk motstand fortsetter å øke over lang tid, og at betonger med flygeaske på lang sikt får verdier høyere enn 1000 Ωm , noe som viser at flygeaske fortsetter å reagere over veldig lang tid og. Trenden for 6-års målinger for SR-serien er ganske lik ANL-serien.

8.6.4 Tidlig overflatebehandling av betong med høy mengde flygeaske

Det er beheftet en viss grad av usikkerhet rundt tidlig klorideksponering for betonger med høye doseringer flygeaske (selv om mye av effekten ser ut til å «viskes ut» på lengre sikt, med referanse til diskusjon i tidligere avsnitt). Det ble derfor gjennomført akselererte laboratorieforsøk med tidlig overflatebehandling/impregnering med tre ulike hydrofobere produkter. Resultatene viser at slike produkter har svært god «filtreringseffekt», dvs. evne til å bremse kloridinntrengning. Resultatene gjengis ikke her, men kan finnes i rapporten.

Tidlig overflatebehandling har også vært gjenstand for undersøkelser i tilknytning til Tresfjord-brua (Rodum 2015). Dette var feltforsøk, og også her ble det vist at hydrofobere impregnering har svært stor filtreringseffekt ved tidlig klorideksponering av flygeaskebetonger, i dette tilfellet betong med 39 % flygeaske. Det er imidlertid for tidlig å si noe sikkert om tidlig overflatebehandling av slike betonger er «nødvendig» eller om flygeaskebetongene på lang sikt vil «ta igjen» det tapte slik at langtidseffekten er liten.

8.6.5 Varmeutvikling

I forbindelse med studien er det blitt gjennomført analyser av varmeutvikling. Her gjengis bare kort hovedresultatene. Som forventet ga økende flygeaskedosering mer langsom varmeutvikling, og også reduksjon i totalt utviklet varme. 19 og 33 % tilsatt flygeaske ga reduksjon i adiabatisk temperaturøkning etter 48 timer på henholdsvis ca. 15 og ca. 30 % for både ANL og SR-seriene.

8.7 Møllenberg betongtunnel – FoU bestandighet

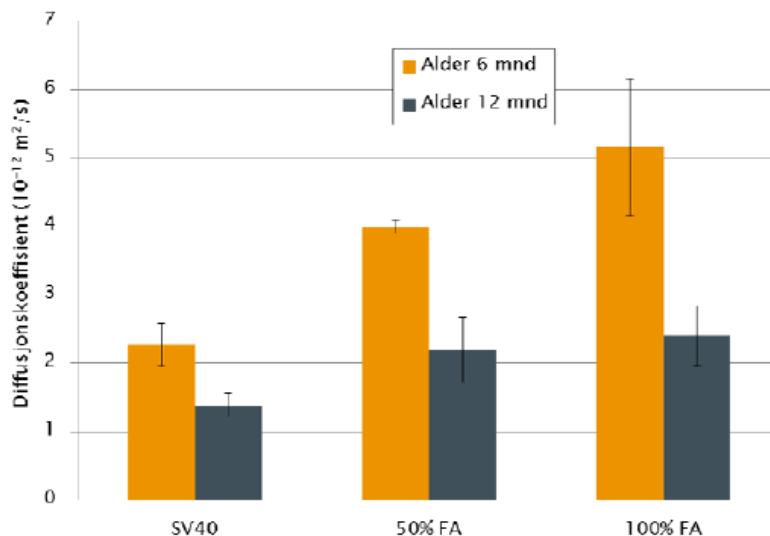
8.7.1 Innledning

I forbindelse med bygging av Møllenberg løsmassetunnel i Trondheim ble det gjennomført et FoU-program for å dokumentere bestandighetsmessige egenskaper. Dette ble gjennomført som et samarbeid mellom Statens vegvesen og entreprenøren NCC. Det ble i programmet prøvd betonger med

flygeaskeinnhold fra 20 % og opp til 50 % (av total sement- og flygeaskemengde). Prøvene ble tatt ut ved boring fra støpt konstruksjon. I det følgende presenteres data for kloriddiffusjon og elektrisk motstand. Det er og så gjennomført fryse/tine-forsøk for betongene, hovedresultatene er presentert i Kapittel 6.

8.7.2 Kloriddiffusjon og resistivitet

I Figur 82 vises beregnede diffusjonskoeffisienter etter diffusjonsforsøk iht. NT Build 443 for betonger som har herdet i konstruksjon i henholdsvis 6 og 12 måneder. Det bemerkes at angivelse av FA-mengde i er iht. «gammelt» regime, med FA som % av sementklinker. Omregnet til «nytt regime» (dvs. beregnet som $FA/(C+FA)$) er 19 %, 33 % og 50 % for betonger merket henholdsvis SV40, 50%FA og 100%FA.



Figur 82 Beregnede diffusjonskoeffisienter med standardavvik. Det bemerkes at betongenes modenhet er ca. halvparten av betongens alder. Fra Bjøntegaard (2015).

Vi kan lese av figuren at økende mengde flygeaske har gitt økt D, altså redusert kloridmotstand. Effekten er veldig tydelig etter 6 måneder. Etter 12 måneder er det tydelig at mer av flygeasken har reagert, og reduksjonen i D er størst for betongene med mest flygeaske. Det er tydelig fra disse forsøkene at flygeaske bidrar til langsom egenskapsutvikling. Det bemerkes imidlertid at betongene ble støpt ut om høsten, med en etterfølgende svært kald vinter. Det er gjennomført modenhetsberegninger som viser at betongenes modenhet var ca. halvparten av betongenes virkelige alder, dette gjelder for begge aldrene 6 og 12 måneder.

Spesifikk elektrisk motstand (resistivitet) var ca. 200 Ωm for alle de 3 betongene etter 6 måneder. Etter 12 måneder var imidlertid resistivitet for betongene med høyest dosering flygeaske økt til ca. 600 Ωm , mens SV-40 betongen med 19 % flygeaske hadde en verdi på ca. 350 Ωm .

8.8 Aursundbrua

Aursundbrua i Møre og Romsdal ble bygget i perioden 1993-1995. Dette prosjektet er interessant fordi man her gjorde spesielle tiltak mht. bestandighet for å finne løsninger som skulle gi spesielt lang levetid for denne type konstruksjoner i utsatte kyststrøk. Det ble ikke benyttet flygeaske eller slagg i betongsammensetningen i noen av konstruksjonsdelene. Det ble imidlertid benyttet betong med 12,5 % silikastøv (av Portlandsementvekt) i spesielt utsatte konstruksjonsdeler som senkekaske i skvalpesonen og brusøyler i utsatt atmosfærisk sone. Det ble benyttet masseforhold på 0,36. Øvrige

tiltak som utforming ble også vektlagt. Eksempelvis hviler brusøylene på massive søyler på innsiden av hule søyler¹², noe som gjør at bæresøylene er svært godt beskyttet mot klorider.

I tillegg var det svært høy fokus på nødvendig overdekning som funksjon av hvor kloridutsatt de ulike deler er, i tillegg til å sikre overdekning vha. monteringsjern og bruk av armeringsstoler av betong. Prosjektert overdekning til konstruktiv armering var 80 mm i de mest utsatte delene.

Fremstillingen gitt her er i stor grad basert på erfaringsrapporten av Liestøl (1999). Denne rapporten oppsummerer erfaringer fra prosjektering og byggefase, samt analyseresultater av kloridprofiler og fasthet fram til 3 års alder. Det er senere publisert resultater (kloridprofiler, resistivitet etc.) fram til 14 års alder for denne brua (Årskog et al. 2006), noen av hovedresultatene vil bli presentert her.

Prøving av kloriddiffusjonskoeffisient for utborede kjerner etter 90 døgn i henhold til NT Build 443 viste betydelig dårligere resultater enn resultatene fra forprøvingen. Verdier fra søyler i akse 2,3 og 4 viste verdier på henholdsvis 8,3 – 10,0 og 4,4 ($D_e \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), mens tilsvarende verdi fra forprøvingen var 2,8. Årsak til lavere verdier målt på utstøpte konstruksjonsdeler kan skyldes dårligere komprimering og mindre gunstige herdebetingelser. Men forskjellene mellom de ulike søylene er også uvanlig store, og tyder på dårlig kontroll med betong og utførelse i byggefase. Liestøl (1999) konkluderer i erfaringsrapporten med at forventningene til denne spesielle betongen ikke ble innfridd, men at bestandigheten likevel er tilfredsstillende pga. den økte overdekningen.

Årskog et al. (2006) har rapportert verdier på 0,53 og 0,33 ($D_e \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) for henholdsvis sprutsone og tidevannssone etter 10 år. Alfa-verdiene er beregnet til å være ca. 0,26 basert på utvikling fra 3 til 10 år. Gjennomsnittlige verdier for resistivitet var 234 Ωm etter 10 år for betong i akse 2 og 4, mens verdier ned i 78 Ωm er rapportert for akse 3.

Resultatene viser at oppnådde verdier i ferdig utstøpt konstruksjon i betydelig grad kan avvike fra resultater fra forprøving gjennomført ved mer kontrollerte forhold.

8.9 Sammendrag fra kapittel 8

Kapitlet gir en oppsummering over noen av de viktigste forskningsaktivitetene som er gjennomført i Norge rundt bruk av flygeaske og slagg, med hovedfokus på aktiviteter gjennomført i regi av Statens vegvesen. Det meste av det som er presentert i Kapittel 8 er basert på betonger med flygeaske, men også resultater for slaggbetonger er blitt presentert og diskutert.

Det er relativt omfattende tilgjengelig data som viser at innblanding av flygeaske fører til betonger som har større motstand mot kloridinntrengning og betydelig grad av økt resistivitet i forhold til CEM I, dette er i tråd med internasjonale erfaringer rapportert i Kapittel 5. Flygeaske gir langsom egenskapsutvikling og gir betonger som er relativt diffusjonsåpne i ung alder, mens den positive effekten gjør seg spesielt gjeldende etter flere år. Den langsomme egenskapsutviklingen gjør at betonger med flygeaske er mer utsatte for kloridinntrengning i tidlig alder. Det virker imidlertid som om det som tapes i ung alder «tas igjen» relativt raskt etter som betongene blir tettere med alderen, og at tidlig klorideksponering har relativt liten negativ betydning på lang sikt.

Flygeaske som erstatning for sement fører til betydelig reduksjon av fasthet etter 28 døgn, og også etter 90 døgn. Selv etter 3 års herding i vannbad har betonger med flygeaske lavere fasthet enn tilsvarende

¹² Den utvendig hule søylen har 2 funksjoner utover å beskytte den indre søyla mot klorider: som hjelpesøyle under fritt frembygget og som «estetisk bedre balanse» i forhold til bruas overbygning. Den permanente massive bæresøylen er så «myk» (lang og tynn) at det ikke var nødvendig med lagre i toppen, noe som også gir en gevinst i forhold til fremtidig vedlikehold.

betonger med CEM I. Også betonger med slagg oppnår lavere fasthet i ung alder, men bildet er noe mer nyansert avhengig av type slagg.

Det ble i forkant av Bjørvika-prosjektet gjennomført omfattende prøving og dokumentasjon av hvilken effekt ulike bindemidler har på varmeutvikling. Reduksjon i herdevarme er viktig for å redusere opprissing i tidlig fase. Undersøkelsen viste at bruk av flygeaske ga størst reduksjon i herdevarme, mens de ulike variantene av slagg eller slaggsementer var mindre effektive.

Det har vært gjennomført en del laboratorieprøving av frost/salt-bestandighet for betonger med slagg og spesielt flygeaske. Resultatene viser at økende dosering flygeaske fører til redusert frost/salt-motstand ved akselererte laboratorieforsøk. Det er knyttet usikkerhet til hvor stor negativ effekt flygeaske vil ha i felt, spesielt gjelder dette for doseringsnivåer høyere enn ca. 30 %. Dette er igangsatt fullskala forsøk som vil kunne gi svar på dette.

9 Referanser

AASTHTO T 277-15 (2015): "Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration", American Association of State and Highway Transportation Officials.

ACI 232.2R-03 (2003): "Use of fly ash in concrete", ACI Committee 232, The American Concrete Institute.

ACI 233R-03 (2003): "Slag cement in concrete and mortar", ACI Committee 233, The American Concrete Institute.

Aftenposten (2011): "Vestlige utslippskutt hjelper ikke når Kina og India satser på kull". Artikkel i Aftenposten, 23. november 2011. www.aftenposten.no

Arya, C., Buenfeld, N.R., Newman, J.B. (1990): "Factors influencing chloride binding in concrete", Cement and Concrete Research, Vol 1990, pp 291-300.

Angst, U., Elsener, B., Larsen, C.K. and Vennesland, Ø. (2009): "Critical chloride content in reinforced concrete – A review", Cement and Concrete Research, Vol 39, pp 1122-1138.

ASTM C 618 – 12a. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM International.

ASTM C 666 (2008): "Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing", ASTM International.

ASTM C 672 (2012): "Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals", ASTM International.

ASTM C 989. Standard specification for slag cement for use in concrete and mortars, ASTM International.

ASTM C1202, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, ASTM International.

ASTM C1293, Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction, American Society for Testing and Materials.

Atis, C. D., (2003): "Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash", Construction and Building Materials, Vol 17, pp 147-152.

Bakker, R.E.M. (1983): "Permeability of blended cement concretes", Paper SP 79-30 from ACI SP79, Detroit, 1983, pp 589-605.

Bektas, F., Taylor, P.C., Wang, K. (2010): "Scaling resistance of concrete containing slag cement: A critical review", Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting 2010, Washington DC, USA.

De Belie, N., Verselder, H.J., De Blaere, B., Van Nieuwenburg, D. Verschore, R. (1996): "Influence of the cement type on the resistance of concrete to feed acids", Cement and Concrete Research, Vol 26, pp 1717-1725.

Bertolini, L., (2008): "Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures", Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 4, No 2, pp 123-137.

Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P. and Polder, R. (2004): "Corrosion of steel in concrete. Prevention, diagnosis, repair". Wiley-CCH Verlag, ISBN 3-527-3088-8.

Bérubé, M.A., Duchesne, J. and Chouinard, D. (1995): "Why the accelerated mortar method ASTM 1260 is reliable for evaluating the effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to alkali-silica reactivity", *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 17, pp 26-34.

Bier, T.A. (1987): "Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement pastes", *Proceedings of the Materials Research Society symposium, - Microstructural Development During Hydration of Cement*, Vol., 85, pp 123-134. Boston, USA.

Bijen, J. (1998): "Blast furnace slag cement for durable marine structures", VNC/ *BetongPrisma*, Hertogenbosh, The Netherlands. ISBN 90-71806-37-5.

Bilodeau A., Malhotra V.M. (1993): "Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials: Canmet research", *Proc. Int. Workshop concrete salt scaling*, Ed. J.Marchand & M.Pigeon, Quebec, CRIB, Dept. de génie civil, ULaval, pp 191-228.

Bilodeau, A., Sivasundaram, V., Painter, K. E., Malhotra, V. M. (1994): "Durability of concrete incorporating high volumes of fly ash from sources in the U.S.", *ACI Materials Journal*, Vol 91, pp 3-12.

Bilodeau, A., Zhang, M.H., Malhotra, V.M. and Golden, D.M. (1998): "Effect of curing methods and conditions on the performance of fly ash concrete in de-icing salt scaling". *Proceedings of the sixth CANMET/ACI/JCI International conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in Concrete*, ACI SP-178, Vol 1, pp 361-384.

Bjøntegaard, Ø., Rodum, E. (2014): «Effekt av flygeaske på betongegenskaper. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015». Statens vegvesens rapporter nr. 275.

Bjøntegaard, Ø. (2015): «Møllenberg løsmassetunnel: FoU bestandighet. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015». Statens vegvesens rapporter nr. 415.

Bleszynski, R., Thomas, Hooton, D.: (2000): "The efficacy of ternary cementitious systems for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete", *In Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete*, Quebec City, Canada, pp 583-592.

Bleszynski, R., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A. and Rogers, C.A. (2002): "Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag: laboratory and outdoor exposure site studies", *ACI Materials Journal*, Vol 99, No. 5, pp 499-508.

Blezard, R.G. (1998): "The history of calcareous cements", in *Lea's chemistry of cement and concrete*, P.C. Hewlett, ed., Arnold, ISBN 0 340 56589 6, London, UK.

Borsoi, A., Collepari, S., Coppola, L., Troli, R., Collepari, M. (2000): "Sulfate attack on blended Portland cements", *ACI Special Publication 192*, pp 417-432.

Bouzoubaâ, N., Bilodeau, A., Sivasundaram, V., Fournier, B., Golden, D.M. (2004): "Development of ternary blends for high-performance concrete", *ACI Materials Journal*, Vol 101, pp 19-29.

Bouzoubaâ, N. & Fournier, B. (2005): "Current situation with the production and use of supplementary cementitious materials (SCMs) in concrete construction in Canada", *Canadian Journal of civil engineering*, Vol 32, pp 129-143.

Bouzoubaâ, N, Bilodeau, Sivasundaram, V., Chakraborty, A.K. (2007) "Mechanical properties and durability characteristics of high volume fly ash concrete made with ordinary Portland cement and blended Portland fly ash cement", Proceeding of the Ninth CANMET/ACI International Conference on Fly ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Warsaw, Poland, ACI SP-242, pp 303-319.

Brennan, P. (2012): "Fly ash – An overview of its production, properties and utilisation in Europe, Presentasjon på Nordic workshop: "Durability aspects of fly ash and slag in concrete", Statens Vegvesens rapporter nr. 149.

Brodersen, H.A. (1982): "The dependence of transport of various ions in concrete from structure and composition of the paste", Doctoral thesis RWTH, Aachen, Germany.

Burden, D. (2006): "The Durability of Concrete Containing High Levels of Fly Ash", Master Thesis, PCA R&D Serial No. 2989, 2006, 101 p.

Byggforskserien byggdetaljblad 520.067 (1999): "Frostnedbrystning av betong og andre porøse byggematerialer», Norges byggforskingsinstitutt, Oslo.

Böhm, M. & Baetzner, S. (2008): "The effect of the alkalinity of the pore solutions on ASR", In: Broekmans, M.A.T.M. and Wigum, B.J. (editors): Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Trondheim, Norway.

Cembureau (2012): "Activity report 2011", The European cement association, Brussels, Belgium. www.cembureau.eu

Cahn, D. et al. (1997): "Atmospheric CO₂ and the US cement industry", World Cement, August, Vol. 28, No. 8, pp.64–68.

Cao, H.T., Bucea, L., Ray, A., Yozghatlian, S. (1997): "The effect of cement composition and pH of environment on sulfate resistance of portland cements and blended cements", Cement and Concrete Composites, Vol 19, pp 161-171.

Chang, Z.T., Song, X.J., Munn, R., Marosszeky, M. (2005): "Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack", Cement and Concrete Research, Vol 35, pp 1486-1494.

Chapex, T., Scrivener, K. (2012): "Controlling alkali-silica reaction by understanding the contribution of aluminium provided by supplementary cementitious materials", In Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete, Drimalas, T., Ideker, J.H. and Fournier, B. Eds., Austin, Texas, USA, 2012, 7 pp.

Chalee, W., Jaturapikatakkul, C. (2009): "Effects of w/b ratios and fly ash fineness on chloride diffusion coefficient in marine environment", Materials and structures, Vol 42, pp 505-514.

CHLORTEST (2003): "Guideline for practical use of methods for testing the resistance of concrete to chloride ingress", EU Funded research project under 5FP GROWTH Programme, Project N: GRD1-2002-71808.

Collepari, M. (2003): "A state-of-the art review on delayed ettringite attack on concrete", Cement & Concrete Composites, Vol 25, pp 401-407.

CSA A23.2 (2000): Detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars. Methods of test for concrete, Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada.

Dahl, P.A., Lindgård, J., Danielsen, S.W., Hagby, C., Kompen, R., Pedersen, B. and Rønning, T. (2004): "Specification and guidelines for production of AAR resistant concrete in Norway", Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China.

Danner, T. (2016): Personlig kommunikasjon.

Dent Glasser, L.S. and Kataoka, N. (1982): "On the role of calcium in the alkali-aggregate reaction", Cement and Concrete Research, Vol 12, pp 321-331.

Dhir, R.K., El-Mohr, M.A.K., Dyer, T.D. (1996): "Chloride binding in GGBS concrete", Cement and Concrete Research, Vol 26, pp 1767-1773.

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

Dhole, R., Thomas, M.D.A., Folliard, K.J., Drimalas, T. (2013): "Characterization of fly ashes for sulfate resistance", ACI Materials Journal, Vol 110, pp 159-168.

Diamond, S (1983): "Effects of microsilica (silica fume) on pore-solution chemistry of cement pastes, Communication of the American Ceramics Society, 1983, pp 82-84.

Diamond, S. (1997): "Alkali silica reactions – some paradoxes", Cement and Concrete Composites, Vol 19, pp 391-401.

Du L. & Folliard K.J. (2005): "Mechanism of air entrainment in concrete, Cement & Concrete Research Vol. 35, pp.1463-1471

Duchesne, J. Bérubé M.-A.: (1995): "Effect of supplementary cementing materials on the composition of cement hydration products", Advanced Cement Based Materials, 2, pp 43-52.

Duchesne, J. and Bérubé, M. A. (2000): "Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against ASR", Proceedings of the 11th International Conference of Alkali-Aggregate Reaction, Quebec, Canada, pp 613-619.

Duchesne, J. and Bérubé, M. A. (2001): "Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against alkali-silica reaction", Cement and Concrete Research, Vol 31, pp 1057-1063.

ECOBA (2011): European Coal Combustion Products Association www.ecoba.org

ECOserve (2006): «Blended cements. The sustainable solution for the cement and concrete industry in Europe», ECO-Serve Network, Cluster 2: Production and application of blended cements.

Elahi, A., Basheer, P.A.M., Nanukuttan, S.V., Khan, Q.U.Z. (2010): "Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials", Construction and Building Materials, Vol 24, pp292-299.

Elkey, W., Sellevold, E.J. (1995): "Electrical resistivity of concrete", Publication no. 80, Directorate of Public Roads, Norwegian Road Research Laboratory, Oslo, Norway.

EMPA (2016): "Analysis of cementitious materials. Test report no 5214011626".

Euroslag, The European slag association (2012): "Position paper on the status of ferrous slag", www.euroslag.org

Escalante, J.I., Gomez, L.Y., Johal, K.K., Mendoza, G., Mancha, H. and Mendez, J.: (2001): "Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions", *Cement and Concrete Research* 31, pp 1403-1409.

Fagerlund, G. (1977): "The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete", *Materials and structures*, Vol. 10, pp 230-251.

Ferraris C.F., Obla K. H. and Hill R. (2001a): "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp 245-255.

Ferreira, M., Leivo, M., Kuosa, H. & Holt, E. (2012): "The effect of by-products on frost-salt durability of aged concrete". Workshop proceeding from the Nordic miniseminar Durability aspects of fly ash and slag in concrete, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 121-136.

fib Model Code for Service Life Design; (2006): *fib* Bulletin No. 34, 116 p.

Fidjestøl, P., Frearson, J. (1994): "High-performance concrete using blended and triple blended binders", *ACI Special publication* 149, pp 135-158.

Geiker, M. (2015): "Fly ash in concrete, Danish experience". Statens vegvesens rapporter nr. 370.

Geiseler, J., Kollo, H., Lang, E. (1995): "Influence of blast furnace cements on durability of concrete structures", *ACI Materials Journal*, Vol 92, pp 252-257.

Giergiczny, Z., Glinicki, M.A., Sokolowski, M. and Zielinski, M. (2009): "Air void system and frost-salt scaling of concrete containing slag-blended concrete", *Construction and Building Materials*, Vol 23, pp 2451-2456.

Gjørsv, O. (2012): "Blast furnace slag for durable concrete infrastructure in marine environment", Workshop proceeding from the Nordic mini-seminar Durability aspects of fly ash and slag in concrete, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 67-81.

Glasser, F.P.(1992): "Chemistry of the alkali-aggregate reaction", in "The alkali-silica reaction in concrete", R .N. Swamy, ed., Blackie and Son Ltd., ISBN 0-216-92691-2, London, UK.

Gouda, V.K., Halaka, W.Y. (1970) Crrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel, II. Embedded in concrete. *British Corrosion Journal*, Vol 5, pp 204-208.

Grattan-Bellew, P.E., Mitchell, L.D.(2006): "Quantitive petrographic analysis of concrete – The Damage Rating Index (DRI) method, a review", *Colloque Marc-Andre Bérubé sur la réactivité alcalis-granulats dans le béton*, Montréal, Canada, pp 321-334.

G. Gudmundsson, G. & Olafsson, H. (1999) "Alkali-silica reactions and silica fume. 20 years of experience in Iceland," *Cement and Concrete Research* vol 29, pp. 1289-1297.

Gulikers, J. (2012): "Long-term practice experience with the use of blast furnace slag cement for concrete structures at Rijkswaterstat", Workshop proceeding from the Nordic miniseminar Durability aspects of fly ash and slag in concrete, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 1-7.

Hagelia, P. (2011): "Deterioration mechanisms and durability of sprayed concrete for rock support in tunnels", PhD-thesis at Delft University of Technology, ISBN 9788277041384.

Hagelia, P., Sibbick, R.G., Crammond, N.J., Grønhaug, A. and Larsen, C.K. (2001): "Thamuasite and subsequent secondary calcite deposition in sprayed concrete in contact with sulphide bearing alum shale, Oslo, Norway", 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Building materials, pp 131-138, Athens, Greece.

Hagelia, P., Sibbick, R.G. (2009): "Thaumasite sulfate attack, popcorn calcite deposition and acid attack in concrete stored at the Blindarmen test site Oslo, from 1952-1982", *Materials Characterisation*, 60, 686-699 (Chapter 4).

Hanehara S., Tomosawa F., Kobayakawa M., Hwang K.R.: (2001): "Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste", *Cem. Concr. Res.* Vol 31, pp 31-39

Harrison, T. A., Jones, M.R., Newlands, M.D., Kandasami, S., Khanna, G. (2012): "Experience of using the prTS 12390-12 accelerated carbonation test to assess the relative performance of concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol 64, pp 737-746.

Hartshorn S.A., Sharp J.H., Swamy R.N. (1999): "Thaumasite formation in Portland-limestone cement pastes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp 1331-1340

Hausmann, D.A. (1967): "Steel corrosion in concrete. How does it occur?" *Materials Protection*, Vol 6, pp19-23.

Heidelberg Cement Northern Europe (2010): Bærekraftsrapport 2009. www.heidelbergcement.com/no/no/norcem

Heidelberg Cement Northern Europe (2012): Bærekraftsrapport 2010-2011. www.heidelbergcement.com/no/no/norcem

Higgins, D.D. (2003): "Increased sulfate resistance of ggbs concrete in the presence of carbonate", *Cement & Concrete Composites*, Vol 25, pp 913-919.

Higgins, D.D., Crammond, N.J. (2003): "Resistance of concrete containing ggbs to the thaumasite form of sulfate attack", *Cement & Concrete Composites*, Vol 25, pp 921-929.

Hong, S.Y., Glasser, F.P. (1999): "Alkali binding in cement pastes, Part I CSH phase", *Cement and Concrete Research*, Vol 29, pp 1893-1903.

Hong, S.Y., Glasser, F.P. (2002): "Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels Part II Role alumina", *Cement and Concrete Research*, Vol 32, pp 1101-1111.

Hooton, R.D. (2000): "Canadian use of ground granulated blast furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol 27, pp 754-760.

Hooton, R.D. (2012): "Thirty five years of experience with slag cement concrete in Canada". Workshop proceeding from the Nordic mini seminar Durability aspects of fly ash and slag in concrete, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 179-190.

Hooton, R. D., and Emery J. J.: (1983): "Glass content determination and strength development predictions for vitrified blast furnace slag," *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete*, SP-79, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., V. 2, pp. 943-962.

Hooton, R.D., Emery, J.J. (1990): "Sulfate resistance of a Canadian slag cement", *ACI Materials Journal*, Vol 87, pp 547-555.

Hooton, D., Thomas, M., Ramlochan, T. and Bleszynski, R. (2008): "Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast furnace slag: laboratory and outdoor exposure site studies". In: Broekmans, M.A.T.M. and Wigum, B.J. (editors): *Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete*, Trondheim, Norway.

Hooton, R.D., Fournier, B., Kerenidis, K. Chevrier, R. (2012): Mitigating alkali-silica reaction when using high-alkali cements", " In *Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete*, Drimalas, T., Ideker, J.H. and Fournier, B. Eds., Austin, Texas, USA, 2012, 10 pp.

Hooton, R.D., Rogers, C., MacDonald, C.A. and Ramlochan, T. (2013): "Twenty-year field evaluation of alkali-silica reaction mitigation", *ACI Materials Journal*, Vol. 110, pp 539-548.

Hornbostel, K., Larsen, C.K., Geiker, M.R. (2012): "Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – a literature review". *Proceedings of the 1st International Congress on Durability of Concrete*, Trondheim, Norway.

Hou, X., Kirkpatrick, R.J., L. J. Struble, L.J., Shin, J. and Monteiro, P.J.M. (2003): "The structure of ASR gel and its relationship to C-S-H," in *Proceedings of the Engineering Conference on Advances in Cement and Concrete IX: Volume Changes, Cracking and Durability*, Copper Mountain, Colorado, USA.

Ideker, J.H., Drimalas, T., Bentivegna, A.F., Folliard, K. J., Fournier, B., Thomas, M.D.A., Hooton, R.D., Roger, C.A. (2012): "The importance of outdoor exposure site testing", In *Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete*, Drimalas, T., Ideker, J.H. and Fournier, B. Eds., Austin, Texas, USA, 2012, 10 pp.

Irassar, E.F., Di Maio, A., Batic, O.R. (1996): "Sulfate attack on concrete with mineral admixtures", *Cement and Concrete Research*, Vol 26, pp 113-123.

Ishikawa, Y. (2007): "Research on the quality distribution of JIS type-II fly ash in Japan", *World of Coal Ash 2008*, USA.

Jacobsen, S., Ollendorff, M., Geiker, M., Tunstall, L., Scherer, G.W. (2012): "Predicting AEA dosage by foam index and adsorption on fly ash", *Workshop proceeding from the Nordic miniseminar Durability aspects of fly ash and slag in concrete*, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 103-120.

Jacobsen, S. & Lahus, O. (2001): "High volume fly ash RCC for dams: freezing and thawing durability", *Proceedings of the third CANMET/ACI International symposium on sustainable development of cement and concrete*, ACI SP-202, pp 315-330.

Jensen, V. (1993): "Alkali aggregate reactions in southern Norway", *Doctor Technicae-theses*, Technical University of Trondheim, Norway.

Justnes, H. (2007): "Making cements with less clinker content. State of the art". COIN report. SINTEF Building and Infrastructure, Trondheim, Norway. 19 pp. ISBN 978-82-536-0983-6.

Kanstad, T., Guomin, J. (2004): «Bjørsvika senketunnel, Fase 2. Evaluering av risstendens i herdefasen». (Rapport nr. 8). NTNU, Institutt for konstruksjonsteknikk.

- Kawamura, M., Takamoto, K. and Hasaba, S. (1986): "Effect of silica fume on alkali-silica expansion in mortars". Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Proceedings of the 2nd International Conference, Madrid, Spain, pp 999-1012.
- Khuntongkeaw, J., Tangtermsirikul, S., Leelawat, T. (2006): "A study of carbonation depth prediction for fly ash concrete", Construction and Building Materials, Vol 20, pp 744-753.
- Khatri, R.P., Sirivivatnanon, V., Yang, J.L. (1997): "Role of permeability in sulphate attack", Cement and Concrete Research, Vol 27, pp 1179-1189.
- Kjellsen, K. og Skjølvold, O. (2003): "Kloridinntrengning i ressursvennlig kvalitetsbetong", Rapport nr. 4 i "Betongkonstruksjoners livsløp". Statens Vegvesen, Vegdirektoratet, Oslo.
- Kjellsen, K.O., Rønning, T.F. and Meland, I. (2001): "Prevention of deleterious alkali aggregate reactions by use of Norwegian Portland-fly ash cement", In: Workshop on durability of exposed concrete containing secondary cementitious materials, Hirtshals, Denmark. The Nordic Concrete Federation.
- Kjennerud, A. (1978): "Alkaligrusreaksjoner påvist i Norge. Skadene mer vanlige enn antatt?", Plan og Bygg, Bd 26, nr 1.
- Kocaba, V. & Scrivener, K. (2009): "Effect of SCMs on hydration kinetics of cementitious systems", Presentasjon på: International summit on cement hydration kinetics and modelling (2009).
- Kollek, J.J., Varma, S.P., Zaris, C. (1986): "Measurement of OH⁻ concentration of pore fluids and expansion due to alkali-silica reaction in composite cement mortars", Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol 3, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 183-189.
- Kompen, R., Liestøl, G. (1994): «Sikring av overdekning for armering», Intern rapport nr. 1731, Veglaboratoriet, Statens vegvesen Vegdirektoratet.
- Kompen, R., Blankvoll, A., Larsen, C.K., Kristiansen, B., Bonsak, B., Halden J. (1998): OFU Gimsøystraumen bru: «Anbefalinger for inspeksjon, reparasjon og overflatebehandling av kystbruer i betong», Publikasjon nr. 87, Veglaboratoriet, Statens vegvesen Vegdirektoratet, Oslo.
- Kompen, R., Willoughby, I. (2003): «Bjørvika senketunnel. Feltforsøk med flygeaskebetong». Oppdrag A-35, Rapport nr. 2. Statens vegvesen Vegdirektoratet.
- Kuosa, H., Leivo, M. Holt, E., Ferreira, M. (2012): "The effect of slag and fly ash on interaction of chloride penetration and carbonation", Workshop proceeding from the Nordic mini-seminar Durability aspects of fly ash and slag in concrete, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 57-66.
- Lane, D.S.:(2000): "Preventive measures for alkali-silica reactions used in Virginia, USA". In Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, Quebec City, Canada, pp 693-702.
- Lane, D.S. (2006): "An evaluation of the performance of concretes containing fly ash and ground slag in bridge decks", Report VTRC 07-R7, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia, USA.
- Langley, W.S. & Leaman, G.H. (1998): "Practical uses for high-volume fly ash concrete utilizing a low calcium fly ash". Proceedings of the sixth CANMET/ACI/JCI International conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in Concrete, ACI SP-178, Vol.1, pp 545-574.

Larbi, J.A., Fraaij, A.L.A, Bijen, J.M.J.M. (1990): "The chemistry of the pore fluid of silica fume-blended cement systems", *Cement and concrete research*, vol. 20, pp 506-516.

Larsen, C.K., Willoughby, I. (2004): «Bjørvika senketunnel. Betongrådgivning, trinn 2: Laboratorieresultater», Oppdrag A-35 A, rapport nr. 4. Statens vegvesen Vegdirektoratet, Teknologivdelingen.

Larsen, C.K, Willoughby, I. og Kompen, R. (2004): "Bjørvika senketunnel. Betongrådgivning, trinn 1: laboratorieresultater". Oppdrag A35-A, rapport nr. 1, Statens Vegvesen Vegdirektoratet, Teknologivdelingen.

Larsen, C.K. (2004): «Bjørvika senketunnel. Betongrådgivning. Sluttrapport lavvarmebetong». Oppdrag A-35 A, rapport nr. 12. Statens vegvesen Vegdirektoratet.

Larsen, C.K. (2005): «Utvikling av kloridbestandig betong – 10 års felteksponeering», SINTEF/NTNU Betonginformasjonsdag 2005.

Larsen, C. K. (2006): "Influence of concrete composition on long term chloride ingress", *Proceedings International Conference on Bridges*, Dubrovnik, Croatia.

Larsen, C.K. (2012): "The effect of fly ash and slag on critical parameters for rebar corrosion – NPRA experience", In: *Durability aspects of fly ash and slag in concrete. Presentations from a Nordic workshop*, Statens vegvesens rapporter nr. 149, pp 160-170.

Larsen, C.K. (2013): «Levetidsberegning – hvilke levetider har våre betonger?» Internt notat i forbindelse med revisjon av HB 185 og R762.

Larsen, C.K., Sellevold, E.J., Askeland, F., Østvik, J-M., Vennesland, Ø. (2006a): "Electrical resistivity of concrete. Part II: Influence of moisture content and temperature", *Proceedings of the 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*, Quebec City, Canada. (Også publisert som: Teknologirapport nr 2482, Statens vegvesen Vegdirektoratet i 2007)

Larsen, C.K., Østvik, J-M., Sellevold, E.J., Vennesland, Ø. (2006b): "Electrical resistivity of concrete. Part III: Long term field measurements on concrete elements in the tidal zone", *Proceedings of the 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering*, Quebec City, Canada. (Også publisert som: Teknologirapport nr 2482, Statens vegvesen Vegdirektoratet i 2007)

Leeman, A., Merz, C.: (2012): "An attempt to validate the concrete performance test with the degree of AAR-induced damage observed in concrete structures", In *Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete*, Drimalas, T., Ideker, J.H. and Fournier, B. Eds., Austin, Texas, USA, 2012, 11 pp.

Lee, C. Shieh, W.K., Lou, I.J. (2000): "Evaluation of the effectiveness of slag and fly ash in preventing expansion due to AAR in Taiwan", In *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete*, Quebec City, Canada, pp 703-712.

Li, G., Zhao, X. (2003): "Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag", *Cement & Concrete Composites*, Vol 25, pp 293-299.

Liestøl, G. (1999): "Aursundprosjektet. FoU-prosjekt for planlegging, prosjektering og utførelse av mer bestandige betongbruer i værutsatte kyststrøk. Erfaringsrapport". Rapport nr. 99-03BRU. Bruavdelingen, betongbrukontoret, Statens vegvesen Vegdirektoratet.

Liestøl, G., Kompen, R., Sellevold, E.J. og Rannem Isaksen, H. (1995): FoU-prosjekt: Utvikling av kloridbestandig betong. Resepter og fastheter. Rapport nr 94-07-BRU. Bruavdelingen betongbrukontoret, Statens vegvesen Vegdirektoratet.

Lindgård, J. (2013): "Alkali-silica reaction (ASR) – Performance testing", Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway (PhD-thesis).

Lindgård, J., Thomas, M.D.A, Sellevold, E.J., Pedersen, B., Andiç-Çakir, Ö., Justnes, H., Rønning, T.F. (2013): "Alkali-silica reaction (ASR) – performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion", Cement and Concrete Research, Vol 53, pp 68-90.

Lindvall, A., Esping, O. & Löfgren, I. (2012): "Properties of concretes mixed with pulverized fly ash and ground granulated blast furnace slag", Workshop proceeding from the Nordic miniseminar Durability aspects of fly ash and slag in concrete, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 137-156.

Liu, G. (2006): "Control of chloride penetration into concrete structures at early age", Doctoral Thesis, NTNU, Trondheim. ISBN 82-471-7838-9 (printed version), ISBN 82-471-7837-0 (electronic version).

Locher, F.W. (2006): "Cement – principles of production and use", Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf, p 206.

Lothenbach B., Scriverener K., Hooton R.D., Supplementary cementitious materials, Cem. Concr. Res. 41 (2011) 217-229

Luke K., Lachowski, Internal composition of 20-year-old fly ash and slag-blended ordinary Portland cement pastes, Journal of the American Ceramic Society 91 (12) (2008) 4084-4092

Lynsdale, C.J., Khan, M.I. (2000): "Chloride and oxygen permeability of concrete incorporating fly ash and silica fume in ternary systems", CANMET/ ACI Conference on Durability of Concrete, ACI SP-192, pp 739-753.

Maage, M. (redaktør) (2015): "Betong: Regelverk, teknologi og utførelse". Byggenæringens forlag AS.

Malhotra, V. M. (2010): "Global warming and role of supplementary cementing materials and superplasticizers in reducing greenhouse gas emissions from the manufacturing of Portland cement", Int. Journal of Structural Engineering, Vol 1, No 2, pp 116-130.

Malhotra, V.M and Ramezaniapour, A.A. (1994): "Fly ash in concrete", CANMET, Ottawa, Canada. ISBN 0-660-15764-0.

Malhotra, V.M. and Mehta, P.K. (2005): "High-performance high-volume fly ash concrete. Materials, mixture proportioning, properties, construction, practice and case histories". Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada.

Marusin, S.L. & Shotwell, S.B. (2000): "Alkali-silica reaction in concrete caused by densified silica fume lumps: A case study," Cement, Concrete and Aggregates, vol. 22, pp. 90-94.

Massazza, F. (1998): "Pozzolana and pozzolanic cements", in Lea's chemistry of cement and concrete, P.C. Hewlett, ed., Arnold, ISBN 0 340 56589 6, London, UK.

McCarthy, M.J., Dhir, R.K., Halliday, J. E., Wibowo, A. (2006): "Role of PFA quality and conditioning in minimising alkali-silica reaction in concrete", Magazine of Concrete Research, Vol 58, pp 49-61.

MacDonald, C.A., Rogers, C. and Hooton, R.D. (2012): "The relationship between laboratory and field expansion – observations at the Kingston outdoor exposure site for ASR after twenty years", In Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete, Drimalas, T., Ideker, J.H. and Fournier, B. Eds., Austin, Texas, USA, 2012, 1 pp.

McGrath, P.F., Hooton, R.D. (1997): "Effect of binder composition on chloride penetration resistance of concrete". Proceedings of the Fourth International Conference on Durability of Concrete, Sydney, Australia. ACI SP-171, 1: pp79-86.

Moranville-Regourd, M. (1998): "Cements made from blastfurnace slag", in Lea's chemistry of cement and concrete, P.C. Hewlett, ed., Arnold, ISBN 0 340 56589 6, London, UK.

Mortensvik, Ø., Rudberg, E., Vollset, D. (2012): "Air-void structure of produced frost resistant concrete – an on site study", Proceedings of the 12th International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, Prague, Czech Republic, 2012 Supplementary Papers.

Moum, J., Rosenqvist, I.T. (1959) "Sulphate attack on concrete in the Oslo region", Journal of the American Concrete Institute, Proceedings, Paper 56 -18, 8 pp.

MTO LS-412 (2012): "Scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals". Ministry of transportation, Ontario, Canada.

Naik, T.R., Ramme, B.W., Tews, J.H. (1995): "Pavement construction with high-volume class C and class F fly ash concrete", ACI Materials Journal, Vol. 92, pp 200-210.

Neville A.M. (1995): "Properties of Concrete", Fourth Edition, Longman, ISBN 0-582-23070-5, Harlow, UK.

Nippon slag Association (2012): "Production and uses of blast furnace slag in Japan", www.slg.jp

Ngala, V.T., Page, C.L. (1997): "Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes", Cement and Concrete Research, Vol 27, pp 995-1007.

Norsk Betongforening (1988): «Tilslagsmaterialer for betongformål», NB Publikasjon nr 18.

Norsk betongforening (2004): «Bestendig betong med alkalireaktivt tilslag», NB publikasjon nr 21.

Norsk betongforening (2005): «Alkalireaksjoner i betong. Prøvetoder og krav til laboratorier.» NB publikasjon nr 32.

Norsk Betongforening (2011): «Bestandighet av betongkonstruksjoner i marint miljø», NB Publikasjon nr. 35, Oslo, Norge.

NS-EN 197-1:2000+A1 (2005): «Sement. Del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper». Standard Norge.

NS-EN 450-1 Flygeaske for betong. Standard Norge.

NS-EN 480-11 (2005): «Tilsetningsstoffer til betong, mørtel og injeksjonsmørtel – Prøvmeter – Del 11: Bestemmelse av luftporestruktur i herdet betong». Standard Norge.

NS-CEN/TS 12390-9:2006: «Prøving av herdet betong. Del 9: Fryse/tine-motstand. Avskalling». Standard Norge.

NS-EN 13396 (2004): «Produkter og systemer for beskyttelse og reparasjon av betongkonstruksjoner – Prøvmingsmetoder – Måling av kloridinntrengning». Standard Norge.

NS-EN 15167-1 (2006): Slagg for betong, mørtel og injiseringsmasse. Del 1: Definisjoner, krav og samsvarskriterier.

NS-EN 206: 2013+NA 2014: «Betong. Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar». Standard Norge.

NT Build 492 (1999): “Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments”, NORDTEST.

NT Build 443 (1995): “Accelerated chloride penetration”, NORDTEST.

Ogawa, S., Nozaki, T., Yamada, K., Hirao, H., Hooton, R.D. (2012): “Improvement on sulfate resistance of blended cement with high alumina slag”, Cement and Concrete Research, Vol 42, pp 244-251.

Oh, B.H., Jang, S.Y., Shin, Y.S. (2003): “Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structure”, Magazine of Concrete Research, Vol 55, pp 117-124.

Pal, S.C., Mukherjee, A., Pathak, S.R.:(2003): “Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete”, Cement and Concrete Research 33 (2003), pp 1481-1486.

Parrot, L.J. (1992): “Variations of water absorption rate and porosity with depth from an exposed concrete surface: Effects of exposure conditions and cement type”. Cement and Concrete Research, Vol 22, pp 1077-1088.

Pedersen, B.: (2004): “Alkali-reactive and inert filler in concrete. Rheology of fresh mixtures and expansive reactions”. Dr.ing avhandling 2004:92, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, Trondheim. 198 pp + vedlegg.

Pedersen, B. (2014): «Luft i betong og effekt på frostmotstand», presentasjon på Laboratoriekonferansen 2014, Statens vegvesen.

Polder R.B. (2012): “Effects of slag and fly ash in concrete in chloride environment – Research from the Netherlands”. Workshop proceeding from the Nordic mini-seminar Durability aspects of fly ash and slag in concrete, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 47-56.

Polder, R.B., Nijland, T.G., de Rooij, M.R. (2014): «Blast furnace slag cement concrete with high slag content (CEM III/B). Experiences with the durability in the Netherlands since the 1920's». Statens vegvesens rapporter nr 270. (Forsidetittel på vegvesen-rapport: «Slag cement concrete- the Dutch experience». Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015)

Polder, R.B. (2015): “Chloride resistance of slag cement mortars - Etatsprogrammet Varige konstruksjoner”, Statens vegvesens rapporter nr. 500.

Poole, A.B.: (1992): “Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete”, in “The alkali-silica reaction in concrete”, edited by R. N. Swamy. Blackie and Son ltd., ISBN 0-216-92691-2, London, UK.

Powers, T. C. and Steinour, H. H. (1955b): “An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction, part 2: A hypotheses concerning safe and unsafe reactions with reactive silica in concrete”, Journal of the American Concrete Institute, vol. 26, pp. 785-811.

prTS 12390-12 "Testing hardened concrete - Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method", CEN draft.

du Preez, A.A., Alexander, M.G. (2004): "A site study of durability indexes for concrete in marine conditions", *Materials and Structures*, Vol 37, pp 146-154.

Rahman, M.M., Bassouoni, M.T. (2014): "Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation", *Construction and Building Materials*, Vol. 73, pp 652-662.

Ramezaniapour, A.M., Hooton, R.D. (2013): "Sulfate resistance of Portland-limestone cements in combination with supplementary cementitious materials", *Materials and Structures*, Vol. 46, pp 1061-1073.

Rannem Isaksen, H., Holtmoen, J.P. (1994): «FoU-prosjekt: Utvikling av kloridbestandig betong. Rapport fra produksjon av prøveelementer». Rapport nr 94-13 BRU, Bruavdelingen kontor for betongbruer, Statens vegvesen Vegdirektoratet.

Revertegat, E., Richet, C., Gegout, P. (1992): "Effect of pH on the durability of cement pastes", *Cement and Concrete Research*, Vol 22, pp 259-272.

RILEM Recommended Test Method AAR-2 (2016): "Detection of potential alkali-reactivity - Accelerated mortar-bar test method for aggregates", in *RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures*, P. J. Nixon and I. Sims, Eds., RILEM, 2016, pp 61-77.

RILEM Recommended Test Method AAR-3 (2016): "Detection of potential alkali-reactivity - 38°C test method for aggregate combinations using concrete prisms," in *RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures*, P. J. Nixon and I. Sims, Eds., RILEM, 2016, pp 79-97.

RILEM Recommended Test Method AAR-4 (2016): "Detection of potential alkali-reactivity - 60°C test method for aggregate combinations using concrete prisms", in *RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures*, P. J. Nixon og I. Sims, Red., RILEM, 2016, pp 99-130.

Rodum, E. (2015): «Tidlig overflatebehandling av lavvarmebetong. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015». Statens vegvesens rapporter nr 421.

Roy D.M., Idorn G.M. (1982): "Hydration, structure and properties of blast furnace slag cements, mortars and concrete", *ACI Journal* Vol 6 (1982) pp 444-457.

Roy, D.M. and Parker, K.M. (1983): "Microstructures and properties of granulated slag portland cement blends at normal and elevated temperatures", *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral by-Products in Concrete*, SP-79, ACI, Vol. 1, pp. 397-414.

Roy, D.M., Arjunan, P., Silsbee, M.R. (2001): "Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol 31, pp 1809-1813.

Rowland, I.D. and Howe, T.N. (1999): "Vitruvius, Ten books on architecture", Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN 0-521-55364-4.

Rønning, T. (2016): Personlig kommunikasjon per e-mail.

Rønning, T.F. (2012): "Concrete freeze-thaw scaling resistance testing. Experience and development of a testing regime and acceptance criteria", Workshop proceeding from the Nordic mini-seminar

Durability aspects of fly ash and slag in concrete, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 157-163.

Sahmaran, M., Kasap, O., Duru, K., Yaman, I.O. (2007): "Effects of mix composition and water-cement ratio on the sulfate resistance of blended cements", *Cement & Concrete Composites*, Vol 29, pp 159-167.

Sakai, E., Miyahara, S., Ohsawa, S. Lee, S. and Daimon M. (2005): "Hydration of fly ash cement", *Cement and Concrete Research*, Vol 35, pp 1135-1140.

Schiessl, P., Breit, W. (1996): Local repair measures at concrete structures damaged by reinforcement corrosion – aspects of durability, *Proceedings at the 4th Int. Symposium "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction"*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, pp 525-534.

Sellekvold, E. (main author) (1987): "State-of-the-art report on Condensed silica fume in concrete", FIP.

Sellekvold, E.(2009):, "TKT 4215 Concrete Technology 1, Chapter 15 – Frost deterioration". Kompendium, NTNU.

Sellekvold, E.J. & Farstad, T. (1991): "Frost/salt-testing of concrete. Effect of test parameters and concrete moisture history", *Nordic Concrete Research*, No. 10, pp 121-138.

Sellekvold, E.J. & Bager, D.H. (1980): "Some implications of calorimetric ice formation results for frost resistance testing of cement products". Teknisk rapport 86/80, The Technical University of Denmark.

Shafatian, S.M.H., Akhavan,A., Maraghechi, H., Rajabipour, F. (2013): "How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTMC1567)". *Cement & Concrete Composites*, Vol 37, pp 143-153.

Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A.: (2002): "Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol 32, pp. 341-349.

Shi, C., Stegemann, J.A., Caldwell, R.J. (1998): "Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1212) results", *ACI Materials Journal*, Vol 95, pp389-394.

Sisomphon, K., Franke, L.: "Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials", *Cement and Concrete Research*, Vol 37, pp 1647-1653.

Skjølvold, O. (2009): "Kloriddiffusjon i betong. Vurdering av aldringseffekten ved felteksporing. COIN Project report 11-2009, SINTEF Byggforsk.

Skjølvold, O., Østnor, T. (2013): "Betong med forskjellige klinker og varierende flygeaskeinnhold – Samlerapport for 5 års felteksporing", SINTEF Byggforsk.

Slag Cement Association (SCA) (2012). www.slagcement.org

Smith, K.M., Schokker, A.J., Tikalsky, P.J.; Performance of Supplementary Cementitious Materials in Concrete Resistivity and Corrosion Monitoring Evaluations; *ACI Materials Journal*, V. 101, 2004, pp. 385-390.

Smepllass, S., Bjøntegaard, Ø., Kompen, R. og Haram, E. (2010): «Senketunnelen i Bjørvika, erfaringsrapport. Kontroll med opprissing i betongens herdefase». Statens vegvesen Teknologirapport nr. 2580.

SS 1372 44 (1995): «Betongprovning – Hårdnad betong – Avflagnig vid frysning», Standardiseringen i Sverige, Stockholm.

Stanish, K.D., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A. (1997): “Testing the chloride penetration resistance of concrete – A literature review”. Report, FHWA Contract DTFH61-97-R00022.

Stanish, K., Thomas, M. (2003): “The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients”, Cement and Concrete Research, V.33, pp. 55-62.

Stanton, T.E.: (1940): ”Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, American Society of Civil Engineers, Proceeding Vol 66, pp 1781-1811.

Stark, J. & Ludwig, H.M. (1997): Freeze-thaw and freeze-deicing salt resistance of concretes containing cement rich in granulated blast furnace slag, ACI Materials Journal, Vol 94, pp 47-55.

Statens vegvesen (2015): “Standard beskrivelsestekster for bruer og kaier. Hovedprosess 8”. Håndbok R 762. www.vegvesen.no

Statens vegvesen (2015): “Bruprosjektering. Prosjektering av bruer, ferjekaier og andre bærende konstruksjoner”. Håndbok N400. www.vegvesen.no

Sumer, M. (2012): “Compressive strength and sulfate resistance properties of concrete containing Class F and Class C fly ashes”, Construction and Building Materials, Vol 34, pp 531-536.

Taylor H.F.W., Cement Chemistry, Academic Press Limited, 1990.

Taylor R., Richardson I.G., Brydson R.M.D., Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement-ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag. Cem. Concr. Res. 40 (7) (2010) 971-983

Thomas, M. (1996): “Chloride threshold in marine concrete”, Cement and Concrete Research, Vol 26, pp 513-519.

Thomas, M.D.A. (1997): “Laboratory and field studies of salt scaling in fly ash concrete”. In: Frost resistance of concrete, editors: Setzer, M.J. and Auberg, R. E & FN Spon, London, UK. ISBN: 0419 229000.

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, pp 487-495.

Thomas, M. (2007): “Optimizing the use of fly ash in concrete”, Portland Cement Association, Illinois, USA. www.cement.org.

Thomas, M. (2011): “The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: a review”. Cement and Concrete Research Vol 41, pp 209-216.

Thomas, M., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J. and Shehata, M. (2006): “Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete”, Cement and Concrete Research, Vol 36, pp 1842-1856.

Thomas, M.D.A. and Innis, F.A. (1998): “Effect of slag on expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete”, ACI Materials Journal, Vol 95, pp 716-724.

Thomas, M.D.A., Shehata, M.H., Shashiprakash, S.G., Hopkins, D.S. and Cail, K. (1999): "Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol 29, pp 1207-1214.

Thomas, M.D.A. Bleszynski, R.F. (2000): "The use of silica fume to control expansion due to alkali aggregate reactivity in concrete – a review", in: J. Skalny, S. Mindess (Eds.) *Materials Science of Concrete VI*, American Ceramics Society, pp. 377-433.

Thomas, M.D.A., Matthews, J.D. (2004): "Performance of pfa concrete in a marine environment – 10-year results", *Cement & Concrete composites*, Vol 26, pp 5-20.

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

Thomas, M.D.A., Bremner, T., Scott, A.C.N. (2011), "Actual and Modeled Performance in a Tidal Zone"; *Concrete International*, Nov. 2011, pp. 23-28.

Thomas, M., Hooton, D.R., Rogers C., Fournier, B. (2012): "50 years old and still going strong", *Concrete International* January 2012, pp 35-40.

Torii, K., Kawamura, M. (1994): "Effects of fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulfuric attack and sulfate attack", *Cement and Concrete Research*, Vol 24, pp 361-370.

Torii, K., Taniguchi, K., Kawamura, M. (1995): "Sulfate resistance of high fly ash content concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol 25, pp 759-768.

Tremblay, S., Fournier, B., Thomas, M., Drimalas, T., Folliard, K. (2012): "The Lomas Boulevard road test site, Albuquerque (New Mexico) – A case study on the use of preventive measures against ASR in new concrete". In *Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete*, Drimalas, T., Ideker, J.H. and Fournier, B. eds. Austin, Texas, USA. 10 pp.

Tritthart, J. (1989): "Chloride binding in cement II. The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding. *Cement and Concrete Research*, Vol 19, pp 683-691.

Tsivilis, S., Kakali, G., Skaropoulou, A., Sharp, J.H., Swamy, R.N. (2003): "Use of mineral admixtures to prevent thaumasite formation in limestone cement mortar", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, pp 969-976.

Tuutti, K. (1982): "Corrosion of steel in concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute: Stockholm.

Ulstein, A., Haugom, T., Ulstein, E., Nysæter, H. (2011): «High volume fly ash with microsilica concrete – triple blend effect», hovedoppgave ved bachelorutdanning i byggdesign, Universitetet i Agder, Grimstad, 177 sider.

Urhan, S. (1986): "Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and a hypothesis concerning the mechanism," *Cement and Concrete Research*, vol. 17, pp. 141-152.

Utgenannt, P. (2008): "Frost resistance of concrete containing secondary cementitious materials – Experience from three field exposure sites". *Proceedings from the Nordic Concrete Federation Workshop on Durability of Exposed Concrete Containing Secondary Cementitious Materials*, Hirtshals, Denmark.

Utgenannt, P. (2004): "The influence of ageing on the salt-frost resistance of concrete", Doctoral thesis, Lund Institute of Technology, Sweden. ISBN 91-628-6000-3.

Utgenannt, P. & Petersson, P.E. (2012): "Frost resistance of concrete containing secondary cementitious materials – Experience from field and laboratory investigations". Workshop proceeding from the Nordic mini-seminar Durability aspects of fly ash and slag in concrete, Oslo February 2012, The Nordic Concrete Federation, 11/2012, pp 83-101.

Valenza II, J.J., Scherer, G.W. (2007 a): "A review of salt scaling: 1. Phenomenology", Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp 1007-1021.

Valenza II, J.J., Scherer, G.W. (2007 b): "A review of salt scaling: 1. Mechanisms", Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp 1022-1034.

Valenza II, J.J., Scherer, G.W. (2007 c): "Mechanism for salt scaling of a cementitious surface", Materials and Structures Vol. 40, pp 259-268.

Wang, H., Gillott, J.E. (1992): "Competitive nature of alkali-silica fume and alkali-aggregate (silica) reaction," Magazine of Concrete Research, vol. 44, pp. 235-239.

Wang, L. & Cui, Y. (2007): "The application and development of fly ash in china", World of Coal Ash 2007, USA.

Warner, S., Ideker, J.H., Schumacher, K.: (2012): "Alkali-silica reactivity and the role of alumina", In Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete, Drimalas, T., Ideker, J.H. and Fournier, B. eds. Austin, Texas, USA. 10 pp.

De Weerd K. (2011): "Blended Cement with Reduced CO₂ Emission – Utilizing the Fly Ash-Limestone Synergy", Doctoral theses NTNU, 2011:32.

Xu, J., Jiang, L., Wang, W., Xu, Y., Jiang, Y., (2011): "Chloride threshold value for reinforcement corrosion in concrete with additions of silica fume or fly ash", Magazine of Concrete Research, Vol 63, pp905-913.

Yuan et al (2007) Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment - A review.

Zachariassen, T.M. (2016) Personlig kommunikasjon per e-mail.

Zhang, M.H., Bilodeau, A., Shen, G. and Malhotra V.H. (1998): "De-icing salt scaling of concrete incorporating different types and percentages of fly ash". Proceedings of the sixth CANMET/ACI/JCI International conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in Concrete, ACI SP-178, Vol.1, pp 493-525.

Østvik, J-M., Larsen, C.K., Vennesland, Ø., Sellevold, E.J., Andrade, M.C. (2006): Electrical resistivity of concrete. Part I: "Frequency dependence at various moisture contents and temperatures", Proceedings of the 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Quebec City, Canada.

Årskog, V., Sengul, O., Dahl, R., Gjørsv, O.E. (2006): "Chloride penetration into silica fume concrete after 10 years of exposure in Aursundet bridge", International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost.

Årskog, V., Liu, G., Ferreira, M., Gjørsv, O. (2007): Slaggsementer og kloridmotstand, Statusrapport nr. BML 200701, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, Trondheim.

Årskog, V. og Gjørsv, O. (2007): "Slaggsementer og frostbestandighet". Rapport nr. BML 200702, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.

Årskog, V., Gjørsv, O.E., (2009): "Container terminal Sjursøye – Low heat concrete – three-year durability", Rapport BMP 200901, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, Trondheim.

Årskog, V. & Gjørsv, O.E. (2010): «Slag cements and frost resistance. Proceedings Vol. 2, Sixth International conference under severe conditions – Environment and Loading, ed. by P. Castro-Borges, E.I Moreno, K. Sakai, O.E. Gjørsv and N. Banthia, Taylor & Francis, ISBN 978-415-59316-8, London, pp 795-800.



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

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen