



Alkalireaksjoner - Overflate- behandling og andre tiltak

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 237

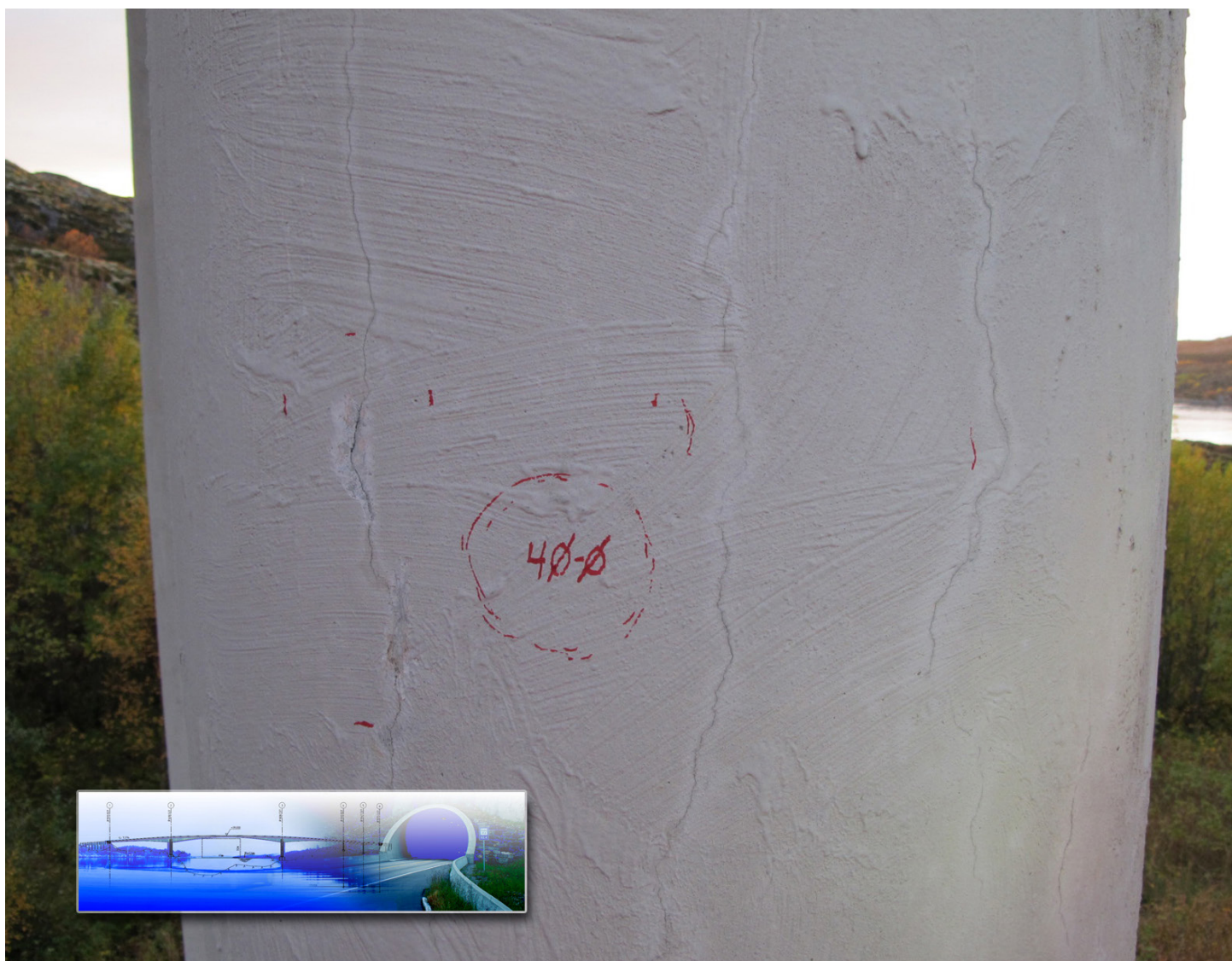


Foto: Eiva Rodum, Statens vegvesen

Tittel

Alkalireaksjoner - Overflatebehandling og andre tiltak

Undertittel

Effekt på betongkonstruksjoner med alkalireaksjoner

Forfatter

Gísli Guðmundsson og Guðbjartur Jón Einarsson, Mannvit

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologi-avdelingen

Seksjon

Tunnel og betong

Prosjektnummer

603242

Rapportnummer

Nr. 237

Prosjektleder

Synnøve A. Myren / Bård Pedersen

Godkjent av

Eva Rodum

Emneord

Varige konstruksjoner, tilstandsutvikling bruer, betong, alkalireaksjoner, overflatebehandling, preventive tiltak

Sammendrag

Alkalireaksjoner er en skademekanisme som er avhengig av et visst fuktinnhold i betongen, både for at reaksjoner og ekspansjoner skal kunne foregå. Kritisk grenseverdi er ofte satt til 80 % RF, og erfaringer viser at økende fuktinnhold gir økt nedbrytningshastighet. Overflatebehandling, innkledning og elektrokjemisk uttørking av betong er eksempler på preventive tiltak som har til hensikt å redusere fuktinnholdet i betongen og dermed redusere reaksjons-/ ekspansjonshastigheten. På oppdrag fra Statens vegvesen har Mannvit gjennomført et litteratursøk i internasjonale databaser og utarbeidet en statusrapport på effekten av overflatebehandling og andre preventive tiltak på betongens fuktinnhold og ekspansjons-/ rissutvikling. Rapporten oppsummerer erfaringer fra både felt- og laboratorieforsk.

Title

AAR - Surface treatment and other measures

Subtitle

Effect on concrete structures with AAR

Author

Gísli Guðmundsson and Guðbjartur Jón Einarsson, Mannvit

Department

Traffic safety, Environment and Technology department

Section

Tunnel and concrete

Project number

603242

Report number

No. 237

Project manager

Synnøve A. Myren / Bård Pedersen

Approved by

Eva Rodum

Key words

Durable structures, existing bridges, concrete, alkali aggregate reactions, surface treatment, preventive measures

Summary

Development of alkali aggregate reactions in concrete requires presence of a certain amount of water. A critical level for moisture content is often defined as 80 % RH, and experiences show that the degree of damage increases with increasing moisture content above this. Surface treatment, sheltering and electrochemical drying of concrete are examples on preventive measures with objective to reduce the water content in the concrete and thereby the rate of reactions and expansions. Ordered by NPRA, Mannvit has performed a literature survey and prepared a state-of-the-art report on the effect of surface treatment and other preventive measures on the moisture content and the development of expansion and cracking in existing concrete structures. The report summarises results both from field and laboratory experiments.

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 1: Tilstandsutvikling bruer** som ledes av Bård Pedersen. Prosjektet vil generere informasjon om tilstanden for bruer av betong, stål og tre, og gi økt forståelse for de bakenforliggende nedbrytningsmekanismene. Dette vil gi grunnlag for bedre levetidsvurderinger og reparasjonsmetoder. Innenfor områdene hvor det er nødvendig vil det etableres forbedrede rutiner og verktøy for tilstandskontroll- og analyse. Prosjektet vil også frembringe kunnskap om konstruktive konsekvenser av skader, samt konstruktive effekter av forsterkningstiltak. Prosjektet vil gi viktig input i forhold til design av material- og konstruksjonsløsninger for nyere bruer, og vil således ha leveranser av stor betydning til Prosjekt 3: Fremtidige bruer.

Rapporten er utarbeidet av *Gísli Guðmundsson og Guðbjartur Jón Einarsson, Mannvit* på oppdrag fra Varige konstruksjoner. Beskrivelse av oppdraget er gjengitt i vedlegg.

Avrop 10:

Rammeavtale på Laboratorietjenester innen betong,
betongkonstruksjoner, tunnel og bruvedlikehold med FOU.

Saksnummer: 2010174185

Deloppgave 2:

**Utarbeidelse av «State-of-the-art» rapport (STAR) på
Effekt av overflatebehandling og andre preventive tiltak
(på eksisterende konstruksjoner)**

av

Gísli Guðmundsson
Guðbjartur Jón Einarsson

Mars 2013

Innhold

1	Innledning	4
1.1	Generelt.....	4
2	Overflatebehandling med hydrofobierende impregnering (jfr definisjon i NS-EN 1504-2).....	6
2.1	Overflatebehandling av betong med hydrofobisk impregnering.	6
2.2	Parametre som påvirker overflatebehandling av betong med hydrofobisk impregnering.....	16
3	Overflatebehandling med belegg (jfr definisjon i NS-EN 1504-2)	18
3.1	Belegg på betongelementer	18
3.2	Parametere som påvirker belegg av betongelementer	22
4	Skjerming av betongoverflaten ved innkledning og andre tiltak	23
4.1	Fuktighetsreduksjon: kledning, tilsatt og / eller forbedret drenering	23
4.2	Fjerning, saging og kutting.....	24
5	Elektrokjemisk uttørking	25
5.1	Innledning.....	25
5.2	Elektro-Osmose.....	25
5.3	Elektro-Osmotisk Puls	26
5.4	Prosjekter	28
5.4.1	U.S. Army	28
5.4.2	Prosjekter i Asia og andre steder av Hydrotech.....	29
5.4.3	Prosjekter av Global Assistance	31
5.4.4	Prosjekter av STRUCTURAL	32
5.5	Konklusjoner	32
6	Tilførsel av litium	34
6.1	Historisk bakgrunn	34
6.2	Mekanismer for litium for å hindre ASR i betong	34
6.2.1	Forslag til mekanisme: Etablering av mindre ekspansiv produkt.....	34
6.2.2	Forslag til mekanisme: Undertrykkelse av silika oppløsning	36
6.2.3	Forslags til mekanisme: Redusert Repolymerisering.....	37
6.2.4	Forslags til mekanisme: Reduksjon i frastøtende krefter innen produktene.	37

6.2.5	Forslag til mekanisme av Tremblay et al. (2010) ³¹	38
6.3	Laboratorie studier i bruken av litium for å kontrollere ASR.....	40
6.3.1	Mengden av litium som kreves for å motvirke ASR ekspansjon (FHWA-HRT-06-133).....	50
6.4	Litium tilsatt i fersk betong, konkrete studier	51
6.4.1	Testområde Lomas Boulevard, Albuquerque, NM, USA.....	51
6.4.2	Testområde Lackawanna Valley motorvei, PA, USA.....	53
6.4.3	Testområde U.S. I-90, Oacoma, SD, USA.....	54
6.4.4	Testområde Coyote Springs Bro, NM, USA	55
6.4.5	Testområde Bro dekke, Wilmington, DE, USA	56
6.4.6	Testområde Bro dekke, Lyman County, SD, USA	56
6.4.7	Testområde høyspenntmaster, Corpus Christi, TX, USA	57
6.4.8	Testområde reparasjon av Platte Winner broen, SD, USA	57
6.5	Litium i eksisterende betongkonstruksjoner	57
6.5.1	Overflate påføring	61
6.5.2	Vakum impregnering	66
6.5.3	Elektrokjemiske migrasjon.....	67
6.6	Konklusjoner	75
7	Referanser	76

1 Innledning

Alkalireaksjoner i betong (*ASR eller AAR*) er kjemiske reaksjoner mellom sement og tilslagsmaterialer som på lengre sikt fører til en delvis oppløsning av SiO₂-mineraler i visse typer reaktive bergarter. Det dannes en "gel" som ved vannopptak ekspanderer. Utsatte deler av betong konstruksjoner ekspanderer, samtidig som det kan oppstå betydelige riss og sprekker. Videre vil betongens fasthet og tetthet kunne bli redusert, noe som blant annet kan disponere for andre nedbrytende prosesser.

1.1 Generelt

De ulike mekanismer som styrer ASR i betong er kompliserte. I tillegg er det ulike oppfatninger blant ulike fagmiljøer hvilke mekanismer som er mest viktige. Men det er bred enighet om at tre nødvendige komponenter for at ASR skal finne sted;

1. Reaktivt silika (fra tilslagsmaterialer),
2. Tilstrekkelig mengder alkalier (hovedsaklig fra portlandsement, men også eventuelt fra tilsetningsmaterialer eller eksterne kilder)
3. Tilstrekkelig fuktighet

Dersom man eliminerer en av disse faktorene, så vil dette effektivt forhindre ASR i å kunne utvikle seg.

Kritisk grenseverdi for fuktinnhold er ofte satt til 80 % RF, og erfaringer viser at økende fuktinnhold gir økt nedbrytningshastighet. Overflatebehandling av betong, innkledning av betong og elektrokjemisk uttørking av betong er eksempler på preventive tiltak som har til hensikt å redusere fuktinnholdet i betongen og dermed redusere reaksjons-/ekspansjonshastigheten til en reaktiv betong. Tilsetning av litium til fersk betong med reaktive delmaterialer er en kjent metode for å hindre utvikling av alkalireaksjoner. Tilførsel av litium ved påføring på betongoverflaten og etterfølgende transport inn i betongen via kapillærsug eller migrasjon, er en omdiskutert og omstridt metode for å redusere/stanse alkalireaksjoner i eksisterende betongkonstruksjoner.

Denne rapporten er utarbeidet på grunnlag av en bestilling fra Statens vegvesen (Avrop 10), der det skulle utarbeides en statusrapport vedrørende; «Effekt av overflatebehandling og andre preventive tiltak (på eksisterende konstruksjoner)».

Målsettingen med denne rapporten er å gi en oversikt over tilgjengelige referanser vedrørende hvordan man kan redusere eller forhindre ASR ved hjelp av overflatebehandling. I de fleste tilfellene vil overflatebehandling redusere fuktigheten i konstruksjoner som er utsatt for ASR til et nivå som er tilstrekkelig til å forhindre ASR. Ved å gjøre dette har man eliminert en av de tre faktorene som er med på å styre ASR.

I denne rapporten vil følgende tema bli behandlet, som spesifisert i avrop 10:

- Overflatebehandling med belegg (jfr definisjon i NS-EN 1504-2)
- Overflatebehandling med hydrofobere impregnering (jfr definisjon i NS-EN 1504-2)
- Skjerming av betongoverflaten ved innkledning
- Elektrokjemisk uttørring
- Tilførsel av litium

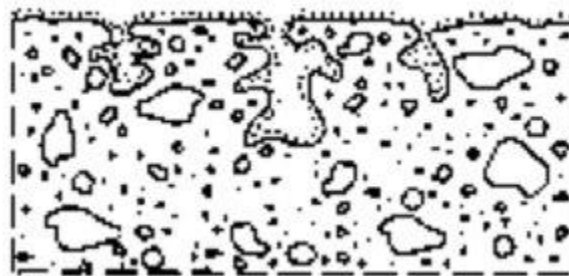
Alle disse behandlingsformene har som målsetting å redusere fuktigheten i betong, utenom tilførsel av litium, og tematikken som er beskrevet vedrørende kutting av ekspansjonsfuger.

Hvert deltema er diskutert nærmere under hvert del-kapitell.

2 Overflatebehandling med hydrofoberende impregnering (jfr definisjon i NS-EN 1504-2)

2.1 Overflatebehandling av betong med hydrofobisk impregnering.

EN 1504-2:2004¹ viser til hydrofobisk impregnering som en behandling for å produsere en vannavstøtende overflate på betongelementer. Porene og kapillærene er innvendig belagt eller foret med et tettende materiale, men ikke fylt. Det sees ingen film på overflaten av betongen, og det er liten eller ingen endring i utseende på overflaten. Typiske aktive forbindelser i hydrofobisk impregnerende materialer er oftest silaner eller siloksaner.



Figur 1: Skjematisk tegning av en typisk hydrofobisk impregnering [EN 1504-2:2004]¹

Impregnering utføres ved å sprøyte det hydrofobiske foringsmateriale på overflaten, som reagerer med silikatene og den fuktighet som er til stede. Dette resulterer i et lag som er vannavstøtende, men dampgjennomtrengelig, som begrenser inntrengning av vann og dermed reduserer den interne fuktigheten i et påført element, ifølge **BD 43/03 (2003)**². Dette har stor betydning fordi tilstrekkelig fuktighet er en av de tre parametrene som må være tilstede for å fremkalle alkalireaksjoner (AAR ekspansjon) og sprekke dannelse. Idet AAR utvikler seg eller er inntruffet i betong med innvendig relativ luftfuktighet over 80 - 85 %, i henhold til **Fournier et al (2004)**³, blir reduksjon av den interne fuktigheten til verdier under disse nivåene en viktig målsetting siden det kan redusere eller undertrykke AAR induisert ekspansjon.

Mye av tilgjengelig litteratur på tetningsmidler handler om deres effektivitet for å undertrykke inntrengning av kloridioner i betong ved å gjøre overflaten hydrofobisk, og dermed begrense opptak av vann og redusere den interne fuktigheten i betongen. Det er denne andre effekten som er av størst interesse for å redusere AAR ekspansjon, selv om reduksjon av mulig inntrengning av eksterne alkalier er positivt, er det den interne uttørking av betongen som er av størst betydning.

Effektiviteten av tetningslaget bestemmes ifølge **A864-00 (2000)**⁴ av en vellykket anvendelse av det valgte materialet sammen med styrke og varighet av den molekylære bindingen mellom impregneringsmiddelet og betongen. For å sikre en vellykket anvendelse, må det påførte materialet være motstandsdyktig mot vannabsorpsjon, trenge inn i betongoverflaten til en målbar dybde, være motstandsdyktig mot UV degradering, ha langtidsstabilitet i et alkalisk miljø og tillate damptransmisjon.

Som tidligere nevnt; silaner (monomere alkyl isobutyl) og siloxaner (oligomeres alkyl alkoksi) er de mest vanlige og brukte hydrofobiske impregnanter, ikke bare for å kontrollere AAR, men også for å redusere inntrengning av vann og eksterne klorider. Publiseringen av **EN 1504-2**¹, som inkluderer to testmetoder som stammer fra **BD 43/03**², forenkler valg av alternative materialer. Noe som betyr at bredere spekter av hydrofobiske impregnanter er nå tilgjengelige, hvorav flere har blitt uavhengig testet og har passert de nye testkravene.

Calder and McKenzie (2009)⁵ går gjennom tilgjengelige impregnanter og deres ytelser for beskyttelse av motorvei strukturer grunnet klorid inntrengning ved å begrense vanninntrengning, som også virker mot AAR som tidligere nevnt. De testede produktene ble delt i to forskjellige mekanismer utifra det de som de utfører.

Den første mekanismen er hydrofobisk poreforing. Silanene reagerer med fuktighet for å danne en mellomliggende silanol og en alkohol som fordamper, en reaksjon som katalyseres av den alkaliske poreløsningen i betongen. Den kondenserer deretter til å danne et polymert silikonresin som forer overflaten og porene i betongen. Silanol reagerer med hydroksylgrupper i betongens substrat og blir kjemisk bundet til betongen og danner hydrofobiske barrierer. Derfor bør relativt ung betong med en høyalkalisk overflate oppnå bedre binding med silanol, som resulterer i forlenget beskyttelse.

Den andre mekanismen er pore-blokkering. Da er det krystallinske pore-blokkeringsmaterialer som reagerer med fuktighet for så å danne krystaller som blokkerer poresystemet på betongoverflaten. Dette er materialer av en kjemisk art som produsentene av disse stoffene er noe motvillig til å avsløre. Uten direkte informasjon om de eksakte kjemikalier involvert er det vanskelig å kommentere disse mekanismene, men i tilfelle av pore-stoppere, virker det usannsynlig at det er noen kjemisk binding til betong.

Deres tester viste at inntrengning av kloridioner ved kondens og vann ved sorpsjon ble signifikant redusert ved behandling med pore-lining impregnanter. Derimot, forutsatt at pore-blokkere gir bare svært begrenset motstand mot klorid angrep i kondensvann eksperimenter og nesten ingen motstand mot vannopptak i sorptivitet tester. Derfor er deres anbefalinger at bruk av krystallvekst pore-blokkere for beskyttelse av motorvei betongbroer, bør vurderes og ytterligere informasjon samlet, samt at godkjenningstester bør gjentas før bruk.

Grabe and Oberholster (2000)⁶ gjorde en omfattende studie av klassifikasjonssystemer og begrensede effekt av silan på alkali-reaktive betongsviller på en sørafrikansk jernbanelinje. I utgangspunktet, før de begynte med storskala silan behandling, ble flere sviller fjernet fra linjen, kuttet tvers gjennom på midten og en halvdel behandlet med silan mens den andre halvparten ble ubehandlet. En overvåkingsperiode på over tre år viste at halvdelene behandlet med silan viste svinn over perioden og noen sprekker økte i omfang grunnet svinn. Den ubehandlede halvdel derimot ekspanderte med så mye som 1,5 % i bredden av toppflaten. Etter disse resultatene ble et klassifiseringssystem utviklet, der de evaluerte svillene ble visuelt undersøkt og klassifisert avhengig av hvilken trinn av sprekkeutvikling

eller nedbrytning svillene hadde. Klassifikasjonssystemet klassifiserer sviller i 9 forskjellige klasser, der hver klasse har en forventet gjenværende levetid. Sviller med en forventet gjenværende levetid på 7-20 år ble valgt for behandling, de som hadde lengre forventet levetid enn 20 år ble ikke behandlet og de med kortere forventet gjenværende levetid enn 7 år ble planlagt å bli erstattet.

Basert på tidligere studier, ble behandlingsmetoden gjennomført slik at to dager før påføring av overflatebehandling ble forkobling fjernet fra sidene av svillene, etterfulgt av høytrykksspyling med vann. Vaskingen ble gjennomført for å sikre at forurensninger som olje og tjære ikke var tilstede når påføring foregikk, noe som hadde blitt påvist å kunne redusere litt effektiviteten av silan i form av inntrengningsdybden, men dog ikke i vesentlig grad. Hele svillen ble behandlet, bortsett fra bunnflaten. Silan (100 % isobutyltrimethoxysilane) ble så sprøytet på svillen til en fast påføringsmengde for å kontrollere mengden av silan brukt.

For å evaluere effektiviteten av silan-behandlingen, ble den relative fuktighet både i behandlet og ubehandlet sviller målt over en periode på 43 måneder. Alle svillene hadde mer eller mindre den samme relative fuktighet (75 - 80%) ved starten av evalueringsperioden, som i de behandlede svillene ble redusert til under 60%, mens i de ubehandlede svillene lå rundt et gjennomsnitt på ca. 75 %. Med det faktum at relativ fuktighet spiller en viktig rolle i prosessen med AAR, bør denne forskjellen på 15 % ha en betydelig innflytelse på å redusere effekten av ekspansjonen. Det viste seg også at behandlingen med silan har vært effektiv i å redusere nedbrytningen på grunn av AAR og har dermed bidratt til økt levetid. Målinger av dimensjonsendring av svillene for å bekrefte silan effekten var ikke vellykket på grunn av bl.a. skader på referansemål og vandalisme.

Bérubé et al. (2002 a)⁷ undersøkte effekten av forskjellige tetningsmiddel for å motvirke AAR i betong utsatt for ulike eksponeringsforhold, som enten var grunnet, eller en kombinasjon av; fukte- og tørking, frysing og tining, og saltvann. Det ble laget betongblandinger både med og uten luft innført, der blandingene ble produsert med en svært reaktive grus og ble laget både med høyt alkaliinnhold ($\text{Na}_2\text{O}_e = 1.25\%$) og lavt alkaliinnhold ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0.54\%$). Blandingene ble støpt i relativt store betongsylindere. De fem materialene som ble testet var, silan, oligosiloxane, polysiloksan, epoxy-resin og linolje. To forskjellige behandlinger ble brukt ved testing av disse materialer, en tidlig anvendelse påført 28 dager etter støping og før noen eksponering, og en senere påføring etter 1 eller 1,5 år for å fastslå effektiviteten på prøver som er hardt rammet av AAR, sammen med ubehandlede kontrollprøver. Påført mengde av alle materialene var innenfor det området som var anbefalt av produsentene. Alle prøvene ble periodisk overvåket for å måle lengde og vekt, og for noen utvalgte eksempler også intern fuktighet.

Effekten av de forskjellige materialene, for ny betong ikke påvirket av AAR, viste at silan materialet var det mest vellykkede for å redusere ekspansjon i betongsyndrene, uansett luftinnhold og eksponeringsforhold. Sylindrene forseglet med oligosiloxane og polysiloksan viste større utvidelser, men ingen sylindere påført med de tre ovennevnte materialene viste krakkeleringsriss. Epoxy-resin eller linolje var ikke så effektiv, og resin prøvene fungerte verre av disse to. En klar korrelasjon var mellom ekspansjon og masseendringer av sylindrene. Dette falt sammen med det faktum at ekspansjonen er direkte relatert til mikrosprekking, som igjen tillater opptak av fukt. Sylindere behandlet med silan eller

siloksan fikk redusert massen på mer enn 1 % i løpet av en 2 års periode (og fortsatt mistet masse etter 2 år), sammenlignet med en masseøkning på mer enn 0,5 % for ubehandlede sylindere. Dette viser effektiviteten av de silan og siloxane materialene for å redusere fuktighet opptak i sylindere utsatt for fuktige forhold.

Målinger utført etter en periode med fuktig innendørs lagring av 1 år gamle sylindere utsatt for blandet fuktige, tørr og fryse/tine betingelser, indikerte at den relative fuktigheten i utette og ekspansiv sylindere er signifikant høyere (95% RH i sentrum og 96% i nærheten av overflaten) enn i en silan forseglest sylindere (86% RH i sentrum og 81% i nærheten av overflaten). Dette antyder at interne fuktighetsbetingelser over 80 - 85% er nødvendig for AAR ekspansjon. Det er også viktig å merke seg at ytre fuktighet så lav som 65% har vært tilstrekkelig til å fremme skadelige ekspansjon, så det må sies at det er veldig stor forskjell mellom indre og ytre (eller omgivelses) fuktighet.

Effekten av de forskjellige materialene påført på betong som allerede er påvirket av AAR, viste at betydelig forverret sylindre som ble behandlet etter 1 eller 1,5 år etter utstøping begynte å miste masse (fuktighet) og trekke seg sammen umiddelbart etter anvendelsen av silan eller siloksan tetningsmidler, selv når de ble utsatt for både fukting og tørking, og fryse/tine sykluser umiddelbart etter påføringen. I tillegg ble overflate sprekkedannelse mindre tydelig, samt at massetap under tørking og masseøkning under fukting av meget mikrosprekket sylindere nådde ganske raskt verdier nærmere de tidlig behandlede og usprekkede sylindrene.

Resultater viser at når man anvender materialer tidlig på høy alkalisk betong, på sylindere som er disponibelfor AAR, da vil silaner og siloksaner kunne reduserte AAR ekspansjon til et akseptabelt nivå, basert på standardiserte ytelsestester med 38 °C og minst 95 % relativ fuktighet, i hvert fall for ikke-massiv elementer inntil ca. 255 mm i tykkelse. Det er også poengtert at et godt tetningsmiddel kan brukes med suksess på betong som er alvorlig påvirket av AAR og kan forbedre dets utseende, stoppe ekspansjon og selv produsere sammentrekninger for ikke-massive elementer. Det kan likevel forventes at for relativt tynnere betongelementer, vil slike materialer har en større effekt, med hensyn til å redusere ekspansjoner. Mens for massive betongelementer er det lite sannsynlig at et godt tetningsmiddel kan redusere ekspansjon, men det reduserer overflatesprekker ved å redusere skadelige effekter av ulike eksponeringsforhold.

Bérubé et al (2002 b)⁸ utførte en feltstudie på to ulike steder, på den langsiktig (6 år) effekt av tetningsmidler (to typer silan og to av siloksan) for å validere konklusjoner fra et laboratorium studium (Berube et al. 2002a). Tetningsmidler ble brukt på deler av midtbarrierer på motorveier som viser ulike grader av AAR nedbrytning. Barrierene ble utsatt for fukt og tørke, fryse/tine, og om vinteren utsatt for avisingsalter. Av barrierene på to undersøkte steder ble den første støpt før 1970, hvor v/s forhold er anslått til 0,47 og alvorlig oppsprekking ble påvist ved begynnelsen av studiet. Den andre barrieren ble støpt i 1982, har et anslått v/s-forhold på 0,44 og viste moderat oppsprekking.

Ved starten av studiet ble tetningsmidler brukt enten på hele seksjoner eller halv deler av barrieren med også spesielle ubehandlede barrierer valgt. Etter 3 år ble så referanse-måleknaster installert i de valgte

avsnittene for ekspansjonsmålinger. I tillegg begynte samtidig interne temperatur- og fuktighetsmålinger i en behandlet og en ubehandlet seksjon på begge stedene. Kort tid etter montering av overvåkingsmålere og annet utstyr, ble en ekstra barriere på hvert område behandlet med et av silan materialene, og for de neste tre år ble målinger gjennomført.

Kun en måned etter første applikasjon, begynte oppsprekking å være mindre tydelig på barrierer som var påført silanene, mens de andre silanene ga ingen forbedring i utseende. Samtidig ble langsikts forbedring åpenbar for siloksan tetningsmidlene.

Ved måling av intern fuktighet, var den gjennomsnittlige forskjellen i relativ fuktighet betydelig lavere for de forseglede seksjonene, rundt 12-13 % avhengig av beliggenhet. Den største forskjellen mellom steder var med hensyn til levetid effektivitet. I tilfelle av de mer alvorlig rammede barrierene, nådde silanen sin maksimale effektivitet innen de første 3 år, mens den andre typen av silanen ikke hadde nådd sin maksimale virkning på moderat påvirkede barrierer. Denne oppførsel er sannsynlig på grunn av det faktum at de mer alvorlig påvirket og dermed mer sprukne barrierer er mer gjennomtrengelige, både på grunn av nedbrytning og høyere estimert v/s-forhold. Med andre ord, jo høyere grad av nedbrytning på grunn av AAR på tidspunktet av silan påføring, desto kortere ser den perioden ut for å være av maksimal effektivitet av et godt tetningsmiddel. Lignende resultater ble funnet med hensyn til effektiviteten av det gode silan middelet når utvidelsesmålingene ble undersøkt. Spesielt angående varigheten av maksimal effektivitet direkte knyttet til graden av nedbrytning ved påføring og i tillegg at en ubehandlet barriere som ikke ble eksponert for regn oppførte seg i en svært lik måte som de som ble behandlet med god silan.

Basert på deres samlede resultater virker det som lengden av tidsperioden, hvor et godt tetningsmiddel kan undertrykke eller hindre enhver ekspansjon grunnet AAR, avhenger av hvilken type middel som er brukt og omfanget av nedbrytning ved behandlingen. De påviste at av de to silanene som ble prøvd, fungerte en utmerket bra mens den andre var ikke i nærheten god nok. Dette tyder på, i allefall i tilfelle av silan middel, bør valg av tetningsmiddel ikke utelukkende være basert på sammensetning, det må også bevises å fungere med absorpsjons- og avdampingstester. Siloksanene var effektive, men ikke så effektive som den gode silan. En velvalgt silan var effektiv i minst 6 år på alvorlig skadet betong og sannsynligvis mye lenger på mer moderat svekket betong, forutsatt at mekanisk slitasje ikke er et problem. Også at siloksan beholder sin effektivitet i minst 6 år på relativt til moderat forverret betong, men den samme effektiviteten er tvilsom i tilfelle av høyt skadelidende betongelementer.

Carter (1994)⁹ rapporterer om ulike påvirkningsfaktorer i forbindelse med penetrasjonsdybde, effekt av betong fuktighet og silan fortykning, og effekten av disse faktorene på fuktforbedring ytelse av silan midlerne. Rapporten baserer sine resultater på en testmetode hvor masseøkning etter nedsenkning i vann av behandlede terninger blir sammenlignet med ubehandlede, og for effektiv inntrenging av silan i de behandlede terninger slipes en fast masse fra terningene før videre nedsenkning.

Interessant nok er det rapportert indikasjon på at fuktforbedringsytelsen til alle de testede silan midlene avtar etter som kvaliteten og styrken av testbetongen reduseres og permeabilitet øker. Forskjellen

mellom gjennomtrengende og beleggprodukter blir tydelig når bruksmengder av midler på porøse betongterninger må økes ved forsøk på å kopiere vanlig ytelse oppnådd på normale terninger som representerer i gjennomsnittet 15-35 år gammel infrastrukturbetong. I disse tilfellene var de ikke-gjennomtrengende akryl og epoksy beleggene mer vellykket i absorpsjon reduksjon. Tilsynelatende høy permeabilitet av den porøse betongen har ikke en negativ effekt på de ikke-gjennomtrengende produkt når ekstra materiale påføres. Gjennomtrengende produkter fungerer ikke godt på lav kvalitets, høy permeable substrat. Tilsvarende motsatt ble det også funnet at silan midlene oppnådde bedre fukt forbedring ytelse og dypere penetrasjon på testterninger med lavere v/s-forhold. Som tyder på at tidlig tetting som vedlikehold eller forebyggende alternativ kan være kostnadseffektiv på antatte reaktive betongelementer.

En annen del av denne studien undersøker effektiv dybde av tetningsmidler og effekt av silan konsentrasjon, siden noen produkter som har utmerket penetrasjon er svært dårlig på reduseringsabsorpsjon, og det faktum at silanene selges i forskjellige konsentrasjoner. Begrepet effektiv inntrengningsdybde som en måling på penetrasjon kan defineres som gjennomsnittlig dybde hvor fukt forbedring ytelse, som målt ved nedsenkning, er større enn et minimum akseptabelt nivå. Dette kan måles ved å plote resultatene av en serie med overflateslitasje av fast masse og nedsenkning som videreføres til minstekravet akseptabelt nivå ikke lenger er oppnådd. I tillegg viste studien at betydelig forbedring i effektiv inntrengningsdybde av tetningsmiddel oppnås med høyere konsentrasjon av den anvendte silan, som bør korreleres med en mye lengre levetid for den behandlede betongen. Siden vanlige feilmekanismer for tetningsmidlene er UV degradering og overflateslitasje, er svikt effekten redusert med forbedret inntrengning.

Forholdet mellom forbedret penetrasjon i betong med lavere v/s-forhold blir mer logisk siden silan midlene ikke er pore-tilstoppende material der inntrengningsdybde hemmes av de mindre porer i lav v/s betong. Spesielt rundt størrelsesforholdet mellom silan molekyler og permeabelt hullrom i betong, er silan molekyler omtrent en tusendel av størrelsen av gjennomsnittlig kapillær porediameter. En annen faktor i den forbedrede effektive dybde er den kjemiske kompatibilitet mellom silan og betong. I betong med lavere v/s-forhold kan en redusert volum av porer enkelt redusere den innvendige overflate som er beleggbar, som dermed tillater ikke-reagerte silan til å trenge dypere.

I **A864-00 (2000)**⁴ sin kapittel om utviklingshemning og reduksjon, blir de gjennomtrengende midlere diskutert. De største egenskapene til belegg eller gjennomtrengende tetningsmidler nevnt tidligere er endret utifra denne referansen.

Mange betong fukt forbedrerer bygger på silisium forbindelser, inkludert silikater, siloksaner, silaner og silikoner. Det er rapportert at siloksaner og silaner medfører forbedringer, og er vannavstøtende ved kjemisk binding av en vann-avstøtende molekyl til overflateporene i betongen. Ytelsen er delvis knyttet til inntrengningsdybden og holdbarhet er direkte relatert til dybde. Det innebærer også at inntrengningsdybden er direkte relatert til permeabiliteten av middelet som er påført betongen. Og at kjemiske midlene ikke har hatt et bredt anvendelsesområde for å redusere AAR i strukturer og hvert bruk bør være nøye utformet. De kan forsinke reaksjoner, men bør ikke forventes å gi langvarig

beskyttelse, og gjentatte påføringer bør vurderes innen flere år. I tillegg siden strukturell kvalitetsbetong har lav permeabilitet, er det meste av fuktbevegelsen innenfor makro-og mikrosprekker. Sprekker er vanligvis det første visuelle tegn på AAR i en struktur idet de er utgivelsen av stress fremkallende ekspansjon. Man må være forsiktige, da midlene kanskje ikke er i stand til å være en bro over større sprekker, og noen form av sprekkinjeksjon kan være nødvendig.

Fuktbevegelser innenfor betong som er behandlet eller beleggpåført må vurderes. Siden belegget er utformet for å fungere som fuktsperre, må de også ha evne til å puste og tillate vanndampsoverføring i betong. Hvis ikke kan tilstrekkelig trykk bli utviklet for å løse opp belegget eller øke metning av betong bak belegget, som fører til økt AAR induisert skade.

Hoppe (1992)¹⁰ rapporterte om en utvelgelsesprosess for påføring og overvåking av et belegg system som brukes på en buebro. Siden innledende testing viste at ekspansjonen ikke var ferdig var den mest åpenbare måten å stoppe AAR ved å redusere fuktighetsinnholdet av betongen. Fullstendig tørking, sprekkinjeksjoner og ugjennomtrengelig belegg, eller ventilert kledning, er måter å oppnå dette, men ikke praktiske eller mulige å få til på en bro. Det betyr at for en elimineringsprosess så presenterer et effektivt flytende overflatepåført tetningsmiddel, belegg eller inntrengningsmateriale, en praktisk og kostnadseffektiv metode for å oppnå fuktighets kontroll.

Ved vurdering av tetningsmidler, ble deres effektivitet bestemt ved å fastslå om de kunne redusere eller hindre klorid-holdig vann i betong under testing, og redusere absorpsjonen av vann i betong. Resultatene var at silan viste utmerket ytelse gjennom alle tester, mens siloksan ikke ga gode resultater. Videre ble silanen påvist å være et ekte inntrengningsmateriale som produserer ingen fargeendring eller overflatestruktur effekter, og det produserte en ikke-fuktbar betongoverflate til en dybde av ca 3 mm. Etter en ekstra gjennomgang av tilgjengelige silane produkter, ble alkylalkoxyailane (100% aktiv komponent innhold og løsemiddelfri) spesifisert for prosjektet.

Silaner er hybridmolekyler med organiske og uorganiske deler. I nærvær av fuktighet, og spesielt av alkaliske eller syre-reagerende stoffer, blir alkoksylgruppene hydrolysert og alkohol blir separert. Silanolene som blir dannet reagerer spontant med tilstøtende molekyler og med uorganiske grenselag. På denne måten kan de sterkt fuktavvisende høyere alkylgrupper bli knyttet til grenselag av kapillærer og porer av mineralske bygningsmaterialer via siloksan forbindelser. Som et resultat, er grensesnittspenningen økt betydelig mot vann, og vannmolekylene ikke lenger tiltrukket, men frastøtt. De kapillære kreftene fører ikke lenger til at vann blir absorbert, oppløselige forurensninger og salter ikke lenger blir transportert inn eller ut av underlaget. Vanndamp, derimot, kan fritt bevege seg inn i eller ut av underlaget. Størrelsen og formen på alkyl-gruppene bestemmer styrken og motstanden i impregneringen. Deres riktige valg sikrer beskyttelse av siloksan forbindelser med hensyn til basen. Alkylsilanene reagerer med fuktighet tilstede i kapillærene og på grenselagene av porene for å produsere vann-avstøtende grensesnitt.

På grunn av sin uovertrufne inntrengningsdybde av alkylsilanene, er den hydrofobiske sonen ikke påvirket av UV-stråling. Dette sikrer lang levetid. Størrelsen på silan molekyler er kun 0,5 til 1 nm,

omtrent den samme som vannmolekyler. Dette er grunnen til at selv de minste hulrom i svært tette bygningsmaterialer kan nås og bli beskyttet. Høykvalitets betong har generelt lav porøsitet, og disse porene er ofte delvis fylte med vann. For å sikre høy inntrengningsdybde i slike tilfeller er bruk av løsemiddelfri alkylsilaner anbefalt. Porene som kan nås på impregnering blir dermed fylte med uforynnet aktiv komponent.

Hensikten med et hydrofobisk impregneringssystem er å redusere fuktighetsinnholdet i betong utsatt for fukt. For å fastslå om dette er oppnådd, er det nødvendig å sammenligne fuktighetsinnholdet før og etter behandlingen. I laboratoriet kan økning eller tap av fuktighet for små testelementer være nøyaktig bestemt ved veiing av prøvene. I reelle konstruksjoner imidlertid, så presenterer bestemmelse av fuktighetsendringer et grunnleggende problem og indirekte metoder, f.eks. indirekte målinger av fuktighetsinnhold eller målinger av dimensjonale endringer som skyldes endringer i fuktighetsinnhold blir da mer nyttige.

Miyagawa et al (1996)¹¹ så på effekten av hvordan den molekylære størrelsen (evaluert gjennom molekylvekt) påvirket effektiviteten av silaner. De to viktigste egenskapene til silan er evnen til å tillate litt væskefasevann å trenge inn i betongen og tillate vanndamp i betongen å komme ut. Her er de kvantifisert som "vanndamp permeabilitet" (WVP) og "flytende vann permeabilitet" (WLP), og det er påpekt at økt hydrofobisk ytelse av en silan tilsvarer et større WVP/WLP forhold. Resultatene indikerte at vanndamp permeabiliteten i silaner med mindre molekylvekt var generelt høyere enn for større molekyler og at silaner med større molekylvekt hadde bedre motstand mot væskeinntrengning av vann. Av de ni forskjellige molekylvektene testet, alle mellom 120 og 416, påviste de større å være beste utøverne, hadde altså det største WVP/WLP forholdet. De fire største (molekylvekter 234, 262, 374 og 416) ble valgt ut for videre testing på betong prisme, under forskjellige forhold. Silanen med molekylvekt 262 ble betraktet til å være den mest effektive. Ved testing av silan med molekylvekt 262 på kvasi reell størrelses eksempler, fungerte den effektivt mot ekspansjon av betong forårsaket av AAR, og ble vist å redusere den interne relative fuktigheten av betongen ned til 10 - 20 cm.

Kubo et al (2000)¹² studerte den langsiktige effekten av silan (molekylvekt på 262) på kvasi reell størrelses eksempler ved utendørs eksponering, og den dybden av påvirkning silanen har over tid på fuktighetsinnholdet i betongelementer. Sammen med overvåking av fuktighet, ble ekspansjon også overvåket. Etter 1 års eksponering, viste silan behandlede prøven en stor reduksjon i ekspansjon i forhold til den ubehandlede prøven. Det andre års utvidelse av silan behandlede prøven ble større enn den første års. Dette tyder på at den hydrofobiske effekten av silan ble motvirket av utviklingen av sprekker forårsaket av AAR, og ble synlig rundt uke 40 i det første året.

Den relative fuktigheten ble målt etter 160 dager og etter 2 år. Etter 160 dager ble silan observert å redusere den relative fuktighet ned til ca 20 cm i både reaktive og ikke-reaktive betongelementer. Mens etter to år i det ikke-reaktive elementet ble reduksjonen målt ned til ca 40 cm, men i de reaktive elementene ble ingen reduksjon målt. På samme måte som ekspansjon, er sprekke dannelse, forårsaket

av AAR, årsaken for den høyere relative fuktighet i den reaktive prøven. Dette resulterer i konklusjonen at silan kan og vil redusere ekspansjon forårsaket av AAR ved å redusere den interne fuktigheten av et betong element, men effektiviteten er redusert dersom betongen er oppsprukket.

Niina et al (2012)¹³ studerte effektiviteten og dybden på effekten som silan-penetrant har når det er påført på kvasi reell størrelses element, som var forhånds-ekspandert (0,15%) under akselererte betingelser før påføring og utendørs regn-eksponering. To referanser ble anvendt, ubehandlet og regn-påvirket, og ubehandlet og skjermet fra regn. Etter en kontinuerlig eksponering for over 19 måneder, der den interne relative fuktighet og ekspansjonen ble overvåket, viste den silan behandlede og regn-eksponerte prøven tendenser i relativ fuktighet som var svært like dem som finnes i den ubehandlede og skjermede prøven. Den ubehandlede og eksponerte viste tilsvarende relativ fuktighetsendring under 200 mm i forhold til skjermede og behandlede prøven, med andre ord, så nådde silan effektiviteten i fuktstyring en dybde på ca. 200 mm. I tillegg så viste den silan behandlede prøven en reduksjon i relativ fuktighet på ca. 13 % i forhold til den ubehandlede og eksponerte prøven.

Med hensyn til ekspansjoner, var de generelle tendenser i samsvar med de målingene på relativ fuktighet og masseendringsforholdet. Forskjellen i endring av ekspansjonsforhold mellom silan behandlede regnekspnerte prøver og ubehandlede regn-eksponerte prøver kan anses å indikere en ekspansjonskontroll effekt av silan, og spekteret av effektivitet i ekspansjonskontroll nådde ca. 250 mm.

Spekteret av effektiviteten av silan i fuktighetsreduksjon ble funnet å være større enn en standard dekk tykkelse for normal veibrodekker. Derfor kan silanpåføring anses å forebygge overflate-ekspansjon i konstruksjoner eksponerte for regn og forverring av indre miljø korroderende på stål, og dermed kontrollere utviklingen av nedbrytning av det totale konstruksjonssystemet.

Drimalas et al (2012)¹⁴ rapporterer om ulike metoder for utbedringstiltak som brukes på brostøyer og motorvei midtsperre, blant dem bruk av silan. Dette omfatter både overflater sandblåste av all maling før påføring, og overflater med opprinnelig maling. De rapporterer at silan applikasjoner var generelt gunstige for å redusere ekspansjon, sammenlignet med kontrollseksjoner på begge test steder, med unntak for de som hadde overflaten sandblåst før silanpåføringen. I både søyler og midtsperre med overflatepåføring av silan, ble dette materialet påvist å være det beste av de produkter/behandlinger som ble brukt, ved å bremse ned og i noen tilfeller kontrollere ekspansjon. Imidlertid bør det bemerkes at sandblåsing av overflaten for å fjerne eventuell maling før silanpåføring er ikke så gunstig som påføring direkte på overflaten.

Fournier et al (2010)¹⁵ rapporterer om diagnose, prognose og reduksjon av AAR i infrastruktur konstruksjoner. I deres oversikt om effekter i utbedringstiltak av tetningsmidler, påpekes det i henhold til flere andre, at nøkkelen til en effektiv behandling er evnen til å senke den indre relative fuktigheten i betongelement til under 80 %, hvor AAR induisert ekspansjon er betydelig redusert eller undertrykket.

De oppgir at siloksaner og silaner har en tendens til å være mest egnet og er derfor de mest brukte som tiltak for ikke bare AAR, men også for å bidra til å redusere inntrengning av vann og eksterne klorider. I de senere årene har silaner blitt den viktigste og mest brukte produktene for disse formålene. Det finnes en rekke av varierende silanprodukter tilgjengelige, hvor hovedforskjellene er konsentrasjonen av silan i den spesifikke formulering (som varierer fra 20 % til nær 100 %) og hvilken type av bærer med hvilken silan kombineres (enten vannbasert eller løsemiddelbasert). Silaner påføres nesten alltid på overflaten, ved en dekningsgrad 0,05 til 0,4 l/m² og dybder på penetrasjon typisk målt til å være mindre enn 5 eller 6 mm. Dypere penetrasjon av silaner er ønskelig da dette øker levetiden på behandlingen siden tetningsmiddelet til stede på eller nær overflaten kan fjernes med tid på grunn av overflateslitasje (f.eks. brudekker) eller ved UV-stråling.

Produsenter og distributører av silaner eller lignende gjennomtrengende tetningsmidler anbefaler generelt at produktene ikke brukes når betongoverflaten er fuktig/våt (f.eks. etter nedbør), og noen produsenter angir maksimal overflatefuktighetsinnhold av betong, målt ved kommersielt tilgjengelige fuktighetsmålere. En enkel anvendelse av et silanbasert produkt er generelt ikke antatt å være en "permanent løsning," idet effektiviteten har en tendens å forsvinne med tiden, spesielt på grunn av slitasje og UV effekter. Derfor er det generelt antatt at gjen-påføringer av silaner utføres hvert 5. år eller når det er forsvarlig. Gjen-påføringer av silan på en overflate som tidligere er behandlet med silan, resulterer dypere gjennomføringer og forbedret evne til å redusere interne fuktighet. Ved gjenføring av silaner eller andre materialer på betong, bør produsentens anbefalinger følges for å sikre at de anvendes riktig fordi det har vært noen bekymringer reist i feltet på effekten av gjen-påføringer av silaner eller lignende produkter (f.eks vann-vs . løsemiddelbasert, etc.).

Silaner kan være ganske effektive i felten for å redusere AAR-indusert ekspansjon, men det finnes sikkert begrensninger. For vegdekker, grunnplater, vingvegger, eller andre bruksområder der fuktighet er tilgjengelig fra undersiden, vil silaner ikke være like effektive idet deres fordeler kun realiseres fra den behandlede overflaten. Også i bruksområder der betong vil være fullt neddykket eller ikke har mulighet til å tørke, vil silaner sannsynligvis ikke fungere godt på grunn av at vætting og tørking sykluser er nødvendige for å redusere den interne betongfuktighet. I tillegg bør det bemerkes at anvendelsen av silaner ikke vil være effektiv i betong med store sprekkebredder. Til disse større sprekker bør fleksible tetningslister eller lignende produkter brukes til å forsegle sprekken. En nylig utvikling har vært å benytte "high-build" maling eller elastiske belegg, som virker lovende i å brue større sprekker og unngå behovet for tetningslister for individuelle sprekker. Behov for tetning av større sprekker blir kritisk når armert betong er utsatt for eksterne klorider eller i områder med sykluser av frysing og tining.

2.2 Parametre som påvirker overflatebehandling av betong med hydrofobisk impregnering.

Mange andre artikler, rapporter og publikasjoner har nevnt og rapportert om testing, bruk og nytte av impregnanter, men de som har blitt nevnt her ovenfor dekker det meste av de problemene som ofte oppstår i bruk og testing av hydrofobe impregnanter, for eksempel metoder for valg av materialer som skal brukes og påfølgende overvåking av den behandlede konstruksjonen. Noen av henvisningene handlede om mer enn en type av tetningsmasse, men de fleste om ikke alle var enige om at bruken av silan var vanligvis den mest effektive i å redusere den indre relative fuktigheten av betongelementer.

Ifølge de fleste, om ikke alle referanser som er gjennomgått (Berube 2002a⁷, Berube 2002b⁸, A864-00 2000⁴, Hoppe 1992¹⁰, Fournier 2010¹⁵), der det er gjort en sammenligning mellom mer enn kun en type tetningsmiddel, har silane midlene vist seg å være de mest effektive i utbedring av AAR skadet betong, både for å redusere interne fuktighet og redusere eller stoppe ekspansjon, selv også å unngå svinn. I tillegg til silan materiale, har også siloksan blitt ganske omfattende studert og sammenlignet med silan har det vist seg effektivt, men sjelden i samme grad som silan.

Den opprinnelige kvaliteten av betongen, sammen med omfanget av AAR induisert skade, har en innflytelse på hvor godt anvendt et tetningsmiddel fungerer. Ifølge Carter (1994)⁹, vil effekten av silan midlere bli redusert ved lavere betong kvalitet, det vil si at lav kvalitet og meget permeabel betong er ikke det ideelle grunnlaget for hydrofobisk impregnering, og i disse tilfellene kan belegg være mer egnet for forbedring. Tilsvarende har omfanget av sprekke dannelse ved påføring en betydning for tetningsmiddelet som blir brukt. Da gjelder det både at for mer sprekker som finnes desto mindre tid er middelet på sin optimale effektivitet, Berube (2002b)⁸ og at i tilfelle av store sprekkebredder, Fournier (2010)¹⁵, kan middelet ikke være i stand til å skape en hydrofob overflate som dekker sprekken, noe som gjør at en annen løsning som en fleksibel tetningslist over sprekken også er nødvendig.

Størrelsen på et element har betydning for hvor godt et tetningsmiddel fungerer, og påvirkningen er direkte relatert til hvor dyp påvirkningen av middelet er. Ifølge Bérubé (2002a)⁷ ble AAR induisert ekspansjon sterkt redusert i betongelementer på opp til 255 mm i tykkelse, noe som resulterer i at en sannsynlig minimum dybde av innflytelse bør være større enn halvparten av dette siden påføringen var rundt prøven. I Niina (2012)¹³ viser silan effektivitet i fuktstyring og ekspansjon kontroll seg for å være henholdsvis 200 mm og 250 mm, med begge dybder større enn standard dekningsdybder selv i massive infrastruktur, og kan derfor betraktes å hindre overflate utvidelse og sprekke dannelse i noen grad og dermed kontrollere utviklingen av korrosjon. Ytterligere observerte Kubo (2000)¹² en nedgang i fuktighet ned til 200 mm etter et halvt år og ned til 400 mm etter to år i en ikke-reaktiv betong, mens den reaktive betongen ikke viste videre forbedringer, noe som peker på viktigheten av tidspunktet for påføring av et tetningsmiddel for å redusere ekspansjon og sprekke dannelse.

Som nevnt ovenfor, og i Berube (2002b)⁸ og Fournier (2010)¹⁵, vil sprekker i betongelementet før påføring redusere effektiviteten og varigheten av effektivitet. Silan eller andre tetningsmidler brukes likevel sjelden for AAR utbedring før noen signifikant ekspansjon eller sprekke dannelse har blitt påvist. I mange av studiene som er nevnt, ble forsøkene utført på enten før-ekspanderte kontroll

laboratorieprøver eller reelle reagerte betongelementer. I Niina (2012)¹³ sine prøver som ble forhånds-ekspandert med 0,15 % ble overflatesvinn påvist nesten umiddelbart etter silan påføringen, og i Grabe and Oberholster (2000)⁶ viste halvdelene som ble behandlet svinn og hadde noe sprekkeutvidelse grunnet svinn. Ifølge Berube (2002a)⁷ trakk betongsylindre, som hadde blitt alvorlig nedbrutt seg sammen umiddelbart etter påføring av både silan og siloksan. Ifølge Berube (2002b)⁸ begynte krakeleringssiss å bli mindre tydelig en måned etter påføring av silan på utendørs betongelementer som var skadet grunnet AAR.

Dybden som et penetrerende tetningsmiddel eller hydrofobisk impregneringsmiddel penetrerer betongoverflaten er ikke nødvendigvis i forhold til hvor effektiv den er til å redusere fuktighet. En tilstrekkelig dybde av penetrering er likevel nødvendig for forlenget varighet siden tetningsmidlene er UV nedbrytbare og overflate slitasje vil fjerne dem sammen med overflatematerialet. Carter (1994)⁹ rapporterer at to viktige faktorer i å øke inntrengningsdybde er forhøyet konsentrasjon av det middelet og lavere v/s-forhold av betongen (jo lavere overflateareal av kapillærer, desto lengere inn går et middel). Hoppe (1992)¹⁰ rapporter om et silan produkt som er penetrasjonsmålt til ca. 3 mm, forenklet målt som lengden av den ikke-fuktige overflaten ned siden av en kjerne. Fournier (2010)¹⁵ rapporterer målt penetrasjonsdybde av silan til å være vanligvis mindre enn 5 til 6 mm, uavhengig av konsentrasjon, bærer eller dekningsgrad. Når penetrasjon rekker denne dybden blir den hydrofobiske sonen ikke truffet av UV-stråling, og for å nå slik penetrasjon anbefales løsningsmiddel og uforyttnet silan. Ytterligere, Grabe and Oberholster (2000)⁶ merket seg at vasking av en overflate før påføring, for fjerning av forurensning som olje og tjære, øker penetrasjonsdybden, men ikke i betydelig grad. Likevel bør man sørge for å bli kvitt av større forurensninger og smuss før påføring.

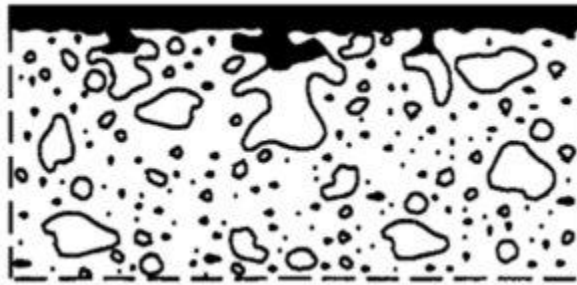
Som det har blitt påstått tidligere, da er fuktinnhold i betong en av de tre viktigste faktorene som styrer AAR, og bruk av tetningsmidler er en av de måtene man har for å redusere fuktighet. Den nøyaktige relative fuktighet for at AAR skal kunne finne sted er noe usikker, men det er grunn til å anta at under 80 % relativ fuktighet stopper AAR i stor grad opp. I et ekspandert og oppsprukket element som blir berørt av AAR er relativ fuktighet forventet å være ganske høy, 95 % eller mer, og dette er en forventet verdi av relativ fuktighet ved påføring av tetningsmiddel, selv om overflaten må være tørr ved påføring. Både Grabe og Oberholster (2000)⁶ og Bérubé (2002)⁸ rapporterer at den relative fuktigheten reduseres med en omtrent 15 % i behandlede prøver sammenlignet med ubehandlede, henholdsvis over perioder på tre og et halvt år og ett år.

Påføring av et tetningsmiddel, silan eller annen type, på et betongelement påvirket av AAR er et positivt skritt, men ikke en avsluttende løsning. Effektivitetstiden og den anbefalte tiden til gjentatt påføring avhenger av type, utstrekning av nedbrytning og referanser, Den sikreste måten å vite holdbarheten av et tetningsmiddel er å overvåke ekspansjon på noen få utvalgte og representative områder før påføring. Basert på disse målingene kan effektivitet og holdbarhet overvåkes og vil gi informasjon for å avgjøre om eller når gjentatt påføring skal skje. Ved gjenpåføring av et tetningsmiddel er det nødvendig å bruke et middel som er minst like kompatibel med det brukt tidligere, eller bruke det samme om igjen.

3 Overflatebehandling med belegg (jfr definisjon i NS-EN 1504-2)

3.1 Belegg på betongelementer

EN 1504-2:20041 refererer til et belegg som en behandling for å produsere et sammenhengende beskyttende lag på overflaten av betong. En typisk tykkelse er på 0,1 mm til 5,0 mm, mens spesielle anvendelser kan også kreve en tykkelse større enn 5 mm. Bindemidler kan f.eks. være organiske polymerer, organiske polymerer med sement som fyllstoff eller hydraulisk sement modifisert med polymerdispersjon.



Figur 2: Skjematisk tegning av et typisk belegg. [EN 1504-2:2004]¹

I **BA 85/04 (2004)**¹⁶ som dekker bruk av belegg på nye og eksisterende betongkonstruksjoner på motorvei-konstruksjoner, sies at bruk av maling eller andre anvendte belegg for dekning av betongflater bør bare tillates i særskilte tilfeller, og støttes av teknisk begrunnelse. En glatt tett betongoverflate med kompatibel dekke over stålarmring forbedrer holdbarhet uten behov for å bruke belegg, noe annet enn riktig bruk av poreforende impregneringsmiddel i aggressive miljøer. For spesifisering av et belegg for betong vil nøkkelt betraktninger være om hvor egnet det foreslåtte materialet er for anvendelse på betong, holdbarhet, effekt på ytelsen til betong, egenskapene til belegget, utseende og vedlikehold, for å nevne noen få. I tillegg er det viktig å sikre at de fysiske, kjemiske og elektrokjemiske betingelsene er passende for underlagsmaterialet og miljøforholdene for beleggpåføring.

Mange belegg gir en form for fysiske barriere, som hindrer inntrenging av klorider og karbondioksyd, og tillater betongen å puste til en viss grad, noe som reduserer dens fuktighetsinnhold. De viktigste kriteriene for belegg kan oppsummeres som følgende: kjemisk motstandsdyktighet, motstand mot diffusjon, værbestandighet, motstand mot ekspansive krefter, estetisk utseende, brodannende evne over sprekker, adhesjonsstyrke og slitestyrke.

Fournier et al (2010)¹⁵ rapporterer om diagnose, prognose og reduksjon av AAR i infrastrukturkonstruksjoner, som nevnt ovenfor. Selv om de hovedsakelig fokuserer på tetningsmidler, diskuterer de også hvor begrenset disse tetningsmidlene er med hensyn på brede sprekker og for å kunne danne bro over eller tette store sprekker bør det brukes andre fleksible tetningsmaterialer eller lignende produkter. Det har vært den siste utviklingen, med blant annet bruk av "high-build" maling eller elastiske belegg, som virker lovende i å dekke større sprekker og unngå behovet for tetningslister for individuelle sprekker. Behov for tetning av større sprekker blir kritisk når armert betong er utsatt for eksterne klorider eller i områder med sykluser av frysing og tining.

Godard et al (1996)¹⁷ studerte de nødvendige krav til vanntettende belegg sammen med tester av effektivitet i laboratoriet før valg av et material for prøvepåføring på en bro. For å være effektiv mot AAR burde et belegg oppfylle følgende:

- Være ugjennomtrengelig for vann og om nødvendig også for vanndamp.
- Ha motstand mot progressivoppsprekking av underlaget i den første perioden etter påføring.
- Ha holdbarhet, ikke bare for å tåle avskalling eller blemmer, også opprettholde mekaniske egenskaper som elastisitet og motstå utvidelse av sprekker.
- Ha motstand mot UV-stråling.
- Ha tilstrekkelig binding til underlaget.

Effektivitetstestene som ble brukt i studien var en modifikasjon av betongprismetester for AAR ved 38°C. De første prøvene ble etter utstøping lagret ved 20 °C og 100 % relativ fuktighet i to måneder, og deretter ved 20 °C og 50 % relativ fuktighet i tre måneder før anvendelse av ulike belegg. Etter en ukes tørketid før påføring av belegget ble prismene lagret i 38 °C og 100 % relativ fuktighet og ekspansjon og vektøkning målt månedlig.

Disse testene viste at forskjellige polymerer, kopolymerer og elastomerer, sammen med silan hadde en positiv effekt sammenlignet med ikke-behandlet betong, ved at deres ekspansjon var mindre. Mens malinger basert på epoksy, polyuretan, akrylkopolymer emulsjon og silikon viste en større ekspansjon enn ubehandlet betong, selv om deres vektøkning var mindre. Disse resultatene bekrefter at det er av interesse for begrensnig av AAR å redusere inntrengning av fukt i betong. Selv om det ikke foreligger noen forklaring på den dårlige effekten av malingstestene, forsterker det behovet for å teste materialer før påføring. En liten innledende investering kan redusere fremtidige utgifter med materiale som ikke virker eller som må fjernes, og det må påføres et annet alternativt materiale.

Broen som ble valgt ble fullstendig behandlet med en akryl resin-sement og overvåket i en fire års periode. Målingene viste ingen global ekspansjon av konstruksjonen. Selv om noen sprekker med saltutslag hadde dukket opp på belegget, kan elastiske belegg som det som ble brukt skjule utvikling av sprekker på grunn av deres elastisitet.

Tanikawa et al (1996)¹⁸ studerte effekten av overflatebelegg av akrylgummi på betongprismer på ulike tilstander av degradering på grunn av AAR og for ulike eksponeringer. Når påført på betongflater før en eventuell ekspansjon skjer, kan belegget som ble brukt i studien redusere AAR ekspansjon svært betydelig, med 50 % til 90 % avhengig av miljø og eksponeringsmodus, jo mer aggressivt miljø (et vått og kloridrikt miljø på 38°C) desto høyere reduksjon. Når påført på betong der reaksjon hadde startet, ble ekspansjon redusert med 10 % til 75 % avhengig av nivået av reaksjon og eksponering og igjen ble den største reduksjonen i det mest aggressive miljøet. Dette påviser at bruken av det valgte akrylgummibelegg kan være svært effektiv for å redusere betydelig den skadelige AAR ekspansjonen til akseptable nivåer av nedbrytning, hvis det anvendes før de ekspansive reaksjonene begynner.

De konkluderer også med at i reelle konstruksjoner som allerede har blitt oppsprukket på grunn av AAR og gjennomgår ytterligere ekspansjon, også utsatt for varme, svært høy fuktighet og kloridladet miljøer hvor klorider og fuktighet kan trenge gjennom betongen gjennom sprekker, kan overflatebehandlinger ikke forventes å motvirke fullstendig påvirkning av alkalier og vann som allerede er fanget inne i betongen, selv om de kan redusere ekspansjonen. Under slike forhold betraktes det ikke som fornuftig å stole på et enkel beskyttende system alene som kun er delvis produktivt. Totalt beskyttende strategisystem må utvikles dersom materialnedbrytning og strukturell ustabilitet som oppstår fra slike interne nedbrytningsmekanismer skal unngås. En slik strategi som innebærer et effektivt beskyttende beleggssystem kan gjøre store bidrag til å forlenge levetiden på AAR berørte konstruksjoner.

Wang et al (1996)¹⁹ vurderte ulike faktorer som påvirker effektiviteten av belegg for å kontrollere ekspansjon. Faktorene som ble vurdert i deres studie var, beleggtykkelse, opprinnelige ekspansjon før belegget ble påført, eksponeringsforhold, volum/overflate forhold og opprinnelig fuktighet tilstand. Resultatene viste at økt tykkelse reduserer ytterligere ekspansjon (opp til 150% av produsentens anbefalinger). Tidligere påføringer av belegg reduserer ekspansjon bedre enn senere påføringer. Det vil si dersom AAR er påvist, bør tidligere behandling av betong, produsere bedre resultater i form av sprekkekontroll. Geometrien av et betongelement påvirker effektiviteten ved at desto mindre tverrsnittet jo mer sannsynlig at AAR ekspansjonen kan kontrolleres ved å dekke, og at for større tverrsnitt av betongelementer, vil det være mer vanskelig å kontrollere ekspansjonen. Det ble også poengtert at opprinnelige fuktighets tilstand av betongen før påføring viste seg å ha liten innflytelse på den endelige ekspansjon. De konkluderte med at, bortsett fra eksponeringsforhold som har betydelig innflytelse, men bestemt av plassering, er de to viktigste faktorene som styrer ytterligere ekspansjon; dekningsgraden og volum/overflate forholdet. Og mens forholdet er innebygd i konstruksjonens utforming, og kan ikke endres, kan dekningsgraden spesifiseres optimalt.

Swamy et al (1992)²⁰ så på bruken av akryl gummibelegg for å kontrollere AAR ekspansjon og for å forhindre inntrengning av aggressive midler som vann og klorid under akselererte forhold som inkluderte saltsprut og tørking, høy fuktighet og temperatur og frysing og tining. Deres funn var at akryl belegget som ble evaluert var i stand til å forbli inntakt under alle eksponeringsforhold uten å vise noen tegn på sprekker eller andre synlige skader. Selvom det bremset AAR ned under de mest ugunstige

forhold, og viste ingen tegn til vannabsorpsjon, var betongen istand til å fortsette å ekspandere på grunn av at det opprinnelige interne fuktighetsinnholdet var tilstrekkelig og kunne ikke slippe ut i gjennom belegget. Feste for belegget til AAR betong var ikke noe problem for akrylbelegg.

Daidai et al (2012)²¹ så på den langsiktige effekten av belegg på brukonstruksjoner bygget fra 60-tallet til 70-tallet som hadde skader på grunn AAR. Omtrentlig 20 år etter bygging, ble omfattende reparasjonsarbeider utført på konstruksjonene, men i dag har alvorlig skader igjen oppstått grunnet AAR, etter at reparasjonen ble avsluttet, med vesentlig påvirkning på bæreevnen av de strukturelle elementene. Under riving av disse konstruksjonene ble det oppdaget at selve betongen var sterkt skadet og veldig sprø. Det tidligere reparasjonsarbeidet brukte materialer bestående hovedsakelig av belegg av mykt epoksyharpiks istand til å penetrere sprekker. Forverringen er forklart med at etter sprekke innsprøytning og overflatebehandling, har resterende vann ble fanget inne i betongelementene, som muliggjør ytterligere ekspansjon på grunn av AAR. I tillegg penetrerer avløpsvann og tinesalt konstruksjonen fra oversiden, gjennom ekspansjonsfuger som medførte ytterligere akselerasjon av AAR. I tillegg ble det senere observert at reparerte deler var mer skadet enn ureparerte, noe som indikerer at feil valg av reparasjon materialer kan faktisk fremme AAR utviklingen.

De konkluderte at det er en stor sannsynlighet for at overflatebelegg kan fange vann inne i betong for lange perioder, som muliggjør en stabil AAR prosess etter at reparasjonen er ferdig.

3.2 Parametere som påvirker belegg av betongelementer

I referansene ovenfor, er det klart at med riktig valg av materiale(er) kan belegg være ganske gunstig i å utbedre AAR berørte konstruksjoner, men i noen tilfeller kan belegg være skadelig i det lange løp dersom man ikke planlegger riktig vedrørende utforming av utbedringstiltak.

En av grunnene til å bruke belegg er det faktum, at ikke bare er det viktig å stoppe videreutvikling av AAR men også å lukke sprekke i betongen forårsaket av AAR ekspansjon, som gjør det mer utsatt for andre typer eksponering. Det vil si at belegg, i tillegg til å bremse AAR ekspansjon, dersom de er valgt riktig, er ment å takle de sekundære effekter som sprekke dannelse forårsaket av AAR utvidelser har på betongholdbarheten.

En av de viktigste faktorene i å velge belegg over andre kompenserte metoder er utseendet av elementet etter påføring, og den mekaniske evne av belegget til å motstå vær, slitasje eller ekspansjon. Når sprekke dannelse ikke er for omfattende, kan et belegg broe en sprekke og gi et sprukket element utseendet til et usprukket betong, i motsetning til tetningsmidler som kun etterlater et hydrofob og hovedsakelig usynlig lag på overflaten. Nødvendige forholdsregler må tas, da belegg er for det meste ugjennomtrengelige for vann, de har også svært lav dampgjennomtrengelighet og derfor, dersom det er nok intern fuktighet til stede på tidspunktet for påføringen, kan reaksjonen fortsette, selv om ikke alle kilder er enige om denne oppfatningen. Når en bestemmer seg for et belegg for å utbedre AAR skade, bør et tilstrekkelig dampgjennomtrengelig belegg velges og gjennomføre overvåking av for eksempel fuktighet og ekspansjon målinger. Generelt sett reduserer ikke belegg ekspansjon i samme grad som tetningsmidler har blitt rapporteres til å gjøre, så som nevnt trenger valget av et belegg i forkant av tetningsmasse ekstra begrunnelse og bør vurderes bare når en tetningsmasse har vært ansett utilstrekkelig for en eller annen grunn.

Til slutt skal det bemerkes at antall referanser knyttet til AAR begrenning med belegg har blitt redusert de siste årene, muligens fordi det nå er ansett at belegg ikke fungerer så godt på å tørke ut betong som tetningsmidler.

4 Skjerming av betongoverflaten ved innkledning og andre tiltak

Det finnes andre tiltak som kan benyttes for å forhindre AAR, og to kategorier vil bli dekket i dette kapitlet. Den første har samme målsetting som belegg og impregneringer, dvs. å redusere interne fuktighet i betongen. Den andre er fjerning av oppsamlet stress grunnet ekspansjon i form av saging og kutting.

4.1 Fuktighetsreduksjon: kledning, tilsatt og / eller forbedret drenering

Å bruke kledning eller å forbedre drenering, er tiltak som begge har som målsetting å redusere intern relativ fuktighet av betongen, på samme måte som belegg eller impregneringer er ment å gjøre.

Skikkelig drenering er en viktig del i å redusere graden av vann-metning i relativt horisontale betongelementer, som betongdekker, kantstein og fortau. Så lenge elementer er konstruert slik at de har skikkelig helning mot avløp eller grøfter som opprettholdes til et akseptabelt nivå, er drenering en begrenset faktor for å redusere/kontrollere fuktighet i det aktuelle betongelement.

Kledning er generelt sett, et fysisk belegg av en konstruksjon eller et element som vil endre det estetiske inntrykket av konstruksjonen det brukes til, uten å legge til noen styrke eller stabilitet. I de samme hensyn som belegg, begrenser kledning tilgangen av vann til overflaten eller gjør den fullstendig vanntett. Hvis en kledning skal være mer effektiv enn et belegg, må den ventileres, slik at luftstrømmen har fri tilgang til konstruksjonsoverflaten for å gjøre fuktighetsreduksjonen mulig. **A864-00 (2000)**⁴ nevner nødvendigheten, med tanke på utforming, å muliggjøre den differensielle ekspansjonen mellom den berørte betong og kledningen på grunn av AAR ekspansjon. I tillegg må en analyse av strukturen gjøres med hensyn til det faktum at en hvilken som helst fremtidig AAR, som vil fortsette inntil den relative interne fuktighet senkes nok for reaksjonen å stoppe, ikke vil gjøre konstruksjonen sikker, da kledningen vil skjule overflate tegn på fremtidig ekspansjon og/eller sprekkning. Den tiden som er nødvendig for å redusere innvendig fuktighet er avhengig av størrelsen av konstruksjonen kledningen brukes på. Derfor er kledning ikke en realistisk metode for å hemme AAR i massive konstruksjoner på grunn av den lange tiden som kreves for å påvirke den interne fuktighet.

Olafsson (1989)²² presenterte er oversikt over AAR på Island og de konstruksjoner som er berørte. Et av problemene på Island var rehabilitering av betongboliger og industri-betong hus som hadde blitt negativt påvirket av AAR ekspansjon. Ulike metoder for å redusere den interne fuktighet hadde vært relativt vellykket, og for de mest alvorlig skadede hus, ble kledning funnet å være den beste løsningen. Kledning vil ikke bli praktisk på grunn av høye kostnader, inntil skadene har blitt ganske alvorlige. Ventilert kledning har vist seg svært nyttig, både med og uten isolering.

Det er klart at kledning har den samme rollen som mange andre metoder eller materialer for å forhindre videre skader grunnet AAR, med hovedvekt på å redusere den relative fuktigheten i betongen. Kledning kan stoppe AAR så lenge kledningen er ventilert, fordi uten ventilasjon vil fuktigheten ikke ble redusert.

Kledning vil ofte kunne bli en dyrere løsning enn kjemiske overflate metoder. Men i tilfeller av utvidet estetisk forfall, er det et aktuelt alternativ for mer alvorlig skadet betong, siden det fjerner behovet for overflate reparasjon, både før kledning og under levetiden av kledningen, så lenge det er utført på en forsvarlig måte.

4.2 Fjerning, saging og kutting.

Fournier et al (2010)¹⁵ poengterer at fjerning av deler av betong nær fuger ved å saging eller kutting, er et forsvarlig alternativ for å forlenge levetiden på visse konstruksjoner som er utsatt for AAR-ekspansjon, eksempelvis veidekker. Fjerning av disse delene er nyttig i å eliminere problemer med ekspansjonsfuger og minimere dårlige kjøreegenskapene på veidekker. Deler som fjernes kan byttes ut med ny bestandig betong. Det er viktig å legge spesiell oppmerksomhet på å gjenopprette fuge detaljer, som ofte er det første som lider på grunn av ekspansjon. Kutting er også gjort i en større skala for betongdammer, der store spor kuttes med diamantsaging for å imøtekomme fremtidige ekspansjon. Det bør bemerkes at det å kutte bare avlaster spenningsnivået, men gjør ingenting med selve årsaken til ekspansjonen. Det er vanlig å gjenta dette flere ganger siden ekspansjonen fortsetter og fordelen av forrige kutting tapes etter hvert.

A864-00 (2000)⁴ poengterer også at så lenge AAR ekspansjon pågår, er det sannsynlig at all spennings reduksjon som følge av kutting vil kun være midlertidig, og at videre ekspansjon vil lukke ekspansjonsfugene og at kutting pånytt vil være nødvendig i fremtiden. Kutting kan endre fordelingen av indre spenninger og oppførselen til konstruksjonen. Det er også poengtert at ekspansjonsfuger vil redusere den indre spenningen i betongen. Dermed vil ekspansjonshastigheten trolig øke mye etter kutting før fugen igjen lukkes. Ekspansjonssprekker bør forsegles for å hindre inntrengning av fuktighet, med et materiale med lav elastisitetsmodul.

Generelt er saging eller kutting en god måte å forlenge levetiden av konstruksjoner der AAR induisert ekspansjon er problematisk når det gjelder form og spenninger, men ikke hvis ekspansjonen påvirker den strukturelle integriteten og sikkerheten.

5 Elektrokjemisk uttørking

5.1 Innledning

I søken etter nye teknikker, har en relativt ny metode blitt utviklet av *US Army Corps of Engineers* med støtte fra det amerikanske forsvarsdepartementet. Denne teknikken involverer elektrokjemisk avvanning som både stopper vannlekkasje gjennom betongsprekker og reduserer også fuktigheten i selve betongen.

Elektro-Osmotisk Puls (EOP) er basert på prinsippene om elektro-osmose som ble først publisert av fysikeren F.F. Reuss i 1809²³. På den tiden, oppdaget Reuss²³ at ved å anvende elektrisk strøm, kunne han bevege vann mot tyngdekraften, gjennom et porøst medium. I den moderne versjonen av elektro-osmose, gir EOP en puls av strøm til effektivt å snu strømmen av fuktighet, og drive den ut av betong- og murkonstruksjoner påvirket av infiltrasjon. I hovedsak blir hele overflaten av det behandlede materiale en elektro-kjemisk og osmotisk barriere som hindrer vann fra å komme inn en konstruksjon.

5.2 Elektro-Osmose

Konstruksjoner som har blitt bygget under bakkenivå, eksempelvis kjellerer eller tunneler, er utsatt for problemer med fukt fra tilstøtende omgivelser, spesielt der det er en høy vannstand for eksempel der konstruksjonen er nær en elv eller havet. Skader forbundet med slik fukt koster milliarder av dollar per år, både kostnader for direkte skader og reparasjonsarbeider.

Mange av mekanismene for nedbrytning av betong, for eksempel ASR, frysing/tinging, armeringskorrosjon, osv., krever relativ fuktighet på ca 75 %. Hvis nivået av fuktighet kan holdes under dette nivået vil man kunne unngå nedbrytning eller at hastigheten på nedbrytning reduseres betraktelig.

De tradisjonelle metoder for å holde vann ute av betong er for eksempel å inkludere integrert vanntetting tilsetningsstoffer i den ferske betongblandingen, bruken av membraner til herdet betong, tilføring av sprøyte på inntrengende kjemikalier som silan, eller å "grave og drenere", med andre ord, å grave og avdekke vegg området og underlaget, for å erstatte fuktig material på vegg overflaten, og til å installere en avrenningssystem rundt bygningen eller det berørte området.

Elektro-osmose (EO) er prosessen der vann eller elektrisk ladet væske kan flyttes av trykket som utøves på den ved et elektrisk felt. F. F. Reuss²³ beskrev i 1809 opprinnelig elektro-osmose i et eksperiment som viste at vannet kunne bli tvunget til å strømme gjennom en leire-vann-system når et eksternt elektrisk felt ble påført på jorden. I 1967 beskrev Lauritis Bjerrum et prosjekt der elektro-osmose ble brukt til å avvanne en utgravning i svært myk, svak norsk leire (se Stanley og McFeat-Smith, 2008)²⁴.

Elektro-osmose har vært brukt i ulike anleggsmessige formål for å avvanne ved mudring og andre høyvanninnhold avfall stoffer, konsolidering av leire, styrking av myke følsomme leire, og kapasitetsøkning på pæle-baser. Det har også fått betydelig oppmerksomhet som en fremgangsmåte for å fjerne farlige forurensninger fra grunnvann eller å dempe vanngjennomstrømning.

Vannføringen i porøse medier, for eksempel i betong er initiert av bevegelse av kationer (positivt ladede ioner) som er tilstede i pore væsken som forårsaker vannet som omgir kationene til å flytte seg med dem. Systemet fungerer ved å bruke en elektrisk ladning som er ført gjennom ledende elektroder i form av sonder eller ledninger som er strategisk plassert i deler av betongvegger, tak eller gulv der enten fuktighet eller vannet skal fjernes fra. Ved å føre en spenning mellom de positive (anode) og negativ (katode) elektrodene blir vannet ionisert og trekkes mot den negative elektrode som er plassert i fuktig jord på utsiden av konstruksjonen. Når elektrisk kraft slås på begynner vannet å bevege seg ut fra betongen. Når systemet er kommet i drift vil dette permanent hindre vannet i å trenge inn i konstruksjonen, dvs. det er et aktiv fremfor et passivt system.

5.3 Elektro-Osmotisk Puls

Blant forbedringene gjort siden elektro-osmose først ble utviklet, inkluderer å endre potensialforskjellen syklisk for å forsøke å øke effektiviteten av systemet og samtidig unngå problemer som oppstår ved påføring av høyere spenning og strøm til betongen, som på lang sikt kan forårsake armeringskorrosjon. Elektro-osmotisk puls (EOP) er en teknikk, tilsvarende som EO, hvor vann blir flyttet av elektro-potensialforskjell grunnet liten ladning båret av vannmolekyl. For denne applikasjonen er spenningen som er anvendt likere Elektrokjemisk kloriduttrekk (ECE) enn EO.

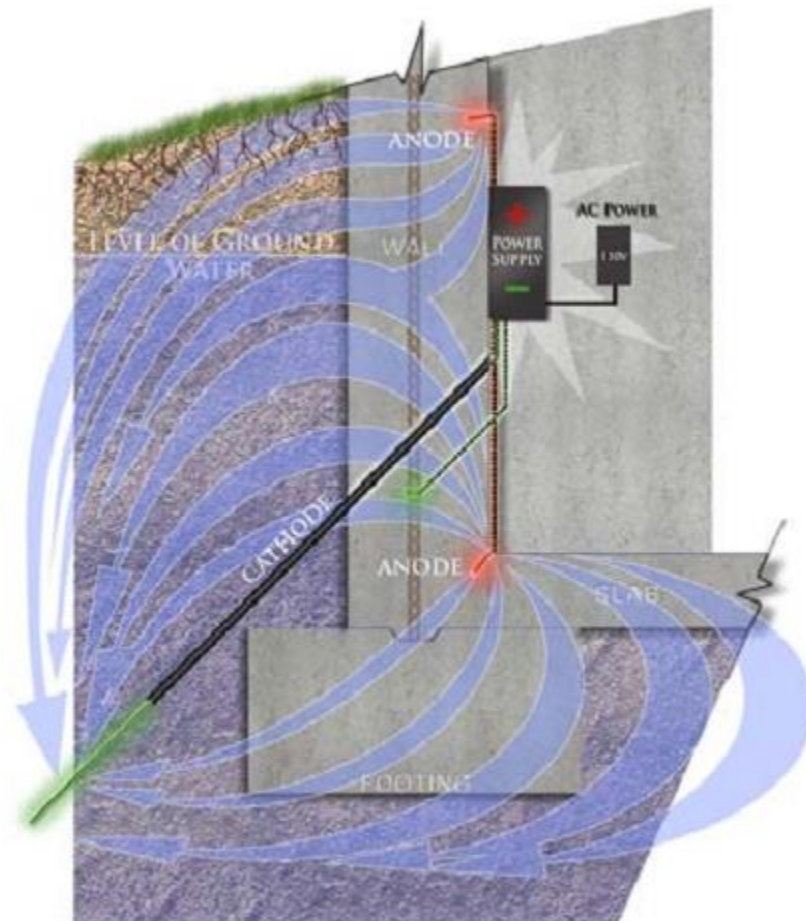
Andre forbedringer er modem elektroder med overlegen motstand mot nedbrytning på grunn av den elektriske gradienten. Karbon katoder og titan- eller platina anoder vil være betydelig lengre enn stål og kobber-elektroder. Data fra *US Army Corps of Engineers* støtter opp om effektiviteten av disse systemene (Hock et al., 1998)²⁵. Elektro-osmotisk puls bør utnytte både evnen til å bevege vann og evnen til å presse ioner båret av vannet, tilfellet med ECE og EO, som både vann og ionene skal skyves av den påtrykte gradienten.

Mange av problemene som oppstår med EOP systemer er i stor grad lignende de som erfares med ECE-systemer. Ved tilstrekkelige nivåer kan nedgangen i alkalitet ved anoden føre til syreangrep. Tiltak for effektivitet til EOP behandlinger inkluderer fastsettelse konsentrasjons profiler, intern relativ fuktighet målinger og relative ekspansjons målinger.

Med anvendelsen av EOP på utette betongkonstruksjoner, blir de våte områder av betongen tørket opp og forblir tørre i levetiden til konstruksjonen. Det kan hindre vann selv med 600 meter vannsøyle (60 bar) fra å trenge inn i betongen så lenge den elektriske strømmen er slått på (Stanley og McFeat-Smith, 2008)²⁴.

US Army Engineering Research and Development Center (ERDC) og de private selskapene *DryTronic, Inc.*, og *APS Materials* startet i 1994 med å utvikle en nyskapende teknologi for forebygging av vanninntrengning i betongkonstruksjoner. Dette førte til en felles forsknings- og utviklings avtale mellom disse to private selskapene og *US Army Construction Engineering Research Laboratory (CERL)*. Systemet som ble utviklet har mottatt en rekke priser både av forsvaret og næringslivet inkludert 2003 Army R & D prisen og i 2003 NOVA-prisen for innovasjon og FIATECH 2008 CETI pris for innovasjon i vitenskap og teknologi. Det var en av de tre finalistene for CERF Charles Pankow prisen i 2004 og 2005. I tillegg har

det blitt publisert i en rekke tidsskrifter og konferanser (Marshall et al. 2009)²⁶. Det kommersielle EOP systemet som ble utviklet av ERDC-CERL og DryTronic Inc., foregår ved at EOP påføres på selve betongkonstruksjoner ved å påføre en pulserende elektrisk felt som kalles elektro-osmotisk puls. Den bruker to sett av elektroder, den ene settet er innebygd rett under overflaten av betonggulv, vegger eller tak, og det andre settet er plassert enten i det omliggende jord eller hvis betongen er tykk, dypt inne i selve betongen. En pulserende likespenning påføres mellom elektrodene for å produsere et elektrisk felt i betong tverrsnittet. Den positive elektriske puls forårsaker kationer (f.eks, Ca^{2+}) og omliggende vannmolekyler til å bevege seg fra den tørre siden (anode) mot den våte side (katoden) mot retningen av strømmen induisert av den hydrauliske gradient og hindrer vanninntrengning gjennom en nedgravd eller neddykket betongkonstruksjon. Figur 3 viser den generelle EOP prosessen. I tillegg til å hindre fuktighet fra å komme inn, vil EOP også forårsake fuktighet på betongoverflaten til å bevege seg gjennom betongen mot utsiden av strukturen (Marshall et al. 2009)²⁶.



Figur 3. Skjematisk fremstilling av et EOP system: anode innebygd i betongen; katoden presset inn i jorden, og en styreenhet som driver hele systemet. (Marshall et al. 2009)²⁶Error! Bookmark not defined.

5.4 Prosjekter

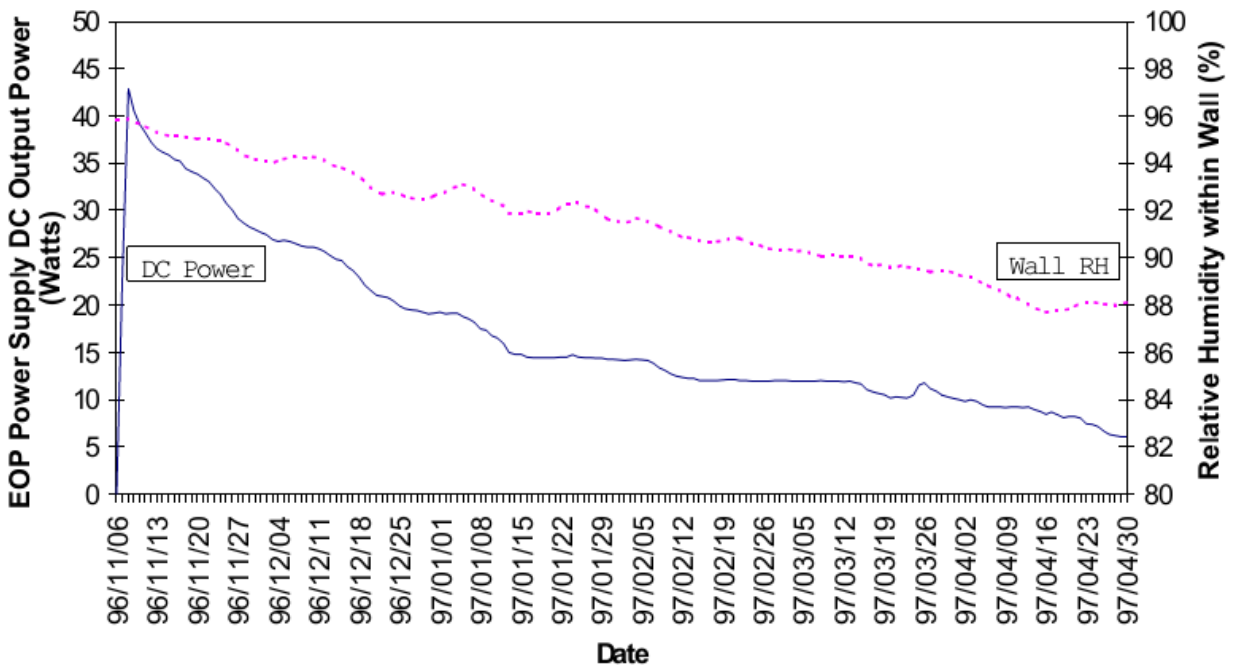
5.4.1 U.S. Army

På begynnelsen av nittitallet foretok *US Army Center for Public Works* en studie for å demonstrere og dokumentere effekten av EOP teknologi for å kontrollere grunnvannets inntrenging i betongkonstruksjoner. To betongkonstruksjoner, begge med utette betongvegger i kjelleren av konstruksjonene, ble valgt for studiet. En lokalitet ved Fort Jackson, South Carolina og en på McAlester Army Ammunisjon Plant (AAP) i Oklahoma (Hock et al., 1998)²⁵.

Før installasjon av EOP i kjellerene, ble skadede områdene reparert med reparasjonsmaterialer som var kompatible med EOP systemet. Anodene (gummi-grafittelektroder) var plassert i betongen i utvalgte områder inne i strukturen, basert på motstandsmålinger. Katodene (kobber jordingsstaver) ble installert i de ytre par av veggene eller utenfor konstruksjoenne. Til slutt ble EOP kontrollenheten montert, justert og kalibrert.

EOP-systemet ble aktivert i Fort Jackson bygningen i august 1994 og drevet i det minste til august 1996. For McAlester AAP bygningen ble EOP systemet aktivert i november 1996 og drevet i minst 5 måneder. På Figur 4 vises hvordan en av veggene i McAlester AAP tørkes ut etter installeringen av EOP-systemet, på 5 måneder går den relative luftfuktigheten fra ca 96 %, ned til ca 88 %. Som en konsekvens, etter som betongen tørker ut, blir mindre og mindre strøm nødvendig for å kjøre EOP systemet. Etter som betongen tørker ut, er det mindre oppløste ioner tilstede til å bære strøm, derfor kreves det mindre strøm for å opprettholde EOP-prosessen aktiv.

Basert på resultatene av demonstrasjonsprosjektene, konkluderer studiet at bruk av EOP teknologi for kontroll av vann innsig i betongkjeller konstruksjoner var et akseptabelt alternativ til konvensjonell nedgraving og flislegging. EOP teknologien installert i Fort Jackson bygningen forebygget vann-innsig og reduserte den relative fuktigheten av betongen til 70 prosent. Kostnadene for installasjon ble vurdert til å være 40 prosent lavere enn kostnadene av det tradisjonelle grøfting og avløp drenering. Drift- eller energi kostnaden for EOP systemet var minimael, eller tilsvarende utgifter til en 60 W lyspære (Hock et al., 1998)²⁵.



Figur 4. Strømforbruket til EOP system i forhold til relativ fuktighet i en EOP behandlet vegg i McAlester AAP. Fra Hock et al., (1998)²⁵

5.4.2 Prosjekter i Asia og andre steder av Hydrotech

Stanley og McFeat-Smith (2008)²⁴ beskriver flere reelle EOP prosjekter som har vært gjennomført i Asia. Begge forfatterne arbeider på Hydrotech (www.hydro-usl.com). Historien om *Hydrotech* (hentet fra deres hjemmeside) er at det i november 2006 ble innledet forhandlinger for å skaffe opphavsrettighetene som tilhørte det Hong Kong baserte firmaet; *Universal Solutions Limited*. USL som ble etablert i mai 2005 med sikte på å anskaffe, utvikle og markedsføre Multi-Pulse Sekvensering (MPS). MPS er gjennomføringen av konvensjonelle EOP teknikken.

Karl J Grebstad, en norsk, internasjonal arkitekt, er en større aksjonær i USL. Hans praktiske arkitektske erfaringer, spesielt i Hong Kong, som gjorde det nødvendig å løse vanninntrengning problemer i store bygninger og konstruksjoner på gjenvunnet land og ustabile løsmasser, utviklet hans interesse i å finne en praktisk og kostnadseffektiv løsning. Han har siden fått bred erfaring innen omvendt osmose og har gradvis og betydelig avansert effektiv gjennomføring av denne teknologien, både i forhold til eksisterende bygg, og også å utforme den inn i nye konstruksjoner.

I 1987 etablerte Grebstad firmaet *Concrete Solutions Limited* med sikte på å utvikle bruken omvendt Osmotisk teknikk i markedene i Hong Kong og i Kina. Etter en rekke vellykkede installasjoner, ble firmaets ansatte og teknisk kunnskap kjøpt opp av USL-konsernet i 2005. Erfaringene i Asia og Norge førte til utviklingen av MPS-systemet, som er resultatet av 10 års utvikling i forbindelse med elektroniske ingeniører og forskere i Norge og Hong Kong.

I 2005 etablerte USL-konsernet et dedikert datterselskap kjent som *Underground Solutions International Limited* (USIL) med kontorer i Hong Kong, Storbritannia og Norge. USIL vil vurdere å åpne kontorer på kontinentet-Europa etter gjennomføringen av Storbritannias forretningsplan.

Den 16 juli 2007, startet Hydrotech International Limited handel på den australske børsen etter en vellykket innsamling av AUD \$ 8 millioner. Innsamlede midler sikret at selskapet kunne gjennomføre for fullt sin kommersialisering prosess gjennom ansettelse av teknisk nøkkelpersonell i både Storbritannia og Hong Kong.

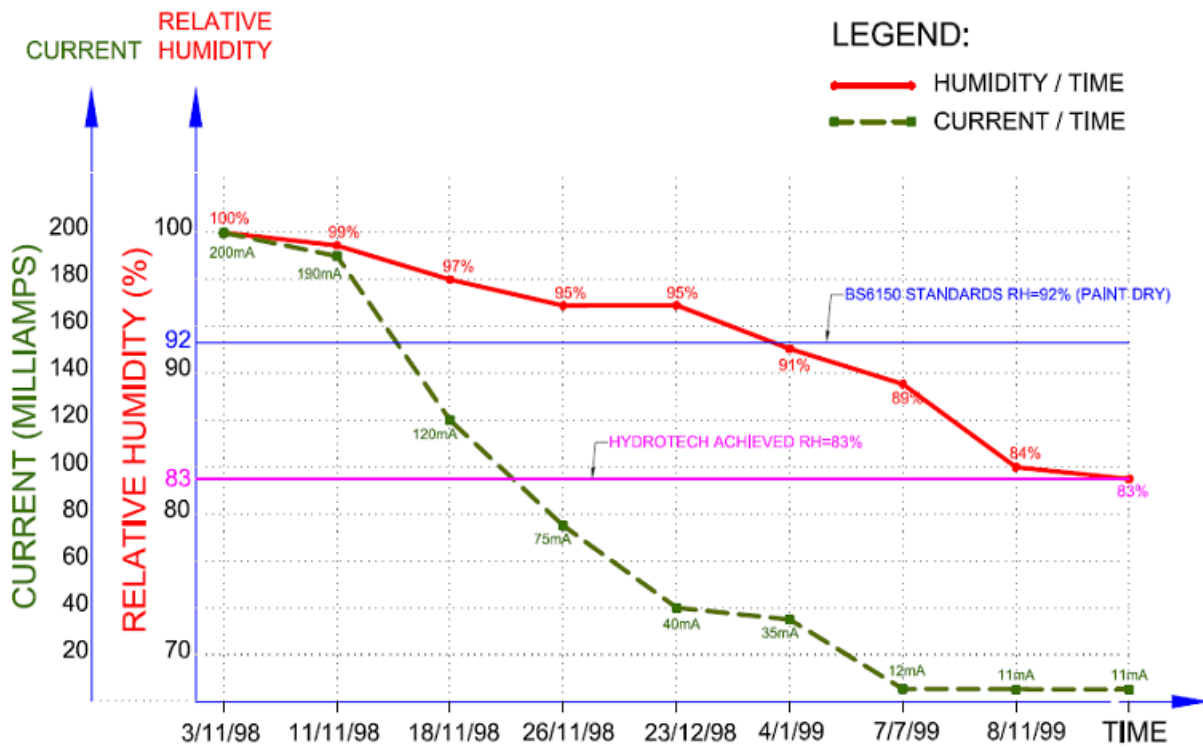
5. juni 2012, privatiserte Hydrotech International Limited sin vanntettings virksomhet. MPS virksomheten og kunnskap ble overført til Hydrotech Asia Limited. Med hovedkontor i Hong Kong, Hydrotech Asia betjener nå kunder i Storbritannia, fastlands-Kina, Taiwan og Hong Kong.

I ovenfor nevnte artikkel er flere EOP prosjekter kort beskrevet som har vært foretatt av Hydrotech. Videre nevner de på deres hjemmeside (www.hydro-usl.com) mange prosjekter som har vært gjennomført, over hele verden. Listen over prosjekter inkluderer 8 prosjekter i Norge.

Et av prosjektene var den sentrale T-banen i Hong Kong. T-banen hadde kunstverk på veggene, og det var viktig å beskytte kunstverkene slik at de ikke ble skadet av mulige vanninntrengning problemer. Åtte år etter systemet ble installert, fungerer det fortsatt perfekt (i 2008).

I kjelleren på Hong Kongs Internasjonale Finans Senter var det alvorlig salt-vanninntrengning gjennom vegger, noe som resulterte i at heis maskinrommet gjentatt ganger ble oversvømmet. Etter installasjonen av MPS systemet i 2000 har vanninntrengning blitt helt borte og maskinrommet er fullstendig tørt.

I lasterampen i kjelleren på City Plaza 4 i Tai Koo Shing var en støttevegg helt mettet av grunnvanninntrengning. En del av lasterampen ble behandlet, og senere ble det utvidet til å omfatte ytterligere to lasteramper. Veggene har vært helt tørre i over 10 år (skrevet i 2008). Figur 5 viser hvordan fuktighetsinnholdet i veggene har falt til en verdi på 82 %, som er 10 % lavere enn 92 % standard maling tørke spesifikasjonen av BS 6150. Mens veggene tørket ut, falt strømmen fra en initial verdi på 200 mA ned til en verdi under 10 mA.



Figur 5. Strømforbruket til EOP systemet i forhold til relativ fuktighet i en EOP behandlet betongstrukturen. Fra Stanley og McFeat-Smith (2008)²⁴.

Åpningen av London Underground Walthamstow banestasjon ble utsatt i to år på grunn av vanninntrengnings problemer. Etter installasjon av MPS system har den helt tørket ut og er nå i daglig bruk.

Systemet har også blitt installert i betong demninger. Tafjord demningen i Norge er den nest høyeste demning i Europa og har blitt reparert ved hjelp av MPS system. På 1990-tallet ble det antatt at demningen ikke kunne repareres og det var planlagt nedrivning, men etter installasjonen av MPS-systemet er den nå i god stand ettersom lekkasjen har blitt stoppet.

5.4.3 Prosjekter av Global Assistance

Global Assistance (www.drytronic.com) er en internasjonal EOP tjenesteleverandør. Deres produkt heter DryTronic® fuktighets blokkering og kontrollsystem. Gjennom installasjon av korrosjonsfrie elektroder, vil fuktighet trekkes ut av gulv og vegger og tilbake til jorden på utsiden eller fordampe i luften. DryTronic®-systemet er egnet for alle typer vegger, gulv, tak, osv.

På deres hjemmeside en liste over mange bygninger, hovedsakelig boliger, hvor denne teknologien har blitt brukt.

5.4.4 Prosjekter av STRUCTURAL

STRUCTURAL (www.structural.net) er et USA-basert selskap som tilbyr blant annet vannfast og beskyttelse teknikker. På hjemmesiden deres er beskrivelse av tre EOP studier som de har vært involvert i, oppsummert av Anderson et al., (2009)²⁷.

5.4.4.1 *Den Amerikanske finansdepartementet Bygning, Washington, D.C.*

Hvelvene i statskassens bygning var så degradert grunnet fuktige, mugne tilstander at de ble ubrukelig. Farlig mugg, som hadde samlet seg under flislagt gulv, gjorde det umulig å bruke rommene til å lagre verdifulle dokumenter og problemet utgjorde også et helseproblem for personellet. I stedet for å bruke en solid, kobber stang for katoden, besluttet ingeniører å bruke et perforert, kobberør som de installerte omtrent halv annen fot over det hvelvede taket. De positivt ladde anoder drev vannet opp det perforerte røret, der vannet ble drenerte videre til en pumpe. Med installasjon av EOP systemet er hvelvene nå helt tørre og vanntett nok til å bli brukt som datarom.

5.4.4.2 *Lås & demning No. 27, Alton, Illinois*

Et annet eksempel er sluser, som brukes til å overføre skip og båter fra høy vann til lav vann og omvendt ved å fylle og tømme en rekke slusekammer. Det er steder i en sluse-konstruksjon der vann ikke er akseptabelt - slik tilfellet var for en sluse i Alton, Illinois. Inne i slusen, 60 meter under vannflaten, var det kamre med elektriske installasjoner. Vann trengte inn i disse kamrene og forårsaket en farlig situasjon for vedlikeholdsarbeidere som måtte gå langs kamrene når de måtte reparere pumpene til slusene. Etter at EOP vanntetting systemet ble installert, er kamrene helt tørre og vann inntrengning er ikke lenger et problem, noe som gjør det trygt for vedlikeholdsarbeidere å gjøre jobben sin.

5.4.4.3 *Metro Tunnel, Washington, D.C.*

Et transportsystem, spesielt i et travelt miljø som Washington, DC, er forventet å operere uten uforutsette stopp. Dessverre ble tunnelbanestasjon-systemet utsatt for kontinuerlige strømbrudd på grunn av vann som kom inn i transformatorstasjonen, strømmet inn og kortsluttet utstyret. For å stoppe vann problemene, installerte ElectroTech, anoder på den indre overflaten av tunnelen, og plasserte katodene langs bakfyllingen. Noen av katodene ble faktisk innebygd i berggrunnen. Ytterligere kompliserende for prosjektet var det faktum at entreprenøren kunne bare jobbe to timer hver natt, da transportsystemet ikke var i drift. Etter EOP vanntetting installasjon, ble vannlekkasje løst og tunnelen er nå tørr.

5.5 Konklusjoner

EOP vanntettings teknologi kan betraktes som en relevant løsning for en rekke konstruksjoner og bygninger, inkludert parkeringshus, sykehus, boliger, handelshus, biblioteker, museer, industrianlegg, stadioner, lager, tunneler, veier, demninger og mer. I hovedsak kan EOP brukes i alle bygninger der lekkasje gjennom betong er uakseptabel og andre fysiske barrierer som beleg, gjennomtrengende forseglinger eller impregnering membraner har vist seg ineffektive. Faktisk, der fuktighet beskytting er kritisk, for eksempel i militære installasjoner, eller hvor fuktinntrengning og bakterievekst fører til usunne miljøer innenfor en struktur, har EOP vist seg å være det mest pålitelige og driftsikre

alternativet i å forebygge fuktinntrengning. I tillegg til det ovenstående, er EOP den eneste løsningen på lekkasje der drenering ikke kan utføres og innvendig avvanning ikke er akseptabelt

En konstruksjon der man opplever vannlekkasje problemer, opplever også trolig overflødig fuktighet, mugg lukt og mugg oppsamling, faktorer generelt kategorisert som inneklime (IAQ) problemer. Disse problemene er ikke bare stygge og skadelig for en konstruksjon, men de kan også resultere i økte helsekostnader for beboere, redusert produktivitet, og mulige rettsak. EOP er kjent for å redusere relativ fuktighet i betongen eller murverk til nivåer som ikke opprettholder vekst av mugg og andre urenheter som kan påvirke de miljømessige kvalitetene innenfor en struktur. Å kontrollere fuktighet er viktig for applikasjoner der fuktighet kan føre til rust på utstyr, slik som datamaskiner og datasentre.

EOP tilbyr ytterligere fordeler som ikke finnes i andre vanntette systemer. Et biprodukt av anvendelsen av EOP til en armert betong strukturen er at katodisk beskyttelse gis til armeringsjern og andre innebygde metaller i betongen. Kretsene brukt til EOP er de samme som brukes for katodisk beskyttelse. En godt konstruert EOP utforming vil innlemme forbindelser til armeringsstål for å optimalisere driften av EOP systemet. Dette, som igjen, gjør stålet elektrisk kontinuerlige med katodene, som resulterer i korrosjonsbeskyttelse av stålet, forebygging av skader og tidlig strukturell nedbrytning. Systemet forhindrer også korrosive midler, slik som sulfater og saltvann, fra å trenge inn i betongen og forårsaker nedbrytning. Videre ved uttørking av betongen bør risikoen av ASR i betong være svært lav.

Tidligere studier av EOP teknologi for å vurdere mulighetene og kostnadseffektiviteten til denne teknologien i forhold til konvensjonelle fuktighet risikoreduerende teknikker på utvalgte betongkonstruksjoner konkluderte med at betydelige første kostnadsbesparelser på over 50 % kan oppnås ved hjelp av EOP-teknologi. Videre er driftskostnadene av EOP systemer er svært lave, eller på størrelse med å drifte noen lyspærer.

6 Tilførsel av litium

6.1 Historisk bakgrunn

Følgende kapittel er basert på FHWA-HRT-06073 rapport fra 2006²⁸. Det er en «State-of-the-art» rapport om bruken av litium-forbindelser i betong.

Bruken av litium-forbindelser for å kontrollere ASR ekspansjon i betong ble først rapportert av McCoy og Caldwell (1951)²⁹. De gjennomførte en serie ASTM C 227 mørtel-prisme tester på potensiell bruk av ulike kjemiske tilsetningsstoffer for å forhindre eller minimere ASR-induserte ekspansjon og skade. I disse testene ble det benyttet Pyrex glass som reaktivt tilslag. Konklusjonen av studiet var at de mest lovende kandidatene i å redusere ASR ekspansjon var litium-forbindelsene (LiCl, Li₂CO₃, LiF, Li₂SiO₃, LiNO₃, og Li₂SO₄), som i hovedsak eliminerte ekspansjonen etter 8 ukers lagring ved 38°C, forutsatt at de ble brukt i tilstrekkelig mengde.

Etter pionerarbeid til McCoy og Caldwell (1951)²⁹, skjedde det ikke så mye angående utnyttelse av litium-forbindelser som et forebyggende materiale mot ASR, inntil for omtrent 15 år siden, med unntak av arbeidet til Lawrence og Vivian (1961)³⁰. I de siste 15 årene har effekten av lithium-forbindelser for å bekjempe ASR blitt revitalisert.

6.2 Mekanismer for litium for å hindre ASR i betong

Følgende kapittel er basert på FHWA-HRT-060731 og Tremblay et al. (2010)³¹. Arbeidet til McCoy og Caldwell (1951)²⁹ ble videreført av Chatterji, (1987)³²; Sakaguchi, et al, (1989)³³; Stark, (1992)³⁴, Lumley, (1997)³⁵, Ramachandran, (1998)³⁶, Diamond, (1999)³⁷, Thomas et al., (2000)³⁸, Collins, et al, (2004)³⁹ og Tremblay, et al, (2004b)⁴⁰. Hovedkonklusjonen til alle disse arbeidene er reduksjonen i ekspansjon av ASR i nærvær av litium-holdige tilsetningsstoffer i betongkonstruksjoner. Mekanismen eller mekanismer der disse tilsetningsstoffene reduserer ekspansjonen er imidlertid ikke klart forstått. Flere mekanismer har blitt foreslått for å beskrive virkningen av litium, inkludert:

- Litium kan endre ASR produktsammensetning, resulterer i mindre ekspansive produkt.
- Litium kan redusere silika oppløsning.
- Litium kan redusere repolymisering av silika og silikater.
- Litium kan redusere frastøtende krefter mellom kolloidale ASR gelpartikler.

6.2.1 Forslag til mekanisme: Etablering av mindre ekspansiv produkt

Flere har antydnet at ved bruk av litium, kan mindre ekspansiv eller ikke-ekspansiv reaksjonsprodukt dannes ved alkali-silika reaksjoner.

Lawrence og Vivian (1961)³⁰ viste til at silikagel har en tendens til å være mindre reaktive med NaOH med økende konsentrasjoner av LiOH, til 2N LiOH ekvivalent i 2N NaOH tilsvarende løsning. De foreslo også at ved bruk av litium, dannes et litium silikat ved ASR som er mindre oppløselig og mer stabil enn

ASR produkt i fravær av litium. På grunn av sin stabilitet, foreslo de at det resulterende LiOH silisiumdioksyd komplekset kan danne et uoppløselig overflatelag, som beskytter silisiumoksyd fra ytterligere angrep av andre alkalier (Lawrence og Vivian, 1961)³⁰.

Sakaguchi et al. (1989)³³ fant at konsentrasjonen av litium i porevæsken reduseres med tiden, mens alkali konsentrasjonen forble nesten konstant. Imidlertid, i fravær av litium, reduseres alkali konsentrasjon av pore væske over tid. Dette tyder på at litium-silika reaksjon er mer gunstig enn natrium-silika eller kalium-silika reaksjon i mørtel-prismene. Ifølge dette, med nærvær av litium, ville det ikke-ekspansiv litium-holdig produktet bli favorisert over en mer ekspansiv produkt inneholdende forholdsvis høyere konsentrasjoner av alkalier natrium og kalium.

Chatterji, (1987)³² konkluderte imidlertid med at reaksjonen av silisiumdioksyd med natrium er foretrukket ovenfor reaksjonen av silisiumdioksyd med litium. I et system inneholdende Na^+ , K^+ , og Li^+ -ioner, vil alkali ioner konkurrere for adsorpsjon på negativt ladde områder på silikat overflaten. Ettersom adsorpsjon tilhørighet øker med kationets radius, er det forventet at natrium adsorpsjon vil være foretrukket i forhold til litium adsorpsjon. Dersom dette er korrekt, er dette i motsetning til hva som hevdes av Sakaguchi (1989)³³. Kurtis, et al. (1998; 2003)^{41,42}, har imidlertid påpekt at et sterkt felt utveksling atferd, hvor kationene er i direkte kontakt med en overflate, kan forklare preferanse for alkali-silika reaksjon gel for Li^+ i forhold til Na^+ og K^+ -ioner, som beskrevet av Sakaguchi (1989)³³.

Stark (1992)³⁴ foreslo at med innhold av en tilstrekkelig konsentrasjon av litium, dannes det en ikke-ekspansiv litium-alkali (og muligens kalsium) silikat. Videre foreslås en minimum litium terskel som er nødvendig for å forhindre ekspansjon.

Diamond og Ong (1992)⁴³ viste at når litium innholdet av gel produktet økes i forhold til mengden av natrium og kalium, gikk mørtel-prisme ekspansjon ned, noe som bekreftet arbeidet til Stark (1992)³⁴.

Ramyar, et al. (2004)⁴⁴ utførte mørtel-prisme tester (ASTM C 1260) med og uten litium (som LiF og Li_2CO_3 tilsatt vannet i resepten). Målet med studiet var å fastslå de kjemiske og morfologiske kjennetegn i reaksjonsproduktene. Bruken av flyaske og litium-baserte tilsetningsstoffer resulterte i betydelig reduksjon i mørtel-prisme ekspansjon. Observasjoner ved hjelp av scanning elektronmikroskopi (SEM) og energi dispersiv X-ray mikroanalyse viste forskjellig morfologi av de krystallinske reaksjonsprodukter med Li-bærende tilsetningsstoffer.

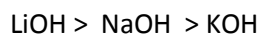
Mei, et al. (2004)⁴⁵ studerte ekspansjonen av silisiumholdige tilslagsmaterialer i LiOH, KOH eller NaOH testløsninger. De fant at vannabsorpsjon til alkali-silika reaksjonsprodukter var $\text{KOH} > \text{NaOH} > \text{LiOH}$ i relativ luftfuktighet på 25 til 100 prosent. Forfatterne så også på ekspansjon av mørtel med mini-prismer (20 x 20 x 60 mm). I disse testene ble et svært reaktivt zeolitert perlitt tilslag behandlet før testing i autoklav ved 150°C i noen dager i vann, LiOH, KOH eller LiOH + KOH-løsninger. Konklusjonen av disse testene var at bruk av LiOH kan hemme ASR ekspansjon og sprekkdannelse. Reaksjonszoner omgir reaktive silika og sekundære reaksjonsprodukter ble observert i begge systemer, men antallet teksturerede litium-baserte silikater dannes når LiOH var til stede i systemet. Det foreslås at siden ladningstetthet av Li^+ -ioner er mye høyere enn for K^+ -ioner, er det ion bindende kraft av Li-Si sterkere

enn for LiK, og dermed danner litium silikater (LSH) av ikke-ekspansiv karakter som omgir og beskytter reagere silisiumoksyd fra videre skadelig reaksjon med K ioner.

Kawamura og Fuwa (2003)⁴⁶ rapporterte at tilsetning av litium til mørtel-blandinger reduserte CaO/SiO₂ forholdet i ASR gelen. CaO/SiO₂ forholdet avtok med økende litium doseringer til en terskel av litiumkonsentrasjonen ble nådd, over den terskelen ble gelblandingen essensielt ufølsomt overfor ytterligere økning i litiumkonsentrasjonen. Koblingen mellom CaO/SiO₂ forholdet i gel produkter og ekspansjon ble ikke klarlagt i denne studien.

6.2.2 Forslag til mekanisme: Undertrykkelse av silika oppløsning

Lawrence og Vivian (1961)³⁰ fant at silika oppløsningshastighet i alkali-hydroksyd-oppløsning økte i rekkefølgen:



Chatterji, et al. (1987)³² foreslo at størrelsen av det hydratiserte ion radius var viktig for å bestemme omfanget av kjemisk reaksjon iløpet av alkali-silika reaksjonen.

Wijnen, et al. (1989)⁴⁷ kom til en lignende konklusjon som Lawrence og Vivian (1961)³⁰ at frekvensen av silika oppløsning reduseres i en lignende rekkefølge. Dette tilsvarer det Chatterji et al. (1987)³² foreslo at hastigheten reduseres med økende hydratisert ion radius der alkalimetall kationer i løsnings omgir en silikat overflate. I betraktning av litium, natrium, og kalium, hastigheten av silisiumdioksyd oppløsning ville da være tregest i nærvær av litium, som har en større radius enn hydratisert ion natrium som er, på sin side, større enn kalium.

Disse resultatene tyder på at litium kan redusere hastigheten av silisiumdioksyd oppløsning, som da ville begrense hastigheten av produktets dannelse og potensialet for ekspansjon. Imidlertid nærmet konsentrasjonen av oppløst silika som undersøkt av Lawrence og Vivian (1961)³⁰ samme verdi, uavhengig av alkalimetall attraksjon, som tyder på at litium kan redusere oppløsningshastigheten, men ikke oppløseligheten av silisiumdioksyd.

Qi and Wen (2004)⁴⁸ foreslo at litiumhydroksyd reduserer oppløsningen av silisiumdioksyd. Et lag av litium silikat dannes på overflaten av reaktive tilslagspartikler, som reduserende etterfølgende oppløsning. Qi og Wen (2004)⁴⁸ kommer til denne konklusjonen ved å observere gel produkter og måle ekspansjoner i løsningen med og uten litiumhydroksyd. Det ble vist at Li/(Na + K) forholdstall i overkant av 0,8 var nødvendig for å redusere ekspansjonen av opal med cirka 90 prosent.

Collins, et al. (2004)³⁹ analyserte oppslemminger av silikagel og alkalisk løsnings ved forskjellige aldre for å fastslå endringer i konsentrasjonen av oppløsningsfasens typer (Si, Na, Ca, og Li). Kvantitativ analyse viste at natrium og litium ble bundet i reaksjonsprodukter. Det ble også bemerket at litium kan ha blitt fortrinnsvis bundet over natrium i minst ett av reaksjonsproduktene. Fra dette studiet, viste det seg at litium tilsetningsstoffer enten nedsatt silika oppløsning eller fremmet utfelling av silika-rikt produkt (noen av disse kan være ikke-ekspansiv) som oppløste silisiumdioksyd konsentrasjonen faller med økende dosering av litium nitrat eller litiumklorid. Slam tilberedt med LiCl og LiNO₃ hadde mindre silika

oppløsning i forhold til slam med LiOH. Økningen av silika oppløsning i tilfelle med LiOH førte ikke til en økning i ekspansjon i mørtel-prismer tilberedt med LiOH. Derfor, ble det foreslått at ekspansjon skyldes ASR i nærvær av litium var mest sannsynlig ikke avhengig av mengden av oppløst silisiumdioksyd. Reduksjonen i utvidelse når litium er til stede kan være på grunn av dannelsen av en ikke-ekspansiv litium-silikat kompleks.

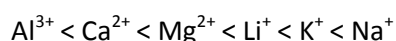
6.2.3 Forslags til mekanisme: Redusert Repolymerisering.

Basert på mikroskopi, elementanalyse, og overflatekjemiske prinsipper, har Kurtis, et al. (1998, 2003)^{41,42} antydnet at, i tillegg til å redusere hastighet på silisiumdioksyd oppløsning, kan litium begrense repolymerisering av oppløste silika-arter til gel, noe som effektivt reduserer potensialet for ekspansjon. Ved anvendelse av røntgenkrystallografi mikroskopi for å undersøke reaksjonen av silisiumdioksyd i modell pore løsning i nærvær og fravær av litium, observerte Kurtis, et al. (1998, 2000)^{41,49} at betydelig mer gel produkt dannes i prøver som ikke inneholder litium enn i de som inneholder litium. Resultater fra elementanalyse viser reduksjon i silisium-konsentrasjon i oppløsningen som antydnet at tilstedeværelsen av litium reduserte silika oppløsning til en viss grad, men konsentrasjonen av silisium i løsning i nærvær av litium tilsvarte rekkefølgen av de konsentrasjoner observert i fravær av litium. Disse resultatene antydnet at forskjellene i oppførsel observert med litium kan skyldes mer direkte til endringer i mengden av produkt dannet i stedet for i den grad av reaksjon. Kurtis and Monteiro (2003)⁴² foreslår også at litium gir en reduksjon i overflateladningstetthet av ASR gel.

Dersom det er slik som undersøkelsene til Sakaguchi et al. (1989)³³ antyder, er adsorpsjon av Li^+ favorisert over Na^+ og K^+ adsorpsjon, der det kan eksistere en fysisk mekanisme for å hindre gel repolymerisering. Kurtis, et al. (1998, 2000)^{41,42} foreslo at netto frastøtning mellom silikat partiklene er fortsatt høy i nærvær av litium. Som et resultat, er det foreslått teoretisk at når litium er til stede i tilstrekkelige konsentrasjoner, vil repolymerisering til en potensiell ekspansiv gel ikke forekomme. Effekten av litium er da avhengig av dens relative konsentrasjon i løsningen samt gunstighet av silisiumdioksyd-litium reaksjon.

6.2.4 Forslags til mekanisme: Reduksjon i frastøtende krefter innen produktene.

Prezzi, et al. (1997)⁵⁰ og Prezzi et al., (1998)⁵¹ benyttet den elektriske tolags (EDL) teori for å forklare ekspansjonen av ASR gel og hvordan kjemiske tilsetningsstoffer som litiumsalter kan hindre ekspansjon. Forfatterne antok ASR gel som en kolloid, sammensatt av negativt ladede partikler. Ifølge EDL teorien, ekspanderer ASR gel på grunn av tolags frastøting effekter mellom de kolloidale partikler. Valensen og hydratisert radius kationene i kolloid er de viktigste faktorene som bestemmer ekspansjonen av gelen. Derfor, i henhold til denne EDL teorien, vil en ASR gel med høye konsentrasjoner av kationer med større valenser, vise mindre ekspansjon over lavere valenser. Det er, relativt høye andeler av trivalente (f.eks Al_3^+) og toverdige (f.eks Ca^{2+}) kationer i forhold til monovalente kationer (f.eks, Na^+ , K^+ , og Li^+) skal føre til mindre ekspansive geler. Resultater fra en rekke mørtel-prisme tester utført av Prezzi, et al. (1998)⁵¹ er ihht. tolags forutsigelser ifølge kation valens. Disse testene viser at ekspansjon øker med kation ladning i størrelsesorden:



Dette forklarer ikke effekten av litium for utvidelse av ASR gel. Som allerede nevnt, er radien for det hydratiserte litium ionet større enn for natrium eller kalium. Derfor vil EDL teorien forutsi at litium gel vil gi mer ekspansjon enn natrium og kalium geler. Derfor trengs det ytterligere mekanismer for å forklare reduksjonen i gel ekspansjon assosiert med bruk av litium tilsetningsstoffer.

Ifølge Prezzi et al., (1997, 1998)^{50,51}, vil en nedgang i overflate ladningstetthet (σ) reduserer effektivt trykket (AP) som genereres av ASR gel ekspansjon:

$$\Delta P = C_o RT (y_o + 1/y_o - 2)$$

hvor: C_o er bulk elektrolytt konsentrasjon

R er molar gasskonstanten

T er den absolutt temperatur og

$$y_o^{0.5} = 4 \tan^{-1}((-\sigma/2Fy_o)(\beta/C_o)^{0.5})$$

hvor: F er Faraday konstant

$$\beta = 1.084 \times 10^{16} \text{ m/mol ved } 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

σ er overflaten ladningstetthet, uttrykt per arealenhet.

Tilstedeværelsen av toverdige og treverdige kationer er hentet fra kjemiske salter som antas å senke overflate ladningstetthet av ASR gel sammenlignet med systemer der mer monovalente kationer er tilstede. Rodrigues, et al. (2001)⁵², studerte hvordan overflate-ladningstetthet av silikater, herunder ASR gel, ble påvirket av tilstedeværelsen av ulike kjemiske salter, inkludert LiCl. De viste at i et system med både natrium og litium-ioner til stede, vil overflateladningstetthet av opal (2001) og alkali-silikagel (oppnådd fra en ASR-berørt dam) (upubliserede data) reduseres i nærvær av LiCl, sammenlignet med NaCl. En reduksjon i de frastøtende kreftene mellom kolloidale partikler av ASR gel i nærvær av litium vil redusere det ekspansive trykket generert av ekspansjonen til gelen. Rodrigues et al., (2001)⁵² observerte også at KCl produserte en enda større reduksjon i overflate ladningstetthet enn LiCl. Disse resultatene faller ikke sammen med funnene til Prezzi, et al. (1998)⁵¹ beskrevet ovenfor, som foreslår at videre forskning er nødvendig.

6.2.5 Forslag til mekanisme av Tremblay et al. (2010)³¹

I denne relativt nye rapporten har forfatterne undersøkt relevant litteratur og utført eget arbeid for å forklare de ulike mekanismene som er foreslått for å forklare den gunstige effekten av LiNO_3 for å forhindre ASR. De fant ut at mekanismene kan grupperes i to hovedkategorier med hensyn til de to forhold som kreves for at skadelig ekspansjon oppstår med reaktive silika, dvs. kjemisk angrep av silisiumdioksyd av den svært grunnleggende betong pore løsning og dannelse av en ekspansiv kalsium-alkali-silikagel:

- Den kjemiske stabiliteten av reaktiv silika økes i nærvær av LiNO_3 , grunnet:
 - a) pH reduksjon i betongen pore løsning (**mekanisme A**),
 - b) en annen endring (er) i kjemien av denne løsning (**mekanismen B**), og/eller
 - c) tidlig formasjon, ved overflaten av eller annen måte som omgir de reaktive silika korn eller tilslagspartikler, av en Si-Li reaksjonsprodukt, krystallinsk eller amorf, som virker som en fysisk barriere mot ytterligere reaksjon (**mekanisme C**);
- Den kjemiske stabilitet av reaktiv silisiumdioksyd forblir nesten uforandret i nærvær av LiNO_3 , men betong ekspansjon er betydelig redusert eller undertrykt, på grunn av:
 - a) dannelse av en krystallinsk og ikke-ekspansiv Si-Li reaksjonsprodukt (**mekanisme D**),
 - b) dannelse av en Si-Li amorf gel som er, imidlertid, ikke-ekspansiv eller mye mindre ekspansiv enn den klassiske ekspansive ASR gel (**mekanisme E**), eller
 - c) høyere løselighet av silisiumdioksyd, som dermed tillater det meste av den reagerte silisiumdioksyd å forbli i løsning uten å danne en ekspansiv reaksjonsprodukt (**mekanisme F**).

Forfatterne kom til følgende konklusjoner om de seks ulike mekanismene:

Mekanisme A (pH-reduksjon) og F (økt løselighet av silisiumdioksyd) støttes ikke basert på pore løsningskjemi resultater som viste at pH ikke ble signifikant redusert i betongen pore løsningen i nærvær av LiNO_3 og at silika-konsentrasjonen i oppløsning var alltid lav og ikke påvirket av tilstedeværelsen av LiNO_3 .

Mekanisme C (beskyttende belegg) vurderes som lite sannsynlig. I nærvær av LiNO_3 ble reaksjonsprodukter ikke observert på overflaten av eller rundt de reaktive fasene i alle undersøkte betonger og sammensatte prøver laget av sementlim og reaktive partikler. Et lag av godt krystallisert Li_2SiO_3 er observert på overflaten av obsidian og en rekke reaktive tilslagspartikler, men følgende nedsenking i en LiOH oppløsning ved 350°C i autoklaven (også ved 80°C i obsidian). Imidlertid, i nærvær av LiNO_3 , har et (svært tynt) lag av en slik litium-bærende silikat bare blitt observert ved overflaten av kalsedon partikler nedsenket i $\text{NaOH} + \text{LiNO}_3$ løsninger ved 80°C . Den beskyttende karakter av dette laget er tvilsomt, mens et tydelig ikke-beskyttende lag av et amorf reaksjonsprodukt er kun observert ved overflaten av opal partikler nedsenket i de samme løsninger.

Mekanisme D (ikke ekspansiv krystallinsk produkt) er også vurdert som lite sannsynlig. I nærvær av LiNO_3 ble krystallinske reaksjonsprodukter ikke observert i noen av de undersøkte betonger og sammensatte prøver laget av sementlim og reaktive partikler. Faktisk, i nærvær av LiNO_3 , som nettopp nevnt, ble en sannsynlig ikke ekspansiv krystallinsk reaksjonsprodukt (dvs. Li_2SiO_3) bare påvist i små mengder på overflaten av ureagerte kalsedon partikler nedsenket i $\text{NaOH} + \text{LiNO}_3$ løsninger ved 80°C .

Mekanisme E (ikke-, til mindre ekspansiv amorf gel) er også usannsynlig. Denne mekanismen er sterkt avkrefet av den direkte undersøkelse av betong prøver som heller foreslår at det eneste reaksjonsproduktet dannes, når LiNO_3 er tilstede i utilstrekkelige mengder/dosering, inneholder

litium, ser ut som klassisk ASR gel, og er ekspansiv også. Faktisk ble et amorft reaksjonsprodukt i form av en finfordelt hvitaktig produkt observert hos noen immersionstester, men dets ikke- eller mindre ekspansiv karakter er ukjent.

Mekanisme B (økt kjemisk stabilitet av reaktiv silika skyldes andre årsak enn pH-reduksjon eller tidlig dannelse av et beskyttende belegg) er mekanismen blant alle de undersøkt i denne studien som synes å best forklare effektiviteten av LiNO_3 til å forhindre ASR, og variasjonene i denne effektiviteten (dvs. grad av ekspansjon reduksjon) fra et reaktiv tilslag til et annet. Denne mekanismen er sterkt støttet av de fakta som: (1), en amorf gel inneholder Na, K, og Si, og sannsynligvis også Li (usynlig under SEM), var den eneste typen reaksjonsproduktet observert i betong prøver som omfatter LiNO_3 og en rekke naturlige reaktive tilslagsmaterialer, (2), denne gelen ser nøyaktig ut som den klassiske ASR gel og dens mengde var proporsjonal med betong ekspansjon som ble oppnådd. For eksempel, for alle betonger laget med LiNO_3 og viste begrenset ekspansjon, ble ingen eller bare spor av reaksjon gel observert, og (3), de mest reaktive materialer som ble testet, inkludert alle de 8 naturlige reaktive tilslagsmaterialer, oppløst mye mindre i NaOH, LiNO_3 + (og LiOH) løsninger enn i NaOH kontrolløsning.

6.3 Laboratorie studier i bruken av litium for å kontrollere ASR

Dette kapitlet er basert på FHWA-HRT-06073²⁸ og Feng et al., 2005⁵³. Det gir en oversikt over forskning inntil 2006 på å bruken av litium for å kontrollere ASR, som begynner med den innledende forskningen utført av McCoy og Caldwell (1951)²⁹ og går videre til senere studier. De fleste av laboratoriene (og felt-stasjoner) på denne tiden (2006), så på litium som iblanding i fersk betong. Kun begrenset informasjon finnes om etter-behandling med litium på herdet betong for å redusere ytterligere ekspansjon.

Etter de tidlige resultatene som ble presentert av McCoy og Caldwell (1951)²⁹, tok det omtrent 40 år før forskning på kontroll av ASR med litium-forbindelser fortsatt, med unntak av arbeidet som ble utført av Lawrence og Vivian (1961)³⁰. En rekke studier ble igangsatt i slutten av 1980 og begynnelsen av 1990-tallet, og nyere studier har blitt gjennomført eller pågår fortsatt. Flere av disse studiene er beskrevet kort i det etterfølgende. De fleste av disse undersøkelsene har brukt mørtel-prisme metoden ASTM C 227 som metode for å teste litium, men noen av de nyere undersøkelser har også brukt betong-prisme metode - CPT (ASTM C 1293), og en modifisert versjon av den akselererte mørtel-prisme testen (ASTM C 1260).

Ohama, et al. (1989)⁵⁴ undersøkte bruken av $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, LiF, og Li_2CO_3 i mørtel prismer som inneholdt opalin amorf silika som det reaktive tilslaget. Mørtelprismene ble herdet i 1 dag ved 20°C og 100 prosent relativ fuktighet og deretter utsatt for autoklav herding ved 128°C under et trykk på 2,5 kgf/cm² i 4 timer, hvorefter prismene ble avkjølt tilbake til 20 °C og ekspansjon målt. Iblanding av Li_2CO_3 redusert ekspansjonen noe, mens LiF og $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ved 0,5 prosent og 0,7 prosent (basert på masse av sement), redusert ekspansjon til omtrent halvparten av kontroll-ekspansjonen. Disse ekstreme forhold med høy

temperatur autoklaving, gjør det vanskelig å sammenligne resultatene med andre laboratorieundersøkelser.

Betydelig forskning er utført i *Strategisk Highway Research Program* i USA (SHRP) med litiumforbindelser for å kontrollere ASR, med de relevante funnene rapportert av Stark (1992)³⁴ og Stark, et al. (1993)⁵⁵. På grunn av det store omfanget i SHRP studiene blir bare utvalgte aspekter av studiene omtalt her. Stark og hans kolleger produserte og testet mørtel-prismer i henhold til ASTM C 227, ved hjelp av LiF og Li₂CO₃ og bekreftet effekten av litium i å undertrykke ASR ekspansjonen, forutsatt at en høy nok dosering ble brukt. I Tabell 1 oppsummeres resultatene av disse testene, som brukte et svært reaktivt naturlig tilslag (rhyolitt). Ekspansjonen ble i hovedsak styrt på molforhold (litium til natrium pluss kalium) på 0,6 for LiF og 0,92 for Li₂CO₃.

Tabell 1. Virkninger av litium-forbindelser på mørtel-prisme ekspansjon, ASTM C 227 (Stark, 1992)³⁴.

Litium forbindelse	Dosering av litium forbindelse (per masse av sement, %)	Molforhold (Li/(Na+K))	Ekspansjon etter 1 år (%)	Relativ ekspansjon sammenlignet med kontrollgruppen (%)	Ekspansjon etter 3 år (%)	Relativ ekspansjon sammenlignet med kontrollgruppen (%)
Kontroll	0	0	0.62	100	0.63	100
LiF	0.25	0.3	0.59	95	0.71	112
	0.50	0.6	0.06	10	0.06	10
	1.00	1.2	0.02	3	0.02	3
Li ₂ CO ₃	0	0.23	0.61	98	0.63	100
	0.25	0.46	0.50	81	0.58	92
	0.50	0.92	0.04	6	0.05	10

Når man testet (ASTM C 1260) svært reaktive rhyolitt og mindre reaktiv granitt/gneis, Stark, et al. (1993)⁵⁵ ble det rapportert at molforhold i området på 0,75 til 1, var nødvendig for tilstrekkelig å kunne undertrykke ekspansjonen. Stark et al. (1993)⁵⁵ anerkjente også en pessimisme effekt, hvor høyere doser av litium faktisk ville kunne øke ekspansjonen. Dette ble tilskrevet en økning i alkalitet (OH⁻ konsentrasjon) av pore løsningen, som er utløst ved tilsetning av litium (spesielt LiOH).

I en mørtel-prisme test (ASTM C 227), rapporterte Diamond og Ong (1992)⁴³ at en vesentlig del av litium (> 40 prosent), som ble tilsatt til en fersk betong under blandingen, ble raskt fjernet fra løsningen. Litium ble absorbert fra porevæsken av sementpastaen. Denne absorpsjon var større for litium enn for natrium eller kalium. (Li/(Na + K)), der molforhold 1,2 var nødvendig for å undertrykke ekspansjonsmuligheter for mørtel som inneholder kristobalitt som det reaktive tilslaget. Samme dosering var imidlertid ikke nok til å undertrykke ekspansjonen av lignende prizmer som inneholdt beltane opal som det reaktive tilslaget. Mengden av litium som kreves for å undertrykke ASR-indusert ekspansjon var høyere for denne studien enn for andre publiserte studier, selv om årsakene til denne forskjellen er ikke klart. Diamond og Ong (1992)⁴³ bekreftet pessimisme oppførsel av litium som observert av Stark (1992)³⁴.

Qinghan, et al. (1995)⁵⁶ testet mørtel-prismer (4x4x16 cm) som inneholdt reaktive andesite tilslag med litium iblandet som LiNO₂ (Litium nitrat). Mørtel-prismene ble herdet i 1 dag ved 20°C og deretter i en autoklav under et trykk på 0,28 MPa i 4 timer. Etter at de var fjernet fra autoklaven, ble prismene

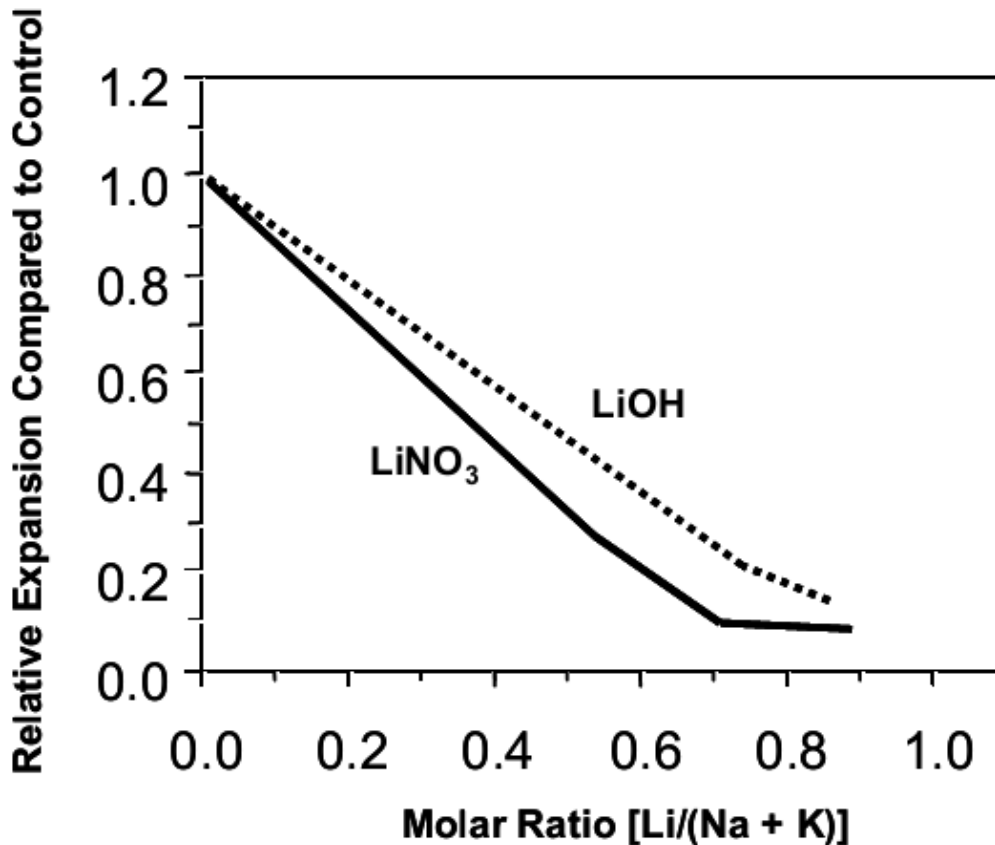
plassert i en herdingsbeholder ved 20°C i fire måneder, og deretter ved økt temperatur (40°C) for langsiktige målinger. Et Li/Na molforhold på 0,8 reduserte ekspansjonen signifikant for mørtel med svært høye alkali innhold ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq.}} > 2\%$).

Lumley (1997)³⁵ brukte betong-prisme tester (ASTM C 1293) for å teste effektiviteten av $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, LiF , og Li_2CO_3 til å redusere ekspansjon grunnet ASR. I disse testene ble reaktivt tilslag brukt med forskjellig mengde tilsatt av litium doser. Resultatene var i tråd med hva som har blitt publiserte i litteraturen, noe som tyder på at et forhold mellom ekvivalent Li_2O til ekvivalent Na_2O av 0,33 til 1 (etter masse) eller en $[\text{Li}]/[\text{Na} + \text{K}]$ molforhold 0,62 var nok til å stoppe ekspansjonen.

Trenden de siste årene har vært en fokus på LiNO_3 som foretrukket litium-forbindelse for å kontrollere ASR. Stokes, et al. (1997)⁵⁷ rapporterte at en stor fordel med LiNO_3 fremfor andre litium-forbindelser er at LiNO_3 ikke øker pH til pore løsningen, og dermed å eliminere risikoen for at pessimum virkning som beskrevet av Stark et al. (1993)⁵⁵. En annen viktig fordel med å bruke LiNO_3 som et tilsetningsstoff er at det er nærmere en nøytral pH enn andre litium-forbindelser, noe som gjør det sikrere å behandle.

Bérubé, et al. (2004)⁵⁸ studerte påvirkning av LiNO_3 og Li-bærende glass på pore løsning i lav-og høy-alkali sement pastaer, lagret i lukkede beholdere ved temperaturer på 23, 38 eller 60°C. Blandinger med Li glasset, Li^+ konsentrasjon av pore oppløsningen ble funnet å øke med tid, temperatur, glass finhet, og Na^+ og K^+ konsentrasjon. Imidlertid ble litium utlekket ved en langsom hastighet, mens pH i pore oppløsningen økte svakt, noe som kan forklare den begrensede effektivitet av litium glasset testet i kontrollerende ASR ekspansjon (Tremblay et al., 2004b)⁴⁰. Bruken av LiNO_3 resulterte i en liten reduksjon i pH av pore løsningen. Det ble også funnet at litium i LiNO_3 -bærende systemer ble innlemmet i sement hydrater i større andeler enn natrium og kalium, med natrium blir alltid inkorporert i større andeler enn kalium, selv i fravær av litium. For alle blandinger innlemmer LiNO_3 , vil $[\text{Li}]/[\text{Na} + \text{K}]$ molforholdet i pore løsningen være vanligvis mellom 0,30 og 0,45 (dvs. tilsvarende bare omtrent halvparten av den opprinnelige mengden (0,74) innført i systemet).

En omfattende studie ble iverksatt ved *Building Research Establishment* i Storbritannia (BRE) i 1994 på litium-forbindelser (LiOH og LiNO_3) for å kontrollere ASR. Blackwell, et al. (1997)⁵⁹ rapporterte foreløpige resultater og Thomas, et al. (2000)⁶⁰ ga oppdateringer om status for disse prosjektene. Disse studiene inkluderte over 150 betong blandinger, laboratorietester (med ASTM C 1260 og ASTM C 1293), og eksponeringsblokk testing på en feltstasjon som lå i Storbritannia. Programmet involverte bruk av flere reaktive britiske tilslagsmaterialer og inkludert også bruken av flyveaske og slagg. Figur 6 oppsummerer tre-års ekspansjon data til betong-prismer for det mest reaktive tilslaget. Litium til alkali molforhold på ca 0,70 var tilstrekkelig for å kontrollere ekspansjon ved bruk LiNO_3 , og en høyere dose, på ca 0,85 var nødvendig for LiOH , hovedsakelig på grunn av virkningen av LiOH på pore løsning pH. Studiet illustrerte også at effekten av litium i å redusere ekspansjonen er en sterk funksjon av tilslagstype og at ved hjelp av lav-kalsium flyveaske i forbindelse med litium økte reduksjonen.



Figur 6. Relativ ekspansjon av betong prismer som inneholder lithium forbindelser, fra FHWA 2006²⁸.

Diamond (1999)³⁷ ga ytterligere innsikt i LiNO₃ rolle til å undertrykke ASR-indusert ekspansjon. Utpresset pore løsning fra sementpasta ved 23°C i 0,2 til 28 dager, hevet LiNO₃ ikke pH verdiene. Videre ble Li⁺ ioner balansert hovedsakelig av NO₃⁻ ioner og i mindre grad av SO₄²⁻ ioner. Diamond (1999)³⁷ viste at LiNO₃ har tendens til å bli fjernet fra oppløsningen ved hydratiseringsprodukter, tilsvarende det som er tilfelle også for andre litium-forbindelser, og dermed redusere litium tilgjengelig i å undertrykke ASR ekspansjon.

Collins, et al. (2004)⁶¹ studerte effekten av tre ulike litium tilsetningsstoffer (LiNO₃, LiCl, og LiOH) og hvordan de virket inn på ekspansjonen av mørtel-prismer (ASTM C 227). Mens det ble påvist at alle litium tilsetningsstoffer var effektive i å redusere ekspansjonen under kritiske grenser, ble det rapportert ulike terskelverdier for doseringer av ([Li₂O]/[Na₂O_e]) for hver additiv (dvs. ca 0,6 for LiOH, 0,8 for LiNO₃, og 0,9 for LiCl).

Durand (2000)⁶² presenterte resultater av omfattende testing ved bruk av LiOH, Li₂CO₃, LiF og LiNO₃ i betong-prismer i henhold til CSA A23.2-14A (tilsvarende ASTM C 1293). Tre kanadiske reaktive tilslagsmaterialer (fra Sudbury, Potsdam, og Sherbrooke) ble anvendt i forbindelse med forskjellige doseringer av de fire litium-forbindelser. Resultatene indikerer at et molforhold [Li]/[Na + K] på 0,83 var nødvendig for å undertrykke ekspansjon (under 0,04 prosent ved 2 år) for LiOH • H₂O, LiF og Li₂CO₃ ved bruk av Sudbury tilslag. Et molforhold på 0,72 ble funnet å være tilstrekkelig når man bruker LiNO₃ med Sudbury tilslaget. Ingen av litium-forbindelsene, selv når de brukes på de høyeste doser (1,66 molart

forhold for $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, LiF , Li_2CO_3 og 0,72 for LiNO_3), var i stand til å redusere tilstrekkelig ekspansjonen av betong som inneholder Sherbrooke tilslag (en metamorf skifer). De eneste litium-forbindelser (og doser) som gir tilstrekkelig kontroll av ekspansjon i betongen som inneholder Potsdam sandstein var $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ og LiF , på molare forhold 1.66. Disse funnene bekrefter at mengden av litium som kreves for å undertrykke ekspansjon avhenger sterkt av tilslaget reaktivitet og også på den spesifikke litium-forbindelsen som brukes.

Thomas, et al. (2001)⁶³ presenterte foreløpige funn fra en omfattende studie med fokus på kombinert bruk av litium og flyveaske for å kontrollere ASR. Testing ble utført ved hjelp av ASTM C 227 og ASTM C 441, ved hjelp av et svært reaktiv tilslag fra New Mexico, og Pyrex glass. I tillegg ble en modifisert versjon av ASTM C 1260 brukt til å undersøke ulike kombinasjoner av litium nitrat (30 prosent oppløsning), seks flyveasker og tre typer av sement. ASTM C 1260 ble modifisert ved tilsetning av LiNO_3 til 1N NaOH løsning for å oppnå det samme litium-alkalimetall forholdet som brukes i mørtel blandingen. Imidlertid har nyere upubliserte studier indikert at resultatene av denne modifiserte testmetode ikke korrelerer godt med resultatene av betongekspansjonstesting.

Tremblay, et al. (2004a and b, 2006a)^{64,40,65} presenterte resultater av et omfattende testprogram med LiNO_3 i betong prisme basert på prosedyrene i ASTM C 1293. I denne studien ble det produsert betong-prismer, der det ble brukt 12 ulike kanadiske tilslagsmaterialer, som var moderat til svært reaktive, og av forskjellige petrografiske typer. Det ble benyttet ulike alkali til litium molforhold. Forfatterne fant ut at effektiviteten av LiNO_3 for å kontrollere ASR var relatert mer til den petrografiske typen av tilslaget enn til dets grad av reaktivitet. Basert på en kritisk betong-prisme ekspansjongrense på 0,04 prosent, etter 2 år ved 38°C og RF > 95 prosent, varierte de "effektive" molforhold for LiNO_3 fra 0,56 til 0,74 for seks ulike tilslag, 0,93 til 1,11 for tre tilslag, mens et molforhold på 1,11 (dvs. 150 prosent av standard dose) ble selv funnet utilstrekkelig for tre tilslag (Tabell 2). Tremblay, et al. (2006b)⁶⁶ evaluerte effekten av en modifisert versjon av ASTM C 1260 (ved hjelp av ulike proporsjoner av LiNO_3 i oppløsning, med/uten litium i prismene) på et utvalg av reaktive tilslagsmaterialer av ulike type og grad av reaktivitet fra Nord-Amerika. Deres resultater er vist i Tabell 3, og er kort beskrevet nedenfor:

- Ett års betong-prisme ekspansjon oppnådd for kontroll betongprototyper, utføres i samsvar med Betong-prisme metoden - CPT Metode CSA A23.2-14A (tilsvarer ASTM C 1293).
- Fjorten dagers ekspansjon oppnås for kontroll mørtler, utført i samsvar med:
 - Akselerert mørtel-prisme metode (AMBT) CSA A23.2-25A (tilsvarer ASTM C 1260).
- Minimum molforhold ($[\text{Li}]/[\text{Na} + \text{K}]$) som kreves for å kontrollere ASR ekspansjon basert på CPT data (dvs. ved hjelp av en grense på 0,04 prosent etter 2 års testing ved 38 ° C og RH > 95 prosent).
- Minste molforhold ($[\text{Li}]/[\text{Na} + \text{K}]$) som kreves for å kontrollere ASR ekspansjon basert på modifisert ASTM C 1260 data (ved hjelp av to forskjellige kritiskegrenser, dvs. 0,10 prosent eller 0,08 prosent ekspansjon etter 14 eller 28 dager med neddykking i 1N NaOH-oppløsning ved 80°C, henholdsvis).

Grensen på 0,08 prosent ekspansjon på 28 dager har blitt foreslått av noen som en bedre indikator på forebyggende effekt av litium nitrat til å forebygge ASR. Resultatene i Tabell 3 viser at minimum litium til alkalimetall molforhold kreves fra CPT resultatene varierer fra 0,55 til mer enn 1,11. Basert på

modifiserte ASTM C 1260 resultater, uten litium, ville dette forholdet variere fra henholdsvis 0,23 til mer enn 0,66 og 0,33 til 0,73 ved hjelp av 0,10 prosent ved 14-dag eller 0,08 prosent ved 28-dagers ekspansjon grenser. Når 100 prosent av "standard" litium dosering brukes i prismer, ville ovennevnte forhold variere fra 0,18 til 0,45 og fra 0,28 til 0,65 ved hjelp av nok en gang, henholdsvis 0,10 prosent ved 14-dag eller 0,08 prosent ved 28-dagers utvidelses grenser.

Resultatene i Tabell 3 viser at for de fleste typer tilslag som er testet, og uansett hvilken grense som brukes gjelder:

- Den "modifisert" AMBT som ble anvendt undervurderer signifikant mengden av litium som kreves for å kontrollere ASR i forhold til verdiene ved CPT.
- Det er en ubetydelig forskjell i minimum litium mot alkali molforhold som skal legges til løsningen for å styre ASR ekspansjon (dvs. få ekspansjon ned til mindre enn grensen som brukes) hvorvidt intet litium eller standard dosering (f.eks 100 prosent) tilsettes til mørtel prismer. Det er mengden av litium i løsningen som styrer effekten av litium i den modifiserte ASTM C 1260.

Tatt i betraktning at dersom man måtte bruke minst molforholdet i oppløsningen, som angitt i Tabell 3, å velge doseringen av litium som kreves for å kontrollere ASR ekspansjon med tilslagene valgt, som har blitt foreslått/brukt av noen organisasjoner, ville dette resultere i bruk av litium doser som er betydelig lavere enn de som foreslått fra resultatene av CPT.

Fournier, et al. (2003)⁶⁷ rapporterte fra en studie der man sammenlignet felt og laboratorieundersøkelser vedrørende bruken av supplerende sement materialer (SCM) og litium-baserte tilsetninger for å kontrollere ekspansjon grunnet ASR. Det ble laget ulike betongblandinger som inneholdt tre svært reaktive tilslagsmaterialer av ulik petrografiske art. Betongblandingene ble tilsatt LiOH og LiNO₃ på molare forhold varierende fra 0,74 til 1,11. Med bruk av svært reaktive tilslagsmaterialer av rhyolitt og gråvakke, resulterte bruken av et molforhold på 0,74 til LiOH bare i en svak reduksjon i betong-prisme ekspansjon og betongblokkekspsjon i forhold til kontroll-betongen. Derimot for prøvestykker med et 1,11 molforhold gav dette gode resultater i laboratoriet og gode resultater etter 6 års felt eksponering for blokker. For det svært reaktive tilslaget rhyolitt, resulterte bruken av LiNO₃ ved molforhold på 0,74 eller 0,93 i tilnærmet lik betong-prisme ekspansjon på ca. 0,031 prosent etter 2 år (blandinger uten tilsatt alkalier), men sprekker ble observert etter 6 års felt eksponering for betong-blokken med 0,74 molforhold. I tilfelle med en svært reaktive kiselholdige kalksteinen, ble det påvist at et molforhold på 0,93 for LiNO₃ undertrykt betong-prisme ekspansjon og viste positive resultater etter 6 års felt eksponering.

Qian, et al. (2002)⁶⁸ studerte ekspansjons utviklingen til dolomitt-bærende tilslagsmaterialer i LiOH og KOH løsninger. De fant at litium hydroksyd kunne effektivt undertrykke ASR ekspansjon og fremkalle ACR (alkali-karbonat reaksjon) ekspansjon.

Tabell 2 oppsummerer noen av opplysningene i denne delen vedrørende ulike laboratoriestudier med litium-forbindelser for å kontrollere ASR ekspansjon. Tabellen fokuserer spesielt på sammenligninger mellom dosering av litium for å forhindre ekspansjon og inkluderer ikke kombinert bruk av SCMS med litium.

Andre former for litium enn de som er beskrevet i denne delen har også blitt undersøkt. For eksempel, Thomas and Stokes (1999)⁶⁹ undersøkte mulig bruk av *decrepitated spodumene* (et litium-holdig metall) som et forebyggende tiltak, og rapporterte at materialet var effektive når det ble brukt i tilstrekkelige mengder. Sementovn-studier har også blitt utført ved bruk av dette mineralet som en del av råvaren i sementproduksjon, og dermed produsere en klinker rik på litium (Stokes, et al., 2000a)⁷⁰. En teknologi er utviklet for fremstilling av et litium-holdig glass, som kan brukes som tilsetningsmateriale i betong eller som malt sammen med portlandsement, med det til formål å hindre ekspansjon grunnet ASR (Baxter, 2000). Denne tilnærmingen for å bruke litium-bearing glass har blitt rapportert som et middel for å minimalisere opptaket av litium ved hydratiseringsprodukter, og dermed resulterer i en mer effektiv bruk av den aktive litium-forbindelsen for å kontrollere ASR ekspansjon.

Johnston, et al. (2003)⁷¹ har beskrevet en ny metode for tolkningen av dataene fra ASTM C 1260 basert på en modifikasjon av den kinetiske modellen foreslått av Kolmogorov-Avrami-Mehl-Johnston. Metoden har vist gode tendenser til å gjenkjenne potensial alkali-reaktivitet av visse "utfordrende" tilslag og bestemme forebyggende blandinger som omfatter supplerende sementerende materialer (Johnston, et al., 2003)⁷¹. Imidlertid har metoden ennå ikke blitt anvendt til vurdering av litium-baserte tilsetningsmaterialer for å kontrollere ASR.

Resultatene som er oppsummert i denne delen har utelukkende sett på effekten av litium-forbindelser for å minimalisere ekspansjon grunnet ASR. Imidlertid er det også svært viktig at det ikke er noen uønskede bivirkninger fra ethvert materiale som blir tilsatt i betongen, som kan påvirke andre ferske eller herdet betongs egenskaper. Heldigvis har det vært godt dokumentert at litium-forbindelser som brukes i vanlige doser for å hindre ASR ekspansjon, ikke påvirker andre viktige betong egenskaper. De fleste av de mer nylige undersøkelser har spesielt omhandlet LiNO_3 , da det er den mest vanlige litium-forbindelse som brukes i dag. Studier har vist at fersk betongs egenskaper, eksempelvis luftinnhold, slump og herdetid, og herdet betong egenskaper, som styrke og permeabilitet, ikke endres betydelig ved bruk av LiNO_3 , og at LiNO_3 er kompatibel med andre kjemiske tilsetningsstoffer (Wang, et al., 1994; Wang og Stokes, 1996; McKeen, et al., 2000; Thomas, et al., 2000)^{72,73,74,60}.

Tabell 2. Oppsummering av utvalgte forskningsresultater relatert til litium doser, fra (FHWA-HRT-06-073)²⁸.

Studium	Test metode	Reaktivt tilslag	Litium forbindelse(r)	Minimum molar forhold av (Li)/(Na+K) Nødvendig til å forhindre ekspansjonen*
McCoy og Caldwell (1951)	ASTM C 227	Pyrex glass	LiCl, Li ₂ CO ₃ , LiF, Li ₂ SiO ₃ , LiNO ₃ , Li ₂ SO ₄	0.74
Sakaguchi, et al. (1989)	ASTM C 227	Pyrex glass, pyroxene andesite sand	LiOH*H ₂ O, LiNO ₂ , Li ₂ CO ₃	0.90
Ohama et al. (1989)	Autoclave test	Oplaine amorphous silica	LiOH*H ₂ O, LiF, Li ₂ CO ₃	0.5 % (av massen av sement) for LiF 0.7 % (av massen av sement) for LiOH*H ₂ O
Stark (1992), Stark et al. (1993)	ASTM C 227 ASTM C 1293	Rhyolite Granite/gneiss	LiOH*H ₂ O, LiF, Li ₂ CO ₃	0.6 (LiF) 0.92 (Li ₂ CO ₃) 0.75 – 1.00 (LiOH)
Diamond og Ono (1992)	ASTM C 227	Cristobalite Beltane opal	LiOH	1.2 (for cristobalite, mere for opal)
Qinghan et al. (1995)	Autoclave test	Andesite	LiNO ₂	0.8 (kun for høy-alkali mortars)
Lumley (1997)	ASTM C 1293	Cristobalite	LiOH*H ₂ O, LiF, Li ₂ CO ₃	0.62
Blackwell et al. (1997) Thomas (2000)	ASTM C 1293	Ulike UK tilslag	LiOH, LiNO ₃	0.70 (for LiNO ₃) 0.85 (for LiOH)
Durand (2000)	ASTM C 1293	Kanadiske tilslag (Sudbury: sandstone og quartzwacke, Postdam: silicieous sandstone og Sherbrooke: chlorite schist)	LiOH*H ₂ O, LiF, Li ₂ CO ₃ , LiNO ₃	0.72 (for LiNO ₃ med Sudbury) 0.82 (for LiOH*H ₂ O, LiF og LiCO ₃ med Sudbury)
Collins et al. (2004)	ASTM C 227	Knust, fraksjonert borosilicate glass	LiOH, LiNO ₃ , LiCl	0.6 (LiOH), 0.8 (LiNO ₃), 0.9 (LiCl)
Fournier et al (2004)	ASTM C 1293	Rhyolite (NM), Gråvakke (CON), Silicious limestone (sp)	LiOH (NM, Con), LiNO ₃ (NM, Sp)	LiOH: 1.11 med NM, ~1.0 med Con, LiNO ₃ : ~0.74 med NM, 0.93 med Sp
Tremblay et al. (2004a and b)	ASTM C 1293	Kanadiske tilslag (greywacke-argilite, dolostone, polygenic gravel, rhyolite, siliceous limestone, granite-gneiss)	LiNO ₃	Agg. type (1 år CPT exp. %) molar forhold**: <ul style="list-style-type: none"> • Granite/gneiss (0.029 %): 0.56 • Chlorite schist (0.82 %): > 0.94 • Greywacke/arg. (0.087 %): 0.71 • Dolostone (0.100 %): 0.61 • Gravel (0.101 %): 0.58 • Gravel (0.103 %): 0.91 • Gravel (0.113 %): 0.97 • Gravel (0.122 %): 0.66 • Greywacke (0.142 %): >1.11 • Gravel (rhyolite) (0.151 %): 0.63 • Siliceous limestone (0.162 %): 1.04 • Siliceous limestone (0.199 %): > 1.11

* Molar forhold er brukt hvis ikke merket annet.

** Informasjonen gitt omfatter tilslaget (bergarts) type, betong-prisme ekspansjon på 1 år for kontroll ASTM C 1293 betong (data i parentes) og minimum molarforholdet for å undertrykke ekspansjon (dvs. å redusere konkret prisme utvidelse til <0,04% ved 2 år i henhold til vanlig praksis CSA A23.2-28A).

Tabell 3. Sammenligning mellom betong-prisme test (CPT) og akselerert mørtel-prisme test (AMBT) resultater for å bestemme effekten av litium-baserte tilsetningsstoffer for å kontrollere ekspansjon, fra (FHWA-HRT-06-073)²⁸.

Tilslagstyper	Ekspansjon for kontroll eksemplarer		Minimum (Li/(Na+K)) som kreves for å kontrollere ASR ekspansjon				
	ASTM C 1293 exp. (%) @ 1 år	ASTM C 1260 exp. (%) @ 14 dager	Modifisert ASTM C 1293 ^I	0 % litium i prisme ^{II}		100 % litium i prisme ^{III}	
				Grense 0.10 % @ 14 dager	Grense 0.08 % @ 28 dager	Grense 0.10 % @ 14 dager	Grense 0.08 % @ 28 dager
Granitt/gneiss	0.029	0.197	0.56	0.23	0.33	0.18	0.28
Kloritt skifer	0.082	0.138	> 0.94	0.24	0.45	0.25	0.42
Gråvakke/argillite	0.087	0.295	0.71	0.35	0.55	0.31	0.52
Grus (blandet)	0.103	0.232	0.97	0.48	0.66	0.40	0.55
Grus (blandet)	0.113	0.224	0.91	0.49	0.73	0.45	0.65
Grus (blandet)	0.122	0.238	0.66	0.30	0.43	0.21	0.30
Grus (blandet)	0.131	0.375	0.58	0.48	0.56	0.27	0.41
Gråvakke	0.142	0.273	> 1.11	0.41	0.68	0.39	0.61
Rhyolitt	0.151	0.414	0.63	0.25	0.45	0.21	NA
Silifisert kalkstein	0.162	0.305	1.04	0.52	0.65	0.42	NA
Silifisert kalkstein	0.199	0.246	> 1.11	0.32	0.52	0.25	0.40
Grus (vulkansk)	0.212	0.966	0.74	>> 0.60	>> 0.60	0.45	0.59
Sand (cherty)	0.590	0.656	0.55	0.63	0.70	0.36	0.47

^I Minimum molforhold ($[\text{Li}]/[\text{Na} + \text{K}]$) som kreves for å bli godkjent ihht kritisk grense etter 2-år; 0,04 prosent betong prisme ekspansjon grense (som per CSA Standard Practice A23.2-28A).

^{II} Minste molforhold ($[\text{Li}]/[\text{Na} + \text{K}]$) som kreves i 1N NaOH løsningen for å bli godkjent ihht enten 14-dagers grense; 0,10 prosent eller 28-dagers grense; 0,08 prosent akselererte mørtel prisme ekspansjons grenser, som per modifisert ASTM C 1260 (0 prosent litium i prismene).

^{III} Minste molforhold ($[\text{Li}]/[\text{Na} + \text{K}]$) som kreves i 1N NaOH løsningen for å bli godkjent ihht enten 14-dagers grense; 0,10 prosent eller 28-dagers grense; 0,08 prosent akselererte mørtel prisme ekspansjons grenser, som per modifisert ASTM C 1260 (100 prosent av en standard dose av litium i prismene).

Kim og Olek (2012)⁷⁵ studerte påvirkningen av litium-ioner på kjemien i pore løsninger i sementpastaer og mørtel med ikke-reaktive tilslagmaterialer. De registrerte betydelig tap av Li^+ -ioner i tidlige stadier av hydratiseringen og på samspillet mellom Li^+ -ioner og hydratiseringsprodukter i sement slurry og ikke-reaktive tilslager i mørtelen. Spesifikt, ble virkningene av følgende parametere på tap av Li^+ -ioner beskrevet: a) Tidspunktet for litium innføring i sementslurry systemet (ved 0, 1 og 2 dager etter blanding av sement og vann), og (for mørtel systemer): b) Dosering av litium nitrat (0 til 1,48 av litium til alkali molforhold), c) vann-til-sement-forhold (0,42, 0,47, 0,49 og 0,55), d) herding temperatur (23 °C, 38 °C og 55 °C) og e) lengde til herdetiden (opptil 40 dager).

I denne studien ble det benyttet to typer høy-alkalisk portlandsement (C1 og C2). Et ikke-reaktiv tilslag (ASTM C 778-standard Ottawa gradert sand) ble anvendt for å fremstille mørtel prøver. Den spesifikke vekten til Ottawa sand var 2,65 og dens vannabsorpsjon var 0,0%. Reagenskvalitet litium nitrat (LiNO_3) ble anvendt som kilden til Li^+ -ioner.

Poreløsninger hentet fra en rekke blandinger ble analysert for å utvikle bedre forståelse av samspillet mellom litium-ioner og andre ioner til stede i poreløsningen. Det ble kommet frem til tilfølgende konklusjoner fra resultatene som ble oppnådd i løpet av studiet:

- Det har blitt vist at tidlig tap av Li^+ ioner fra pore løøsning er et resultat av deres innlemmelse i å danne hydratiseringsprodukter, og er ikke et resultatet av sorpsjon av eksisterende hydrater.
- Omtrent halvparten (50 ~ 60%) av de opprinnelig tilsatt Li^+ -ioner fjernes fra pore oppløsning etter ca to dagers hydratisering, uavhengig av den opprinnelige mengden. Videre vil prosentandel tapt Li^+ være konstant i blandinger fremstilt med samme v/s forhold. Imidlertid vil denne prosenten synke med økning i v/s forholdet.
- De justerte konsentrasjoner av OH-ioner i pore løøsningene har en tendens til å avta noe når LiNO_3 iblandes. I tillegg, justert konsentrasjon av både Na^+ og K^+ ioner økes noe med en økning i doseringen av LiNO_3 . Imidlertid, de samlede virkninger av LiNO_3 på pore løøsningens sammensetning (Na^+ , K^+ og OH^-) ser ikke ut til være betydelig.

Feng et al. (2005)⁵³ gjorde en kritisk gjennomgang av studier som omhandlet litiumsalter evner til å motvirke ASR i betong. Mesteparten av denne oversikten dekkes av FHWA-HTR-06-073 rapporten²⁸, der listen over forskningsarbeidet som ble dekket i denne artikkelen er presentert i Tabell 4.

De viktigste konklusjonene fra denne gjennomgangen, var:

- Litiumsalter reagerer med silika for å danne et litium som inneholder gel produktet i fravær av andre alkalier, men denne gelen produserer ikke ekspansjon i mørtel-prismer eller betong tester;
- Når litium er til stede med andre alkalieformene, så vil reaksjonsproduktet, enten krystallinsk eller i gel-fase, avhenger signifikant av litium dosering og kan også variere med plassering og tid.

Tabell 4. Oppsummering av funn vedrørende litiumsalters evner til å motvirke ASR ekspansjon, fra Feng et al. (2005)⁵³.

Studier	Test metoder	Reaktive tilslagsmaterialer	v/s forhold etter masse	Total Na ₂ Oe %, etter masse	Litium salt(er) studiert	Minimum Litium til alkali molarforhold
McCoy og Caldwell*	ASTM C 227	Pyrex glass		1.15	LiCl, LiF, Li ₂ CO ₃ Li ₂ SiO ₃ , Li ₂ SO ₄ , LiNO ₃	0.74
Lawrence og Vivian	ASTM C 227	Opaline rock	0.5	0.5-1.5	LiOH	0.9
Sakaguchi et al.*	ASTM C 227	Pyrex glass Andesitt sand		0.8-1.0	LiOH*H ₂ O, LiNO ₂ , Li ₂ CO ₃ LiOH*H ₂ O	0.9
Stark*	ASTM C 227	Andesitt		1.2	LiF, Li ₂ CO ₃	0.67 (LiF), 0.92 (Li ₂ CO ₃)
Stark et al.*	ASTM C P 214	Rhyolitt Granitt gneiss			LiOH*H ₂ O	0.75-1.0 (LiOH)
Diamond og Ong*	ASTM C 227	Christobalite Beltane opal	0.485 0.485	1	LiOH LiOH	1.2 (christobalite, mer for opal)
Durand*	ASTM C 1293	Sudbury Potsdam Sherbrooke	0.405	1	LiOH*H ₂ O, LiF, Li ₂ O ₃ , LiNO ₃	Med Sudbury: 0.72 for LiNO ₃ , 0.82 for de tre andre
Lane	ASTM C 1260 ASTM C 1293	Pyrex glass Kvarts	0.5	0.75-1.25	LiOH*H ₂ O, LiNO ₃	0.925 for LiNO ₃
Lumley*	ASTM C 1293	Christobalite	0.37	0.86-1.13	LiOH*H ₂ O, LiF, Li ₂ CO ₃	0.62
Thomas et al.*	ASTM C 1293	UK tilslag			LiOH*H ₂ O, LiNO ₃	0.74 for LiNO ₃ 0.85 for LiOH*H ₂ O
Collins et al.*	ASTM C 227	Borosilicate glass	0.37	1	LiOH, LiCl, LiNO ₃	0.6 for LiOH, 0.9 for LiCl, 0.8 for LiNO ₃
Kawamura et al.	ASTM C 227	Calcined flint	0.55	1.12	LiOH, Li ₂ CO ₃	0.75 M
Berra et al.	ASTM C 1293	Siliceous tilslager	0.44	2.3-9 kg/m ³	LiNO ₃ , Li ₂ CO ₃	
Ohama et al.*	Autoclave	Opaline amorphous silica	0.63-0.78	2	LiOH*H ₂ O, LiF, Li ₂ CO ₃	0.5% wt for LiF 0.7% wt for LiOH*H ₂ O
Bian et al.	Autoclave	Andesite sand	0.5-3.5	0.5-3.5	LiF, LiCl, LiBr, LiNO ₃ , LiOH	0.8
Mo et al.	Autoclave	Mikrokrystallin kvarts	1.5-3	1.5-3	LiOH*H ₂ O	≥ 0.3 for Na ₂ Oe ≤ 2.5% ≥ 0.6 for Na ₂ Oe = 3%

* Se FHWA-HTR-06-073 rapporten²⁸

6.3.1 Mengden av litium som kreves for å motvirke ASR ekspansjon (FHWA-HRT-06-133)⁷⁶

Mengden av litium som kreves for å motvirke ekspansjon avhenger av formen av litium, type reaktivt tilslaget, og mengden av alkalier i betongen. Mange studier har vist at ekspansjonen av betong for et bestemt tilslag avhenger av mengden av litium i forhold til mengden av natrium pluss kalium i mørtel eller betongblanding. Dette har ført til bruk av molforholdet $[Li]/[Na + K]$ for å uttrykke litium dosen i mørtel og betong blandinger, der $[Li]$ er antall mol av litium og $[Na + K]$ er summen av mol natrium pluss mol kalium tilstede i blandingen.

McCoy og Caldwell's (1951)²⁹ sine data viste at ekspansjon var i stor grad eliminert dersom litium til natrium-plus-kalium forholdet var lik eller større enn 0,74, dvs. $[Li]/[Na + K] \geq 0,74$. En rekke nyere

laboratoriestudier har bekreftet dette funnet, og $[Li]/[Na + K] = 0,74$ har blitt "standard dose" for å kontrollere ASR i betong som inneholder reaktive tilslag. Det ble også foreslått at omtrent halvparten av den mengde av litium ville være bundet under sement hydratiseringen og det foreslår et forhold på 0,37.

Blant forskjellige litium-forbindelser som potensielt kan brukes som tilsetningsstoffer for å kontrollere ASR er det litium nitrat ($LiNO_3$) som anses å være det mest effektive. Den viktigste fordelene med $LiNO_3$ over andre lithium-forbindelser er at den ikke øker konsentrasjonen av hydroxyioner (OH^-) i pore løsningen, og dermed eliminerer pessimismen av andre lithium forbindelser²⁸. I tillegg er $LiNO_3$ kompatibel med andre kjemiske tilsetninger og har ikke betydelig påvirkning på slike egenskaper som betongstyrke, elektrisk motstand, uttørking, svinn og fryse/tine motstand²⁸.

Bulteel (2012)⁷⁷ studerte påvirkning av litium-forbindelser og Li/Na forhold på endringer i mekanismen av ASR ved å bruke modell reaktorer med chert tilslag, portlandite og blanding av forskjellige forhold: $LiOH/NaOH$ eller $LiNO_3$ eller $LiCl/NaOH$. Vha. Den modellbaserte reaktoren ble prøver herdet ved $80^\circ C$ i 168 timer med konstant høy hydroksyl konsentrasjon (0,79 mol/L), noe som gav de mest gunstige betingelser for å utvikle ASR og direkte sammenligne effektene av forskjellige blandinger. Sammenligningen var basert på konsistens av grad av kjemiske og fysiske reaksjoner som viste fordel å være konkrete og kvantitative målinger av ASR. Resultatene førte til følgende konklusjoner:

- Hemmende virkning av litium ion skjedde ikke progressivt med økning av litium-ion innhold i modell reaktoren, men presenterte en terskel effekt. I forholdene som ble studert i denne artikkelen, var terskelverdien nær til 0,43 Li/Na-forhold.
- Over terskelverdi, var den hemmende rollen av litium ion på å motvirke ASR effektiv, og nitrat og klorid ioner for litiumsalter hadde ikke noen påvirkning på mekanismen.
- Under terskelverdi, mistet litium ioner den hemmende effekten svært raskt. ASR utviklet seg mye for Li/Na forhold fra 0,4 til 0,3 i tilfelle $LiOH/NaOH$ løsningen. Når $LiNO_3$ eller $LiCl$ ble brukt, begrenset nitrat og klorid ioner effektiviteten av litium i henhold til reduksjonen av Li / Na-forhold. Intervallet var 0,4 til 0,2.

6.4 Litium tilsatt i fersk betong, konkrete studier

Følgende kapittel er basert på FHWA-HRT-06-073 rapport²⁸.

6.4.1 Testområde Lomas Boulevard, Albuquerque, NM, USA

Denne lokaliteten ble bygget som et eksperimentelt veidekke i juni 1992, bestående av den vestgående banen til en bro som ender av Lomas Boulevard (State Route 352) over amerikanske Interstate 40 i Albuquerque, New Mexico. Det tre-felts test veidekket er 155 m langt og 11 m bredt. Elleve ulike betong blandinger ble brukt for å konstruere veidekket, for å vurdere ulike metoder for å forebygge ASR. Reaktiv tilslag (sand og grus) fra to lokale kilder; Shakespeare og Placitas, ble anvendt, i den ferske betongen, i kombinasjon med enten flygeaske eller $LiOH$ som oppsummert i Tabell 5.

Tabell 5. Oppsummering av blandinger brukt i Lomas Boulevard eksperimentelle veidekke.

Kilde for reaktiv tilslag	Miks Nr.	Forebyggende tiltak
Shakespeare	1	1.0 % LiOH
	2	0.5 % LiOH
	3	Lomar™ admixture
	4	Klasse F Flyveaske
	5	Klasse C Flyveaske
	6	Ingen (kontroll)
	7	Blanding av klasse F and C Flyveaske
Placitas	8	Klasse F Flyveaske
	9	Ingen (kontroll)
	10	1.00 % LiOH
	11	Klasse C Fly Aske

Det totale sementbaserte bindemidlet i betongblandingene var normert til 395 kg/m³ med fem av blandingene inneholdene flyaske ved et nominelt utskiftingsnivå på 20 prosent. Sementen ble rapportert å ha et alkali-innhold på ca 0,55 prosent Na₂O_e (Stark et al., 1993)⁵⁵. Vann/bindemiddel i disse blandingene (v/b) var generelt i området på 0,40.

Litium ble tilsatt som et tørt pulver av litiumhydroksidmonohydrat (LiOH • H₂O) og dosert i mengder på enten 0,5 prosent eller 1,0 prosent, basert på massen av portlandsement. Forutsatt at alkali innholdet i sementen var 0,55 prosent Na₂O_e gir disse litium doseringene da litium-alkali molare forhold [Li]/[Na + K] = 0,67 og 1,34 i betongen med henholdsvis 0,5 prosent og 1,0 prosent LiOH • H₂O.

For å sikre tilstrekkelig dispergering av LiOH • H₂O pulver ble blandevannet og passende dose av pulver plassert i betongblandebilen kvelden før betongen ble plassert. Bruken av LiOH hadde ingen merkbar effekt på slump eller luftinnholdet i betongen, og det påvirket heller ikke utstøpingen eller etterbehandling-operasjoner til betongen.

Etter utstøpingen av det eksperimentelle veidekket ble tilslagene testet i kombinasjon med flyaske og lav-alkali sement (0,18 prosent Na₂O_e) med bruk av den akselerert mørtel-prisme testen (ASTM C 1260) hvilket gav resultatene som vist i Tabell 6. Tilslag-LiOH kombinasjoner ble testet med ASTM C 227, men ingen data fra disse testene har blitt rapportert. Testdata i Tabell 6 bekrefter den høye reaktivitet av både tilslaget og den dårligere ytelse av klasse C flyveaske sammenlignet med klasse F flyaske i kontrollerende ekspansjon.

Tabell 6. Resultater fra ASTM C 1260 test (Stark, et al., 1993)⁵⁵.

Kilde for reaktiv Tilslag	Flyeaske	Ekspansjon (%)	
		7 days	14 days
Shakespeare	Ingen	0.580	
	Ingen	0.502	
	Klasse C	0.405	
	Klasse F og C	0.052	0.125
	Klasse F	0.017	0.045
Placitas	Ingen	0.575	
	Ingen	0.511	
	Klasse C	0.400	
	Klasse F	0.015	0.055

6.4.1.1 Feltundersøkelse på 2. – 3. år

Betongkjerner ble tatt fra forskjellige seksjoner etter 2 og 3 år, og ble testet for å bestemme elastisk (statisk) modulus. Resultatene fra disse testene, indikerte ingen tegn på progressiv forverring (dvs. det var ingen reduksjon i modulus mellom 2 og 3 år), selv om statisk modulus av betongen med klasse C flyveaske og Shakespeare tilslag (blanding nr. 5) var vesentlig lavere enn de andre blandinger.

På kjerner som ble tatt ut etter 2 år ble det også gjennomført begrenset petrografiske analyse. Bare betong som inneholder klasse C flyveaske viste noen visuelle tegn på skade når prøver ble vurdert under et stereo-mikroskop.

6.4.1.2 Feltundersøkelse etter 4. år

Flere kjerner ble tatt i 1996 og på disse prøvene ble det gjennomført detaljerte petrografiske undersøkelser. Tynn-slip mikroskopi og farvings-teknikker ved hjelp uranyl acetat og Los Alamos National Laboratory (LANL) farving (staining) ble brukt sammen med visuelle observasjoner av reagerte tilslagspartikler, mengde gel og skader i form av riss og mikrosprekking.

Generelt viste blandinger som inneholdt klasse C flyveaske flest tegn på reaktivitet, og blandinger som inneholdt LiOH viste minst tegn på reaktivitet. Imidlertid var observasjonene rapportert hovedsak kvalitativ, og det var ikke mulig å gi en mer objektiv rangering av effekten til de forskjellige blandinger.

6.4.1.3 Feltundersøkelse etter 7. – 9. år

Flere visuelle inspeksjoner av området ble gjort i februar 1999 og april 2001. Betydelige sprekkdannelse var tydelig, både i kontroll-delen og i den delen med klasse C flyveaske, og omfanget av skader som syntes å være vesentlig var mer alvorlig i flyaske betongen. Betong seksjoner som inneholdt klasse F flyveaske eller 1% LiOH • H₂O syntes å være i god stand, med lite synlig sprekker i overflaten i en alder av 7 år. Imidlertid 2 år senere, dukket det opp noen sprekkdannelse på overflaten av flyveasken betongen nær kanten av platen hvor det lå en sage-fuge.

6.4.1.4 Kort oppsummering

Oppsummert virker det som at betongblandinger som inneholder LiOH (begge doser), sammen med svært reaktive New Mexico tilslagsmateriale, ser ut til å være i god tilstand etter 10 år. Selv om bare små forskjeller ble observert mellom det visuelle utseendet på disse betong blandinger og de som inneholder ca 20% av en klasse F flyaske, virker det som at litium har vært litt mer effektiv i å kontrollere sprekkdannelse.

6.4.2 Testområde Lackawanna Valley motorvei, PA, USA

Lackawanna Valley motorvei er en ny firefelts motorvei bygget i mai 1997 i Lackawanna fylke i nordøstlige Pennsylvania, USA. En seksjon av denne motorveien ble konstruert ved bruk av reaktiv gråvake tilslag, høy-alkaliske sement og ulike forebyggende tiltak for å vurdere SHRP anbefalingene for kontroll av ASR (Thomson og Stokes, 1999; Thomson, 2000)^{78,79}.

Tolv forskjellige betong blandinger ble brukt i konstruksjonen av den eksperimentelle delen, en av disse var en kontroll blanding med høy alkali sement (0,86 prosent Na_2O_e) og i de resterende 11 blandinger ble det brukt forskjellige tilnærminger for å forhindre skadelig ekspansjon. De forebyggende tiltakene er oppsummert i Tabell 7. De forskjellige forebyggende systemer ble testet ved hjelp av Pyrex mørtel-prisme test (ASTM C 441) og den akselererte mørtel-prisme testen (ASTM C 1260), og testresultatene er inkludert i Tabell 7.

Testdata i Tabell 7 viser tydelig en indikasjon at de grove og fine tilslagsmaterialene er potensielt reaktive og viser at bruken av tilstrekkelig nivå av litium, flyaske eller slagg er alle effektive i å kontrollere skadelige ekspansjon. Merk at den akselererte mørtel-prisme testen (ASTM C 1260), slik den finnes i sin standard form, er ikke egnet for det formålet å evaluere litium eller lav-alkali sement.

Tabell 7. Oppsummering av blandinger og ekspansjons data som brukes i Lackawanna Valley motorvei dekke eksperiment (Thomson, 2000)⁷⁹.

Blanding #	Forebyggende tiltak	ASTM C 441	ASTM C 1260	
			Grove tilslag	Fine tilslag
1	Ingen (kontroll)	0.432	0.402	0.257
2	LiOH: (Li)/(Na+K) = 0.75	0.014		
3	LiOH: (Li)/(Na+K) = 1.00	0.014		
4	LiOH: (Li)/(Na+K) = 1.25	0.011		
5	Lav-alkali sement (0.37 % Na_2O_e)	0.299		
6	25 % GGBF Slag	0.187	0.301	0.127
7	40 % GGBF Slag	0.026	0.113	0.034
8	50 % GGBF Slag	0.024	0.065	0.016
9	15 % Klasse F Flyveaske	0.239	0.247	0.074
10	20 % Klasse F Flyveaske	0.221	0.156	0.046
11	25 % Klasse F Flyveaske	0.155	0.101	0.017
12	15 % Klasse F Flyveaske + LiOH med (Li)/(Na+K) = 0.75	0.008		

Detaljert visuell inspeksjon av det eksperimentelle veidekket er gjennomført periodisk. Det har utviklet seg noe, meget fine krakeleringer i blandingen med 15 % F flyveaske, så vel som for flere andre blandinger etter 4 år. Men ellers er mesteparten av betongen i generell god stand etter denne tiden. Tilstanden på betong blir også overvåket og inspisert ved hjelp av en ekko-teknikk, der det ikke har skjedd vesentlig endring i respons-resultatene frem til nå.

6.4.3 Testområde U.S. I-90, Oacoma, SD, USA

I juni 1996, erstattet South Dakota Department of Transportation (DOT), USA, en 13,36 km lang asfalt veistrekning med et kontinuerlig armert betong veidekke. Det ble benyttet en høy-reaktiv sand og en langsomreagerende kvartsitt som det groveste tilslaget, i en serie av 14 forskjellige betongblandinger som omfatter ulike tiltak for å regulere ekspansjon på grunn av ASR (Johnston, 2001)⁸⁰. Detaljer av blandinger er oppsummert i Tabell 8.

Sementen som ble brukt i alle blandinger var Type V lav alkali (0,55 prosent Na_2O_e) sement. LiOH og LiNO_3 ble tilsatt som vannbaserte løsninger som inneholder 8,75 % LiOH og 30 % LiNO_3 masseprosent. Materialet *Decrepitated spodumene* representerer et mellomstadium i litium utvinning prosessen av

metallet *spodumene*. Spodumenmetallet er normalt knust og brent i en ovn til "løse opp" litium før dets utvinning. Materialet på dette stadiet er kjent som degradert mineral og er i utgangspunktet en amorf alumino-silikat som inneholder betydelige mengder litium. En detaljert beskrivelse av materialet og dens effekt for å kontrollere ASR i laboratorietester ble presentert av Thomas og Stokes (1999)⁷⁸.

Tabell 8. Oppsummering av blandinger som brukes i I-90 Oacoma eksperimentell veidekke²⁸.

Blanding #	Sementbasert materiale (kg/m ³)		Forebyggende tiltak	
	Type V sement	Klasse F flyveaske	Type	Dosering (L/m ³)
1	356		LiOH løsning	9.90
2	356		LiOH løsning	12.87
3	356		LiOH løsning	15.84
4	356		LiNO ₃ løsning	4.95
5	356		LiNO ₃ løsning	7.43
6	356		LiNO ₃ løsning	9.90
7	356		LiNO ₃ løsning	12.38
8	303	66.4	LiNO ₃ løsning	2.48
9	303	66.4	LiNO ₃ løsning n	4.95
10	356		Decrepitated spodumene	10.9 kg
11	356		Decrepitated spodumene	21.8 kg
12	303	66.4	Decrepitated spodumene	10.9 kg
13	356			
14	303	66.4		

Prøve-seksjoner har blitt overvåket ved hjelp av visuell undersøkelse, ekko-målinger, og målinger av elastisitetsmodul (på kjerner). Betongen syntes å være i god tilstand når den ble kontrollert i juni 2001 (etter 5 år), og det er ikke registrert noen endringer i in-situ målingene, eller i den statiske modulus av kjerneprøver.

6.4.4 Testområde Coyote Springs Bro, NM, USA

En relativt kort bru, ble bygget i 1999, med svært reaktive tilslag fra Placitas steinbruddet nær Albuquerque, New Mexico. Betongen ble produsert med en kombinasjon av klasse F flyveaske og litium.

Under en inspeksjon av broen i august 2001 (etter 2 år), ble sprekkdannelse observert på overflaten av brudekket. Selv om denne typen tilfeldig opprissing med tilhørende fuktig avfarging av sprekker ofte blir observert på betongkonstruksjoner som er utsatt for ASR, er denne observasjonen ikke en pålitelig diagnose for å kunne dokumentere ASR. Slike sprekker og opprissing kan dannes grunnet andre prosesser, for eksempel plastisk svinn under bygging eller tørke-svinn i de tidlige stadier av betongens eksponering. Om konstruksjonen er utsatt for ASR kan kun bestemmes ved petrografisk undersøkelse av betongprøver, prøvetatt fra konstruksjonen.

To kjerner ble tatt fra konstruksjonen for petrografiske analyser og kjemiske analyse for å bestemme litium innholdet. Gjennomsnittlig litiuminnhold ble bestemt til å være 0,0097 og 0,0101 prosent for de to kjernene. Dette tilsvarer en dose på mellom 6,5 til 7,0 liter litium LiNO₃ løsning per kubikkmeter betong, forutsatt at løsningen er 30 % LiNO₃.

Den petrografiske analysen avdekket noen mindre tilfeller på mikro-oppsprekking på noen av tilslagpartiklene og reaksjon-soner rundt andre tilslags-partikler, men det var ingen indikasjon på en ekspansiv reaksjon som kunne føre til interne mikro-sprekkdannelse i betongen. For å kunne fastslå om ASR har ført til oppsprekking av betongen krever bevis av ekspansiv reaksjon, dvs. forekomst av eksempelvis gel som gir direkte bevis for reaksjon og produksjon av ekspansive krefter. Det er også vanlig å observere reaktive tilslagpartikler som viser sprekkdannelse internt eller sprekker som går fra sementpasta inn i tilslagpartikler. Sprekkene kan være helt eller delvis fylt med gel. Ingen slike funn ble observert i de avsnittene som ble undersøkt i dette prosjektet. Faktisk ble det funnet svært få sprekker i sementpastaen, og disse ble i hovedsak begrenset til den eksponerte overflaten av betongen. Kuleformede flyveaske partikler ble funnet i sementpastaen, men det ble ikke forsøkt å kvantifisere nivået av dette. Det ble fastslått at videre overvåking er nødvendig for å fastslå om det er progressiv forverring av konstruksjonen grunnet ASR.

6.4.5 Testområde Bro dekke, Wilmington, DE, USA

Delaware (DE) Department of Transportation (DOT) spesifiserte bruken av LiNO_3 i betong for å reparere et korrosjonsskadet betongbrudekket i Wilmington, DE året 1999. Kontrakten involverte fjerning av betongen ned til oversiden av armeringsstålet og plassere et tett, lav-permeabilitet betonglag inneholdende 7 % silikastøv. Betongbruen hadde også skader grunnet ASR, og det var bekymring for at ny betong kunne gi en ekstra kilde av alkali som kunne bidra til videre reaksjon i eksisterende betong. Sementen som var tilgjengelig i Delaware har vanligvis et høyt alkaliinnhold. Litium nitrate løsning (30 % LiNO_3) ble sprøytet på fersk utfrest overflate før støping av nytt betonglag og det ble også brukt som et tilsetningsstoff i betonglaget. Sanden som ble brukt i betonglaget var moderat reaktiv. Filosofien med denne tilnærmingen er å gi tilstrekkelig litium til å kunne kontrollere ASR i betonglaget og i eksisterende betong. Sistnevnte oppnås ved direkte lokal bruk av LiNO_3 løsningen på gammel betongoverflate, men også ved migrasjon av litium fra betonglaget ned i underlaget. Selv om effektiviteten av penetrasjon ikke er kjent, er det håp om at tilstrekkelig litium vil kunne trenge inn for å kontrollere skadelige reaksjoner ved grenseflaten mellom den gamle og den nye betongen, og dermed redusere risikoen for lagdeling mellom disse to betongene. Det foreligger pr. idag ikke resultater med hensyn til virkning av litium for å kontrollere ASR.

6.4.6 Testområde Bro dekke, Lyman County, SD, USA

Litium nitrate løsningen ble spesifisert av South Dakota (SD) DOT som en blanding for en rekke betong brodekker som ble utstøpt under reparasjon av en 20,9 km lang strekning av motorveien i Lyman County, SD i 2000. I tillegg inneholdt en mørtel som ble brukt mellom gammel og nye betong også LiNO_3 . Litium ble brukt av de samme grunnene som de diskutert i forrige avsnitt (Brodekke i Delaware).

Betongdekke ble produsert ved hjelp av en lav-alkali sement, klasse F flyveaske og $7,43 \text{ L/m}^3$ av 30 % LiNO_3 løsning, og både sand og grovt tilslag var alkali reaktiv. Som med brodekket støpt i Delaware, hadde innblandingen av LiNO_3 i selve betongblandingen ingen merkbar innvirkning på betongens egenskaper eller utstøping av betongen.

6.4.7 Testområde høyspenntmaster, Corpus Christi, TX, USA

Litium nitrat ble brukt på fundamenter for høyspenntmaster som ble konstruert for en 40,2 km lang overføringslinje nær Corpus Christi, Texas i 2000. På grunn av potensialet for reaktivitet i tilslagene i området var en viss grad av ASR kontroll nødvendig, og de tilgjengelige alternativene for entreprenøren var å bruke litium, klasse F flyveaske, eller importere reaktive tilslag. Litium ble valgt, siden kvaliteten og tilgjengeligheten av flyveaske i regionen var tvilsom, og kostnadene forbundet med transport av ikke reaktive tilslagsmaterialer var for høye. Betongblandingen inneholdt lav alkali sement og 8,42 L/m³ av 30 % LiNO₃ løsningen sammen med middels reaktive grove og fine tilslag. Det foreligger ikke pr. idag resultater med hensyn til virkning av litium for å kontrollere ASR.

6.4.8 Testområde reparasjon av Platte Winner broen, SD, USA

Reparasjon av toppen av Platte Winner broen i South Dakota ble nødvendig etter en alvorlig skade som ble forårsaket av kraftig is-last under en vinterstorm i 1997. Reparasjonen ble utført i 1998.

Betongen og injiseringsmassen som ble brukt for reparasjon ble spesifisert å inneholde LiNO₃ løsning for å hindre ASR i den nye betongen, og for å gi en kilde av litium til den eksisterende betong. Betongblandingen inneholdt lav alkali sement, en flyveaske med et middels kalsiuminnhold og 7,43 L/m³ av 30 prosent LiNO₃ løsning, sammen med langsomt reaktive grovt tilslag, samt høyt reaktivt fint tilslag. Reparasjonbetong måtte pumpes over 60,9 m horisontalt og deretter ned 9,1 m fra brodekket. Bruken av litium blandingen påvirket ikke betongegenskapene negativt, og ble funnet å være kompatibel med andre tilsetningsstoffer. Det foreligger ikke pr. idag resultater med hensyn til virkning av litium for å kontrollere ASR.

6.5 Litium i eksisterende betongkonstruksjoner

Dette kapittelet er i hovedsak basert på FHWA-HRT-06-073²⁸, Cosh (2009)⁸¹ og Whitmore (2009)⁸²

Hittil har anvendelsen av litium i betong, som allerede er utsatt for ASR, vært mest utført og testet i felten og/eller i forbindelse med demonstrasjonsprosjekter. Studier av å bruke litium til betongkonstruksjoner dateres tilbake til midten/slutten av nittitallet. Det finnes flere metoder som har vært benyttet i forbindelse med å innføre litium-forbindelser inn i selve betongkonstruksjoner.

Disse er:

- Overflatebehandling
- Vakum impregnering
- Elektrokjemisk migrasjon

I det følgende kapittelet vil de mest kjente felt- og demonstrasjonsprosjekter bli beskrevet. De fleste av disse områdene er lokalisert i USA og er under ansvaret til FHWA i USA. I denne rapporten er det forsøkt å klassifisere disse områdene/prosjekter ut fra de fremgangsmåtene som ble anvendt. Denne klassifiseringen kan være litt komplisert når ulike metoder brukes innenfor samme område.

Tidligere, ble effekten av litium hovedsakelig bedømt visuelt ved å sammenligne betong seksjoner som hadde blitt behandlet med litium med seksjoner som ikke hadde blitt behandlet med litium. Ikke-destruktive teknikker ble også brukt for å få tilgang til strukturelle integriteten av ulike betong seksjoner. I dag er den vanligste fremgangsmåten som brukes til å få informasjon om effekten av litium i betongkonstruksjoner, å måle dybdepenetrering av litium i betongen. For å gjennomføre denne evalueringen, er det viktig å vite hvor mye litium som er nødvendig for å kontrollere ASR ekspansjon. I denne forbindelse presenterte Folliard et al. (2012)⁸³ følgende eksempel:

"Forutsatt en vanlig betongblanding inneholdene 3 kg/m³ Na₂O_e, en "standard dose" 30% litium nitrat løsning (4,6 L av løsningen per 1 kg av Na₂O_e) vil utgjøre 13,8 L/m³ av litium nitratopløsning. Denne dosen av LiNO₃ oppløsning inneholder 504 g Li, og man antar at halvparten av dette litium blir bundet i tidlige hydratiseringsprodukter (som er godt dokumentert i litteraturen). Da vil ca 250 g av litium per m³ forbli i betongen disponibel for å bekjempe ASR. Hvis man forutsetter en betong densitet 2350 kg/m³, da vil konsentrasjonen av litium-ioner i pore løsningen være omtrent 100 ppm, og denne konsentrasjonen vil være nok til å kontrollere ekspansjon når den brukes som et tilsetningsstoff. Imidlertid bør det bemerkes at "standard dose" av 30% litium nitrat-oppløsning (4,6 L av løsning per 1 kg Na₂O_e) har blitt rapportert til å være tilstrekkelig til å kontrollere ekspansjonen i omtrent halvparten av tilslagene nylig testet i Nord-Amerika [9]. Noen tilslagstyper, spesielt gråvakke, fortsatte med en betraktelig ekspansjon, selv ved bruk av over det dobbelte av "standard dose". Som en forutsetning i denne diskusjonen er det antatt at tilslagsmaterialet i betongen som har blitt behandles, reagerer positivt på litium (4,6 L av løsning per 1 kg Na₂O_e) og at 100 ppm ville være nødvendig i pore løsning for motarbeidelse av skadelig ekspansjon".

Mange testområder var i drift på det tidspunkt da rapporten FHWR-HRT-06-073²⁸ ble publisert. Disse områdene er oppført i Tabell 9..

Tabell 9. Sammendrag av konstrukturer som ble behandlet med litium, fra FHWA-HRT-06-133⁷⁶.

Sted	Konstruksjonstype	Første påføring	Påføringsmengde (L/100 m ²)	Antall påføringer.	Forhold før behandling	Kommentarer til effektivitet
Rt. 14 Wolsey, SD	Veidekke	1995	18.36, 36.72, 55.08	1	Godkjent	Lite synlig forskjell (kontroller og behandlede områder uendret under evalueringsperioden).
I-68, LaVale, MD	Bro dekk	1997	36.72	1	God	Lite synlig forskjell (kontroll og behandlede områder uendret under evalueringsperioden).
Rt. 1, Bear, DE	Veidekke og bro dekk	1998	24.48	6 (2 per år i 3 år)	God til godkjent	På sørenden av prosjektet, behandlet område utvikles bedre enn kontroll-ingen merkbar forskjell på nordenden.
Rt. 15, New Ulm, MN	Veidekke	1998	24.48	1 og 2	Godkjent til dårlig	Behandling nr. 2 gjøres på deler. Ingen merkbar forbedring (kontroll og behandlede område både fortsatte å svekkes omtrent det samme).
I-85, High Point, NC	Veidekke	1999	12.24	1	Godkjent	Ikke evaluert brukt som forsterkning av holdbarheten av asfalt overlegg.
I-84, Mointain Home, ID	Veidekke	2004	24.48	1, 2 og 3	Godkjent til dårlig	For tidlig å fastslå. Pågående overvåking omfatter ekspansjon målinger og sprekke kartlegging.

FHWA etablerte *Alkali-Silica Reactivity Development and Deployment Program* i 2006 og det vil være aktiv fram til 2013. Detaljert beskrivelse av prosjektet kan bli funnet i Ahlstrom (2012)⁸⁴. Programmet er svært omfattende og dekker mange sider av fagområdet ved å begrense skadelig ASR. Bruk av litium ble inkludert som en begrensende faktor i dette programmet. Dette arbeidet ble utført med felt demonstrasjonsprosjekter og i Tabell 10 er listet ni prosjekter der litium ble brukt. Noen av disse prosjektene ble igangsatt etter FHWS litium-implementeringsprogram (Folliard et al. 2008)⁸⁵.

Tabell 10. Liste over demonstrasjonsprosjekter som en del av programmet, fra Thomas et al. (2012)⁸⁶.

Konstruksjon	Sted	Kommentarer
Veidekke	Mountain Home, Idaho	<ul style="list-style-type: none"> Mild til moderat ASR i grovt tilslag (blandet vulkanitter, chert). Behandling utført i 2004: lokal påføring av LiNO₃. Overvåking av ekspansjon og fuktighet i behandlede/kontroll seksjoner.
Motorvei Vei-barrierer	Route 2, Leominster, Massachusetts	<ul style="list-style-type: none"> Moderat til alvorlig ASR i grovt tilslag (Gråvakke) Behandlinger anvendt på flere barrier-seksjoner i 2005: <ul style="list-style-type: none"> Vakuumpregning med LiNO₃ Overflate påføring av silan eller LiNO₃ (med/uten silan) Overvåking av ekspansjon og fuktighet i behandlede/kontroll hindringer.
Bro søyler	I-10 & I-45 veikryss i Houston, Texas	<ul style="list-style-type: none"> Moderat til alvorlig ASR i grovt tilslag (chert, kvartsitt) Behandlinger anvendt i 2006: <ul style="list-style-type: none"> Litium behandling (vakuumpregning og elektrokjemisk metode) Overflate påføring av silan (sprengt og malte overflater) Overvåking av ekspansjon og fuktighet i behandlede/kontroll søyler.
Veidekke	Route 113, Georgetown, Delaware	<ul style="list-style-type: none"> Moderat ASR (grovt tilslag (skifer, gneis) og sand (chert). Behandling: Overflate påføring av LiNO₃ (2009). Overlagt med asfalt i 2011.
Bro-elementer	I-395, Bangor, Maine	<ul style="list-style-type: none"> Moderat til høy ASR i grovt tilslag (gråvakke/argillite). Behandlinger anvendt i 2010: <ul style="list-style-type: none"> Overflate anvendelser av tetningsmaterialer. Elektrokjemisk migrering (litium) teknikk. Karbon fiber forsterket polymer (CFRP) styrke påkledning. Overvåking av ekspansjon og fuktighet i behandlede / kontroll elementer.
Rekkverk vegger, bro	189, Montpelier, Vermont	<ul style="list-style-type: none"> Moderat ASR i den grove fraksjonen av det fine tilslag (skifer, mikro-kvartsitt, sandstein og argillite). Behandling i 2010: overflate påføring av tetningsmaterialer Overvåking av ekspansjon og fuktighet i behandlede / kontroll vegger.
Betong buer, bro	Wetumpka, Alabama	<ul style="list-style-type: none"> Alvorlig ASR i grovt tilslag (chert, kvartsitt). Behandling gjennomførte i 2010: <ul style="list-style-type: none"> Fylling av store sprekker med fleksibel forsegling. Anvendelse av silan til alle overflater. Bruk av flytende epoxy på topp siden. Overvåking av ekspansjon og fuktighet i behandlede/kontroll buer.
Støttepunkter, støtte- og barrier vegger	Providence, Rhode Island	<ul style="list-style-type: none"> Lav til høy grad av ASR i grove tilslager (gneis, kvartsitt) Behandlinger anvendt i 2012: Overflate påføring av tetningsmaterialer Overvåking av ekspansjon og fuktighet i behandlede / kontroll elementer.
Betong veidekke	Little Rock, Arkansas	<ul style="list-style-type: none"> Moderat ASR i fine tilslag (chert) Behandling gjennomførte i 2012: Overflate påføring av tetningsmaterialer Overvåking av ekspansjon og fuktighet i behandlede/kontrollpaneler.

6.5.1 Overflate påføring

En eventuell suksess av overflatebehandlinger av veidekker og brudekker med litium-forbindelser vil sannsynlig bli påvirket av en rekke parametere, blant andre:

- Hvilken litium forbindelse som brukes.
- Påført mengde.
- Antall behandlinger.
- Temperatur og fuktighet i betongen på tidspunktet for behandlingen.
- Kvalitet av betongen (f.eks permeabilitet).
- Tykkelse av elementet som skal behandles.
- Omfang av nedbryting ved behandlingen.
- Tilstedeværelse av andre nedbryting prosesser (f.eks frysing og tining).

Mange av disse faktorene vil selvfølgelig påvirke mengden av litium som infiltrerer betongen og den effektive dybden av penetrering av litium.

Undersøkelser i laboratorie har indikert at visse former for litium kan utvise en negativ effekt når det brukes som et tilsetningsstoff for fersk betong. Dette fører til økt ekspansjon når et utilstrekkelig nivå av litium er brukt, og effekten er tilskrevet økt pH skyldes bruk av LiOH eller andre litium forbindelser som reagerer med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ for å øke konsentrasjonen av OH-ioner i løsnings (f.eks $2\text{LiCO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{LiOH} + \text{CaCO}_3$). Hvis slike forbindelser blir brukt til å behandle betong, er det en mulighet for at behandlingen kan forverre reaksjonen om bare en liten mengde av forbindelsen penetrerer inn i betongen. Litium nitrat resultere generelt ikke i en økt pH på grunn av den relativt høye oppløselighet av kalsium analoge, dvs. nitrat ioner blir i løsnings til å balansere litium fremfor å reagere med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ for å frigjøre OH-ioner. På grunn av dette, er det anbefalt å benytte bare løsninger av LiNO_3 for aktuelle behandlinger av eksisterende ASR-utsatt betong. Økt penetrasjon kan oppnås ved å innlemme et dertil egnet overflateaktivt middel i oppløsningen (e.g., Stokes, et al., 2000b)⁸⁷.

Med hensyn til påført mengde, er det to ting som bør vurderes:

(1) hvis påføringsmengden er for høy, kan løsningen prelle av den overflaten som skal behandles, noe som resulterer i avfall (og muligens økende miljøutfordringer), og

(2) under visse vilkår, kan løsning fordampe på overflaten, noe som fører til dannelse av LiNO_3 salt på den behandlede overflaten, noe som kan føre til redusert overflatefriksjonen av trafikkerte flater.

Erfaring har indikert at den optimale påføringsmengde for de fleste tilfeller er i området fra 0,16 til 0,40 liter 30 prosent LiNO_3 løsning per kvadratmeter betongoverflate. En rekke andre kontroller kan være nødvendig, og følgende retningslinjer er gjengitt fra en nylig spesifisering:

- Overflaten skal rengjøres før behandling (for eksempel ved å bruke en gatefeie-maskin).
- På tidspunktet for behandlingen av veioverflaten skal den være fri for løs sand, støv, og liknende, men trenger ikke være tørr.

- Behandling skal ikke anvendes i perioder med regn eller dersom regn er ventet i løpet av 6 timer.
- Endelig dekningsgrad av behandlingen skal ikke overstige $0,37 \text{ l/m}^2$
- Anvendt mengde skal justeres til å gi en ensartet overflatedekning slik at materialet ikke renner av overflaten.
- Dersom et hvitt rest-produkt dekker mer enn 5 prosent av den anvendte overflate på grunn av fordampning, skal vann påføres overflaten. Hvis denne utfelling ved overflaten resulterer i en glatt overflate, bør anvendelse av vann fortsette inntil veidekke eller brudekket anses trygt for biltrafikk.
- Leverandør og/eller distributør av litium-forbindelsen bør konsulteres i å utvikle og implementere en strategi for sikker og effektiv lokalbehandling av veidekker og bru-dekker.

Antall individuelle behandlinger som kan anvendes på en konstruksjon vil bli styrt av økonomi og andre aspekter ved reparasjons-strategien. For eksempel, dersom konstruksjonen blir behandlet før anvendelsen av en betong eller asfalt belegning, kan det bare være tid for en enkel behandling. For veidekker eller brodekker som forblir utsatt etter behandling, kan flere behandlinger vurderes etter passende mellomrom. Som et eksempel ble behandlingen av State Route 1 i Delaware gjennomført med totalt seks individuelle behandlinger over en 3-års periode.

Det forventes at betong med en høy permeabilitet som har vært utsatt for lange perioder med tørking før behandlingen vil lettere absorbere løsningen som påføres overflaten. Tilsvarende vil en tynn betong med et høyt overflateareal til volum-forhold tillate en større volum av betongen som skal infiltreres av litium forbindelser. Men disse forholdene kan selvfølgelig ikke kontrolleres.

Litium behandling vil bare eventuelt løse problemer knyttet til fremtidig ASR nedbrytning. Åpenbart vil det ikke gjenopprette betongen til sin opprinnelige tilstand, og hvis ASR allerede er til stede er det sannsynlig at dette vil bidra til andre nedbrytende prosesser, for eksempel frysing og tining eller korrosjon (ved tilgangen til kloridioner). Disse problemene må løses separat. Dette kan oppnås ved å forsegle sprekker eller kle inn konstruksjonen.

6.5.1.1 Testområde Rt. 14, Wolsey, SD, USA

En betongvei, som danner en del av US 14 nær Wolsey, South Dakota, ble konstruert i 1981. Det er en tofelts, 185 mm tykk vanlig betongvei med ekspansjons-spalter. Skader på grunn av ASR ble først oppdaget i 1989 og påføring av overflate litium nitrat ble ferdigstilt i oktober 1995. En detaljert beskrivelse av prosjektet er gitt i Johnston, et al. (2000)⁸⁸.

En 30% LiNO_3 oppløsning inneholdende en unik blanding av overflateaktive midler (for å redusere overflatespennings effekter og bistå til penetrasjon) ble påført i en mengde: $0,16 \text{ L/m}^2$. Tre 150 m lange seksjoner ble behandlet henholdsvis; en gang, to ganger eller tre ganger, og oppnådde totalt henholdsvis; $0,16$, $0,32$, og $0,48 \text{ L/m}^2$. Tre deler av samme størrelse forble ubehandlet til sammenligning.

Overvåking av disse delene inkluderte visuell vurdering, modulus testing av kjerner, og stedlige ekko sonderinger. I tillegg, ble det samlet prøver på forskjellige tidspunkter for å bestemme dybden av inntrengning av litium inn i uoppsprukket og oppsprukket betong. Modulus testing indikerte små

signifikante endringer i stivhet av de behandlede eller ubehandlede seksjoner 1-3 år etter behandling. Imidlertid, mellom 3 og 4 år, var det en plutselig økning i elastisitetsmodul (~5-6 GPa) for de behandlede seksjonene. Ingen endring ble derimot observert for kontroll-seksjonene. Ekko målinger derimot, gjennomført 2 år etter påføringen, viste litt reduserte frekvensverdier i de behandlede seksjonene sammenlignet med kontroll-seksjonene, men disse forskjellene kan skyldes små forskjeller i tykkelsen på veidekket. Interessant nok for kontrollseksjonene, var det en signifikant reduksjon i kompresjonsbølgehastigheten beregnet fra støt ekko avlesninger gjort på kjerner i forhold til målinger foretatt på samme sted før prøvetaking. Forskjeller mellom målinger på stedet og på kjernene var mindre for behandlet betong. Denne endring i hastighet ble tilskrevet utløsning av indre spenninger i betongen når kjernene ble fjernet (Johnston, et al., 2000)⁸⁸. Større endringer i de ubehandlede seksjonene kan indikere økt ASR aktivitet og dermed indre stress. Kjemisk analyse for å bestemme litiumkonsentrasjonsprofiler viste liten signifikant inntrengning av litium inn i uoppsprekket betong under overflaten, omtrent 10 mm. Imidlertid ble større mengder av litium målt på dyp 45 mm i betong som var moderat oppsprukket, selv om det ikke var noen sammenheng mellom mengden av litium målt og antall behandlinger.

Johnston, et al. (2000)⁸⁸ konkluderer med at litium ser ut til å ha hatt en positiv effekt ved å redusere nedbrytning grunnet ASR. Det er imidlertid små synlige forskjeller mellom de behandlede og ubehandlede seksjoner på den tiden som har gått, og fortsatt overvåking er nødvendig for å bekrefte disse preliminaire funn.

6.5.1.2 Testområde I-68, LaVale, MD, USA

I 1986 ble dekker og rekkverk til to broer - I-68 over juv i Appalache fjellene i Maryland, erstattet. Bare 10 år senere, ble ASR oppdaget i ny betong i begge konstruksjonene, og litium behandling ble gjennomført i 1997. Behandlingen involverte en enkel overflatepåføring av konstruksjonen for vestgående bane, den andre konstruksjonen ble etterlatt ubehandlet som kontroll. Tilstanden på overflaten av det ubehandlede dekket syntes relativt uendret, og det syntes å ha vært liten endring i utseendet på begge betongene (behandlet og ubehandlet) helt siden behandlingen.

Overflate behandling involverte én omgang ved hjelp av en påføringsmengde på 0,37 L/m² av 30 prosent LiNO₃ løsning. Tre år etter behandlingen, var det lite synlig forskjell mellom tilstanden av de behandlede og ubehandlede seksjoner. I tillegg til visuelle observasjoner av betong, er ekko overvåking gjennomført periodisk.

6.5.1.3 Testområde Rt. 1, Bear, DE, USA

En 6,43-km del av Route 1 i nærheten av Bear, Delaware, bygget i 1990, begynte å vise tegn på ASR bare 7 år etter bygging. Behandling av to deler av det berørte veidekke begynte i 1998. En av delene var på den sørlige enden og en på den nordlige enden av prosjektet og kontroll seksjoner ble satt til side for hvert prosjekt. Behandlingen involverte i alt seks sprøyte påføringer (to per år), hver med en mengde på 0,24 L/m² med 30 % LiNO₃ løsning.

En av de ubehandlede delene av prosjektet har gjennomgått akselerert forverring i de siste årene (2006) spesielt i nærheten av kontroll-fugene. Derfor har hyppig oppdatering og delvis grundige

reparasjoner av fugene vært nødvendig på denne delen. To behandlede seksjoner og den andre kontroll delen har krevd færre reparasjoner.

Tiltross for forskjeller i visuelle utseende i den behandlede og ubehandlede betong, har liten forskjell i oppførselen til betongen vært oppdaget i den fysiske testingen (modul og ekko).

6.5.1.4 Testområde I-84 Mountain Home, ID, USA

I september 2004 ble en 5 km del av motorveien på I-84 i Mountain Home, Idaho, behandlet med 30 % LiNO_3 løsning med en mengde på $0,24 \text{ L/m}^2$. Behandlet og kontroll-seksjoner ble overvåket med sprekke kartlegging og overvåking av lengde endringer. Overflatedekket var svært glatte umiddelbart etter påføring av litium og litt salt-krystaller ble observert å ha skilt seg ut av oppløsningen. Det ble besluttet å anvende vann ca 1 time etter behandling for å gjenoppløs saltet slik at dette kunne trenge inn i betongen. En ytterligere vann påføringen ble nødvendig før veidekket ble åpnet for trafikk.

I mai 2005 ble andre påføring utført der om lag to tredeler av tidligere behandlede veidekke ble behandlet med litium. I denne andre påføringen, ble anvendt mengde på $0,23 \text{ L/m}^2$, som er bare litt mindre enn det produsenten anbefaler. Utkrystallisering av salt fra litiumet gjorde det nødvendig å vanne veidekket seks ganger. Vannmengden som ble tilført var på $0,18 \text{ L/m}^2$. Dette resulterte i en jevn overflate behandling av vann med ingen synlige avrenning.

Den tredje anvendelse av litium nitrat ble brukt til omtrent en tredjedel av opprinnelig behandlet veidekke i september 2005. Seksjonen for litium-påføringen ble bestemt og påfølgende måling og overvåking av de tidligere instrumenterte og sprekkekartlagte veidekker ble gjennomført. Påføringsmengden var planlagt å være $0,12 \text{ L/m}^2$, men etter beregninger ble mengden justert til mellom $0,089$ til $0,10 \text{ L/m}^2$. Mindre utsalting av litium oppstod som sammenlignet med andre litium behandling. Etter dette ble ingen etter-behandling med vann nødvendig. Trafikken ble gjenåpnet på den behandlede delen samme dag. Dette resulterte i en jevn overflatebehandling av litium-løsning med ingen synlige avrenning.

Overvåking inkluderte å ta kjerneprøver for å etablere dybde av litium penetrasjon og fastslå omfanget av skade ved hjelp petrografiske analyser og «stiffness damage rating» teknikker (Thomas et al, 2004)⁸⁹. Kjerner ble tatt fra utvalgte veidekke-deler for å bli brukt for litium penetrasjon profilering, samt ytterligere laboratorietesting (potensielt modifisert ASTM 1293 C, «stiffness damage rating» testing). I de fleste tilfeller, falt litium konsentrasjonen under $0,25 \text{ kg/m}^3$ (100 ppm) på dyp større enn 5 mm, og i alle tilfeller unntatt 3 er litiumkonsentrasjonen under halvparten av den verdi ved en dybde på 10 mm (Cosh, 2009)⁸¹.

6.5.1.5 Testområde motorvei, støpte kantsteiner, MA, USA

Støpte kantsteiner på en motorvei i nærheten av Leominster Massachusetts (rett utenfor Boston) viste signifikant tegn på ASR etter bare noen få år i med tydelige tegn på ASR-indusert krakkelering og sprekke dannelse.

Total 24 støpte kantsteiner (ca 3 m lengde hver stein) ble overflate behandlet av en entreprenør med forskjellige produkter, inkludert 30 % litium nitrat oppløsning, to silan-baserte produkter (40% silan innhold der resten er enten vann eller løsningsmiddel) og en litium silikat produkt. Disse

belegg/forseglinger ble påført manuelt alt fra en til fire ganger over en 24-timers periode som, med hver behandling bestående av en påføringsmengde på $0,1 \text{ L/m}^2$. Lithium nitrat ble også brukt av vakuum til utvalgte kantsteiner. Med vakuum holdes trykket i enten 0,25 time eller 7,25 timer. En undergruppe av disse kantsteinene som ble behandlet med vakuumimpregnering ble deretter behandlet med 40% silan (løsemiddelbasert) mengde på $0,2 \text{ l/m}^2$. East⁹⁰ gir en detaljert oversikt over den første felt evalueringen, felt-testing og overvåkningsprogram og parallell laboratorietesting av kjerner hentet fra de ulike delene av kansteinene.

Prøvene som hadde blitt behandlet med vakuumimpregnering metoder samt å være sprøytet med litium nitrat 1, 2 eller 4 ganger. Vakuumimpregnerings behandlingen forbedret signifikant penetrasjon av behandlingsoppløsningen i den ytre overflate. Lithium innholdet i overflate behandlet betong faller under $0,25 \text{ kg/m}^3$ (100 ppm) ved dybder under 2-3 mm og er på bakgrunnsnivå ved dybder som er større enn 5-8 mm.

6.5.1.6 Testområde UNB og Texas

Kjerner ble tatt fra I-84 behandlede veidekker i Idaho (FHWA-HRT-06-133)⁷⁶ og området nær Leominster, Massachusetts (see Thomas et al. 2012)⁸⁶. Begge konstruksjonene hadde blitt overflate behandlet med litium nitrat løsninger. Store blokker (30 X 90 cm plan seksjoner) ble kuttet fra I-84 veidekket i Idaho og brakt til et utendørs eksponerings området i UNB (og til en testområde ved University of Texas Austin). Disse prøvene ble overflate behandlet med 30% LiNO_3 løsning på en av tre ulike måter; ukentlig, to ganger årlig eller ikke i det hele tatt. Vinteren 2005, 2006 og 2007 ble de også "behandlet", når is eller snø bygget seg opp, med av-ising salter for å simulere de forholdene som er på motorveien.

Lengde målinger gjennomført på bjelker saget ut fra fra veidekket i Idaho og lagret på UNB feltstatsjons-området viste at bjelkene heller krympet enn å ekspandere tross hyppige anvendelse av avising salter på overflaten. Bjelkene synes ikke å være under ytterligere ekspansjon eller nedbrytning på grunn av ASR.

Tre utendørs eksponerings blokker (med totalt alkali innhold på $5,25 \text{ kg/m}^3$) ble støpt i Austin i Texas, inneholdende et svært reaktivt tilslag fra El Paso, Texas (Jobe). Alle blokker ble belagt på sidene med en Bituthene-basert forsegling slik at bare toppen og bunnen av blokkene var uforseglet. En blokk ble sprayet kontinuerlig på overflaten i totalt 240 dager med 30 % litium nitratopløsning.

En annen blokk ble behandlet 32 ganger på toppflaten i løpet av 240 dager, hvor hver behandling var bestående av en påføringsmengde på $0,16 \text{ L/m}^2$. Siste blokken forble ubehandlet for kontroll. Hensikten med dette studiet var å kvantifisere de potensielle fordelene ved overflate påføring av litium under de mest gunstige (ennå urealistiske) forhold, spesielt kontinuerlig vætet eller ukentlig behandling over en åtte måneders periode. Ideen var å bestemme beste scenario for påføring av litium. Disse testene er pågående, og dyppet av litium penetrasjon er ennå ikke blitt bestemt, men data om utvidelse av blokkene er presentert her.

Ekspansjonsresultater viser at blokken som ble behandlet 32 ganger over en 240-dagers periode viste hovedsakelig den samme ekspansjon som kontrollblokken. Interessant nok har den blokken som ble kontinuerlig sprayet for 240 dager med litium nitrat løsning ekspandert betydelig mer enn kontroll

blokken. Ytterligere arbeid pågår for å studere dette nærmere, og mekanismene som er ansvarlig for denne økte ekspansjonen er ikke fullt ut forstått. Det kan være mulig at gjennom kontinuerlig spraying, var litium nitrat i stand til å hindre ekspansjon nær øvre overflate av blokken som var i kontakt med oppløsningen, mens betongen under denne øvre del fortsatte å ekspandere på samme tid. Det er mulig at en mer markert gradient mellom den høyt ekspansiv kjernen av blokken og den mindre ekspansiv overflaten av blokken resulterte i flere strekkspenninger på overflaten, noe som resulterer i mer alvorlige sprekker og ekspansjon. Disse blokkene blir fortsatt overvåket for ekspansjon og sprekker, og derfor er det foreløpig ikke foretatt kjernetaking for å måle litium profiler.

6.5.1.7 Testområde flyplass dekke.

Et feltstudie i å redusere ASR i eksisterende flyplassdekke ved å påføre litium ble presentert av Whitmore (2009)⁸². I dette studiet evalueres effekten av overflate påførte litiumsalter for å forhindre forverring av alkalireaksjoner i et flyplassdekke i betong. Hensikten med dette arbeidet var å evaluere evnen av litium saltoppløsninger til å forlenge den funksjonelle levetiden til eksisterende flyplassdekke.

Valg av lokaliteter besto av tre flyplasser i geografisk og geologisk ulike områder av landet. Flyplassene var: Cheyenne Regional Airport, Wyoming, Phoenix Sky Harbor, Arizona og Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport, Atlanta. Disse flyplassene var ulike både mhht eksponeringer samt miljøforhold.

Litium ble påført i fullskala i en mengde på 0,18 L/m² som ville gi en indikasjon av den totale effekten og gi en bedre indikasjon på forlengelse av levetid som kan forventes. Dette arbeidet ble utført i løpet av 2005 og 2006.

Det er vanskelig å konkludere om overflate påføringen av litium var vellykket i å redusere ASR i de testede flyplassdekkene. Gjennomtrengingen var liten og derfor kan denne behandling ikke forvente å gi skadebegrensning til hele tykkelsen av betongdekket. I noen av test områdene var litium/alkali forholdet over en teoretisk terskel på 0,37 nær overflaten. På andre test områder oppnådde ikke litium/alkali forholdet 0.37.

6.5.2 Vakum impregnering

Vakumimpregnering er et alternativ til injeksjon. Forfatterne av FHWA-HRT 06-073²⁸ rapporten kjente til tre konstruksjoner i USA som har vært behandlet ved hjelp av denne teknikken i 2006. Disse strukturene var:

- De vertikale bjelker og søyler på en konstruksjon som bærer bruen; New Jersey Turnpike over Hackensack elven i New Jersey som ble behandlet med vakumimpregnering i 2004. En 30 % LiNO₃ oppløsning ble påført i en mengde på 1,6 L/m² gjennom et vakum opprettet under et stålplate 1,2 x 2,4 m i størrelse. Doseringen av LiNO₃ var målrettet for å gi en konsentrasjon på 100 ppm gjennom den fulle dybden av elementene.
- I 2003 var en rekke elementer på Prospect Avenue viadukten i Johnstown, Pennsylvania, vakum impregnert med 30 prosent LiNO₃ løsning med en dose på 0,41 L/m², et samlet areal på 474 m².
- Sommeren 2004 ble en serie på fem ASR-skaddede strekk-armerte betongbjelker, som hadde blitt avvist fra et Texas DOT prosjekt på grunn av sprekke dannelse (bekreftet av petrografi å være

et resultat av ASR), behandlet med ulike strategier for å kontrollere fremtidig ekspansjon. Behandlingsalternativer inkluderte en enkel applikasjon av litium nitrat løsning påført med vakum impregnering og en overflate påføring av litium nitrat påført ved fire separate anledninger. Bjelkene ble instrumenterte med mekanisk, vibrerende-tråd og fiberoptiske strekkålere og innebygd relative fuktighet sonde. Dataovervåking ble planlagt til å være pågående til høsten 2008.

Cosh (2009)⁸¹ anvendte vakumimpregnering behandling til en betongplate (0,9 x 0,9 x 0,2 m). Denne skiven var en del av en større undersøkelse, beskrevet et annet sted i denne rapporten. En vakumplate som målte 0,7 x 0,7 m med to konsentriske kamre av likt volum og tykkelse, dermed lik behandlingsareal, ble bygget med utrustning for å oppnå vakum og innføre litium nitrat løsningen. Vakum 0,90 til 0,98 av en atmosfære ble trukket ved behandlingsoverflaten av platen. Dette vakumet ble holdt i 25 til 30 minutter før løsningen ble innført til kammeret og oppløsningen tillatt å trenge inn under atmosfæretrykk. En betongkjerne ble prøvetatt etter hver av to behandlinger.

Etter første behandlingen, ble litium inntrengningsprofilen redusert raskt med økende dybde og minimal tilsynelatende virkning på natrium og kalium konsentrasjoner.

Profilene for den andre behandlingen viser noen uventede resultater. Det er en tydelig effekt på natrium konsentrasjon med et resultat som er lik de elektrokjemisk behandlede prøvene. Mye av konsentrasjonen av natrium i de første 10 mm synes å bli flyttet av behandlingen. Kalium profilene etter hver behandling var tilsvarende variabel. Den andre vakum behandlingen resulterte i økte penetrasjon av litium.

6.5.2.1 Testområde bro-søyler TX, USA

I-10 og I-45 veikrysset i Houston, Texas ble bygget på slutten av 1990-tallet, og ble åpnet for trafikk i 2000. I løpet av de siste 7 årene, har betydelige sprekker utviklet seg i betongsgøylene. Seks moderat skadet og seks alvorlig-skadet søyler (koniske søyler med gjennomsnittlig tverrsnitts dimensjoner på ca 2 x 2 m) ble valgt i et feltforsøk med hovedfokus på litium behandling (vakum og elektrokjemiske metoder).

For vakum impregnerte prøver ble dybden av inntrengning av litium begrenset til det ytterste 10 mm av betongen (Folliard, et al., 2008)⁸⁵.

6.5.3 Elektrokjemiske migrasjon

Elektrokjemisk migrasjon har blitt grundig studert på laboratorieprøver, for det meste av japanske forskere. Det nyeste arbeid er kort beskrevet i følgende avsnitt.

Ueda og Nanasawa (2012)⁹¹ gjennomført en elektrokjemisk studie, hvor Li⁺ ioner inneholdt i litium-baserte elektrolytt løsning på betongoverflaten migreres inn i betong. Migrasjonen ble forårsaket ved elektroforese som oppstår ved anvendelsen av direkte elektrisk potensial for en konstant strøm mellom anode nedsenket i elektrolyttvæsken og stålstang fungerer som katode støpt inn i betongfundamentet.

Ueda et al. (2011)⁹² studerte penetrasjonen av litium i ASR-skadet betong på grunn elektro-osmose av litiumkarbonat løsnings. Denne studien ble gjennomført som en eksperimentell undersøkelse for å fremme den elektrokjemiske penetrasjon av Li^+ og for å hindre ASR-indusert ekspansjon, ved å undersøke elektro-osmose av litiumkarbonat (Li_2CO_3) med forskjellige temperaturer på elektrolytt løsningen under behandling. Denne undersøkelsen ble derfor gjennomført for å få klarhet i den effektive tilstand av elektrokjemisk behandling for akselerert gjennomføringer av Li^+ og dermed forhindre ASR-indusert ekspansjon av betongen. Følgende konklusjoner ble presentert av Ueda og Nanasawa (2012)⁹¹ og Ueda et al. (2011)⁹²:

- Resultatene av elektroforese test med mørtel prøvestykker viste at effektiv diffusjon koeffisient av Li^+ med Li_2CO_3 elektrolytt løsningen var større enn den med LiOH elektrolyttløsning. Videre, i tilfelle av Li_2CO_3 elektrolyttløsning økte effektive diffusjonskoeffisienten av Li^+ tre ganger med endringen av temperaturen fra 20°C til 40°C .
- Høyere temperaturen (40°C) av Li_2CO_3 elektrolyttoppløsningen fremmet bemerkelsesverdig den elektrokjemisk migrasjon av Cl^- og Li^+ inn i betongen, når man sammenlignet med tilfellet med lavere temperaturen (20°C). Som et resultat, oversteg Li/Na molforhold generelt 1,0 i alle prøvestykkene grunnet høyere temperatur behandling, inkludert delen rundt stålstangen.
- Uavhengig av tilstanden av den elektrokjemiske behandling ble betongens ekspansjonshastighet etter behandlingen dempet når man sammenlignet med de ubehandlede tilfellene. Det kan betraktes at ved høy temperatur behandling har risikoen for akselererende betong ekspansjon under selve behandlingen, men det har også den virkning av å fremme litium penetrasjon, som kan forhindre betongens ekspansjon etter behandlingen.

Miyagawa et al. (2012)⁹³ gjennomførte en Li^+ ion trykksatt injeksjon studie. Metoden ble påført laboratorie laget betong eksempler som hadde utvidet med ca 1.500μ strains på grunn av ASR, prøvene var 188 dager gamle. Sprekke bredde på 0,2 til 0,4 mm ble iverksatt. En 40% LiNO_2 (litium nitritt) løsning, tilsvarende Li/Na molforhold 0,4, 0,6 og 0,8, ble deretter presset injisert. ASR ekspansjon fremmende omgivelser var et kammer med en temperatur på 40°C og luftfuktighet på 95 %. Under testen ble ekspansjonsbelastning målt annenhver uke. Ingen videre ekspansjon oppstod opptil 222 dager etter injeksjon, uavhengig av mengden av injisert LiNO_2 . Gel prøver ble tatt fra hver ASR prøve, og billedkartlegging og kvantitativ analyse av fordelingen av Li -ioner ble utført.

Følgende funn ble oppnådd i denne studien:

- Ved å før-blande Li -ioner i betong med en reaktiv tilslag og en Li/Na molforhold på 0,4, ble ASR ekspansjonen undertrykket. Også ved å blande inn Li ioner i ASR-forverret betong med trykksatt injeksjon til et Li/Na molforhold på 0,4, ble ASR ekspansjon etter injeksjonen dempet.
- SEM observasjoner av gelen dannet etter Li ion trykksatt injeksjon viste ingen endring i den fysiske form av gelen grunnet Li^+ -ioner.
- Selv om Li^+ -ioner i gelen ikke kunne påvises ved hjelp av EPMA, var mulig ved hjelp av TOF-SIMS og elementært kartlegging ble utført.

- Elementær kartlegging ved hjelp av EPMA og TOF-SIMS viste at Li ioner introdusert av trykksatt injeksjon er tilstede i gelen. Også, indikerte resultatene av en kvantitativ elementanalyse at Li^+ ioner finnes i en mengde av Li/Na molforhold 0:17-0:21 i gel.

Wang et al. (2012)⁹⁴ introduserte *Accelerated Lithium Migration Teknikk* (ALMT) som var i 2000 med referanse til ASTM C 1202 metoden (RCPT). ALMT bruker elektro kjemi for å hemme ASR, på den ene siden, "akselerert fjerning av fritt Na^+ og K^+ ioner fra betong prøven" for å eliminere den avgjørende faktoren i ASR, på den andre, til å "tvinge Li^+ ioner i prøvestykket til å endre betong egenskaper ", for å hemme ASR (Liu, 2003)⁹⁵.

Laboratorieprøver ble laget med lav alkali sement med 0.51 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ og det ble brukt et meget reaktiv tilslag hentet fra østlige Taiwan. Blandingen av betong ble utført i henhold til ASTM C 1293. Alkaliet av sementen ble justert til 1,25 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ved tilsetning av NaOH. Tilslagets gradering var tilsvarende ASTM C 1293. Vann/sement forholdet var 0.58. En 10 cm med 20 cm betong sylinder prøver ble støpt, og deretter herdet i 23°C, 100 % RH miljø. Etter 28 dager herding, var betong sylindren kuttet til 5 cm høy prøvestykker på den midtre delen for ALMT test.

Denne studien benyttet ASR reaktiv tilslag for å produsere betong sylinder prøver og ble ALMT test utført etter 28 dager herding. Anolytten ble endret under testen, 1N litiumhydroksidmonohydrat, 1N litium nitrat, mettet litiumkarbonat og mettet di-litium tetraborat ble brukt henholdsvis, spenningen og ionekonsentrasjon endring i elektrolysatoren ble målt under elektro behandling. Ion innholdet i prøven ble analysert etter elektro behandling. Og de behandlede prøver ble satt i 38°C, 100 % relativ fuktighet omgivelser for ett år for å måle hevingskapasitets endringen for å evaluere effekten av inhibering ASR.

Følgende konklusjoner ble gjort:

- ALMT med bruk av litium løsninger som anolytten kan fjerne Na^+ som forårsaker ASR problem og foring i Li^+ med hemmende effekt på strekking samtidig.
- Na^+ går inn i katolytten tidligere enn Li^+ fordi det er foran kation migreringsbane i begynnelsen av elektrokjemiske behandlingen. Den innledende fluks av Na^+ er stor, og deretter avtar fluksen gradvis når Na^+ inne prøvene reduseres. Li^+ trenger tid til å passere gjennom prøvestykket, og deretter økes fluksen gradvis.
- Når 1N $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ brukes som anolytten, er den totale mengden av Na^+ fjernet fra prøven på det maksimale, tiden for Li^+ fjerning fra prøven på minimum, den gjennomsnittlige Li/Na molforholdet i de behandlede prøvene på maksimum, og ekspansjon av prøvene etter ett år med akselerert herding på minimum, viser den beste ASR reparasjon effekt som kan oppnås.
- Bruke av 1N $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ som anolytten har fortsatt å overvinne noen problemer, CaCO_3 kan blokkere porene ved slutten av elektrokjemiske behandlingen som øker impedansen, slik at tjeneste spenningen må økes og Li^+ fluksen avtar.

Shayan et al. (2012)⁹⁶ studerte effekten av katodisk beskyttelse (CP) på risikoen for ASR i betong. Bekymringen er at forsterkning av alkalitet av CP strøm kan forverre AAR ekspansjon og sprekker, et omfang som er avhengig av størrelsene på CP strøm tilført. I praksis er strømnivåer på 10-25 mA/m² vanlig, de høyere nivåer for igangkjøring og de lavere nivåene for vedlikehold, selv om det er rapportert at "aktiveringspunkter" kan utvikle seg i enkelte områder, der strømtetthet overgår beregnet nivå.

Denne studien, på bruk av CP strømnivåer som brukes i praksis (5, 10 og 20 mA/m²), ville avklare risikoen for CP tilføring til betongelementer som inneholder et reaktivt tilslag, med og uten klorid forurensning, og om det kan ha negativ innvirkning på AAR ekspansjon og sprekkdannelse i katodisk beskyttet betongelementer.

Prøveelementene brukt i dette arbeidet var seks eksperimentelle, armerte søyler, som måler 300 x 300 x 1100 mm. Detaljer om deres fremstilling og herding regime er tidligere publisert i en studie av alkali-reaktivitet potensial for enkelte betongpeler (Shayan et al., 2006)⁹⁷.

Dette arbeidet viser at bruk av CP strøm til AAR-berørt armert betong for å undertrykke stål korrosjon kan øke AAR ekspansjon. Høyere strøm forbindelser forårsaket større ekspansjoner. Følgende observasjoner er gjort:

- CP effekten var mer markert for den forholdsvis tørre delen av betong. Dette kan være på grunn av bedre tilførsel av oksygen til det katodiske område.
- Ekspansjonshastighet av betong er avhengig av tilslagets reaktivitet, og CP- strøm nivå. Ytterligere utvidelse på 1000-2000 µS ble observert for både langsomt reaktiv tilslag utsatt til 20 mA/m² og meget ASR reaktiv tilslag utsatt til 10 mA/m². 5 mA/m² forårsaket mindre ekspansjon for tilslagene som er testet.

Resultatene tyder på at en må praktisere med forsiktighet for å avgjøre statusen av AAR betong, når anvendelsen av påtrykt strøm CP overveies for beskyttelse av betongkonstruksjoner som er i fare for korrosjonsskader.

Disse resultatene strider mot andre sine studier. Millers (1997)⁹⁸ funn er derimot lite sannsynlig. Det at gjen-alkalisering (elektrokjemisk behandling) kan ha stor påvirkning av ASR, dessuten har ingen slike effekter blitt rapportert fra behandlede strukturer. Banfill (1999)⁹⁹ konkluderte at elektrokjemiske behandlinger ikke kan heve hydroksyl konsentrasjon til terskelen nødvendig for ASR. Videre, Kashima et al. (2008)¹⁰⁰ konkluderte at en CP bruk med 1,0 mA volum ikke kan samle mye alkali ioner i nærheten av armerings stål som opptrer som en katode. Derfor anses risikoen for ASR som lav.

Cosh (2009)⁸¹ utførte laboratoriarbeid der forholdene på et brudekk som er utsatt for ASR er simulert. Fem 900 x 900 x 200 mm plater, ble støpt fra en betong blanding med reaktiv fint tilslag fra El Paso, Texas. Platene inneholdt to matter av integrert 15m deformert armerings stål stanger på 60 mm fra den øvre og 40 mm fra de nedre overflatene. Blandingsdesignet som ble brukt var det som er angitt i ASTM C 1293, bortsett fra at betong fra toppoverflaten til bunnen av det øverste sett med prizmer var med vilje forurenset med 5% (av massen av sement) natriumklorid tilsatt til blande vannet. Alle de fem platene ble plassert på UNB eksponerings området til synlig sprekkdannelse oppstod (etter ca 3 måneder).

Høsten 2006 ble fire av platene fraktet tilbake til laboratoriet for behandling og den femte platen forble på området som kontroll. De fire platene ble behandlet som følger:

- 1) Kombinert elektrokjemiske klorid uttrekk og elektrokjemisk litium impregnering (referert til som ECE-behandling).
- 2) Elektro-Osmotisk Puls (EOP) teknikk som bruker en egenutviklet litium løsning.
- 3) EOP teknikk som bruker en egenutviklet silikat forbindelse.
- 4) Vakumimpregnering (se vakumimpregnering kapittel).

Etter behandlingen ble platene lagret innendørs og vætet med 5% natriumkloridoppløsning før været tillot deres tilbakeføring til eksponerings området i løpet av våren. Ekspansjon målinger og korrosjon potensial avlesninger er iverksatt på blokkene i løpet av våren og høsten hvert år.

6.5.3.1 1. Plater behandlet med Elektrokjemisk ekstraksjon (ECE) Teknikk

En plate ble behandlet med typisk ECE teknikk. Elektrolytten ved anoden var litium nitrat med en egenutviklet overflateaktivering. Omtrent 10 liter litium nitrat med en egenutviklet overflateaktiv anolytt oppløsningen ble byttet på 2 ukers intervaller for å vedlikeholde konsentrasjonen ved overflaten og for å minimere nedgang i pH. Strømforsyningen ble satt til å begrense levert spenning til 40 V (likestrøm) og strømmen til 1 amp per kvadratmeter (den som først er oppnådd). Spenningen og strømmen ble overvåket under hele behandlingen. Anoden som brukt var titan-netting og katoden var de innebygde armerings barer.

Platen ble behandlet i 8 uker med 2X-ukentlige skiftintervaller for løsningen. Litium profilering ble utført på en kjerneprøve tatt fra skiven. Litiumkonsentrasjonen større enn 1 kg/m^3 (400 ppm) ble funnet på dybde ned til 20 mm og nivåer på over $0,25 \text{ kg/m}^3$ (100 ppm) ble observert ned til 27 mm. Litiumkonsentrasjonen avlesing nådde bakgrunnsnivåer ved 33 mm til 35 mm (Cosh, 2009)⁸¹.

6.5.3.2 2. Sylindere behandlet med ECE

To sett med 100 x 200 mm sylindere ble støpt på UNB betong laboratorium og tillatt å ekspandere til 2 nivåer, ett sett ble satt i fryseren etter to uker, og den andre var tillatt å ekspandere til det var oppsprekking synlig på overflaten. Siden sylindrene ble støpt fra samme blanding, noen ble frosset til å begrense videre ekspansjon, mens det andre settet utvidet til punktet av å ha et synlig sprekk nettverk. Denne frysingen fant sted vilkårlig etter to uker ved 38°C. I fortsettelsen av denne forberedelsen de synlige krakking av det andre settet av sylindere igangsatt behandling av begge sett av prøver. Prøvene ble kuttet ned til 178 mm i lengde og installert i 204 mm lange plast sylinder former og impregnert ved 40 V i 8 uker. Elektrolytter som ble brukt var 1M NaOH og LiNO_3 med et overflateaktivt middel. Etter behandlingen av disse sylindrene var profil grunnet for å bestemme konsentrasjonen profil over hele dybden av kjernen.

I den uoppsprukkede prøven, penetrerte litium til en dybde på over 20 mm og konsentrasjonen ved 20 mm var vesentlig høyere enn $0,25 \text{ kg/m}^3$. Litiumkonsentrasjonen ved 40 mm var på bakgrunnsnivå og, dessverre ble ingen målinger gjort av konsentrasjonen mellom 20 og 40 mm. Litium profil i den oppsprukne prøven var like i at konsentrasjonen inkluderte redusert progressivt med dybden ned til en dybde på 40 mm (Cosh, 2009)⁸¹.

6.5.3.3 3. Plater behandlet med EOP Teknikk

EOP behandlingen av platene og blokken fra Idaho veidekket ble utført av en EOP tjenesteleverandør. To løsninger ble brukt, disse var en litium silikatopløsning og en oppløsning av polymer. Løsningene er egenutviklede og den nøyaktige sammensetning er ikke kjent av forfatteren. Heller ikke ble de nøyaktige detaljene i elektrokjemiske bølgeform åpenbart for forfatteren.

De to platene ble behandlet med en av to puls bølgeformer. En plate mottok en balansert 0,45 andre puls av hver polaritet fulgt av en 0,10 andre resten. Den andre fikk en 0,45 andre negativ puls fulgt av en 0,45 andre rest og et 0,10 andre positiv puls. Begrunnelsen bak reversering av polaritet og rest sykluser er å begrense mengden av polarisering som oppstår i betongen, resulterende at det går høyere strømgjennomgang.

Litium ble ikke påvist i kjernen fjernet fra skiven som ble behandlet med en silikatopløsning.

Litium oppløsningsbehandling forårsaket betydelig bevegelse i natriumen innenfor denne skiven. Det ser ut også til å være noen bevegelse av kalium i den dype delen av den profilerte kjernen. Litium profil tyder på betydelig gjennomtrenging til rundt 20 mm (Cosh, 2009)⁸¹.

6.5.3.4 Idaho Bjelke Behandlet med EOP

En av blokkene kuttet fra et panel av I-84 nær Boise, Idaho, (Cosh, 2009)⁸¹ ble behandlet med en usymmetrisk elektro osmotisk puls bølgeform. Denne blokken ble utsatt for litium-bærende elektrolytt ved anvendelse av 2-ukers løsning utveksling intervaller. Denne blokken skiller seg fra de andre osmotiske puls eksemplarer i at blokken inneholder ingen strukturell forsterkning. Istedenfor en matte av sveiset netting ble plassert på bunnen. Den øverste elektrolytten, toppen av behandlings overflaten, var en egenutviklet litium silikat produkt. Elektrolytten ved bunnen var en sterk løsning av natriumhydroksyd for å gi et ledende grensesnitt. Ved avslutningen av 8 ukers behandling ble en kjerne tatt og profil grunn.

Elektrokjemiske reparasjon teknikker som brukes til å kjøre litium i betongen har vanligvis blitt brukt med ytterligere mål å fjerne klorider (eller gjen-alkaliggjøre betongen). Uansett, disse teknikkene er svært spesialiserte, og det er sannsynlig at hvert tilfelle vil innebære spesifikke design hensyn til det enkelte prosjekt. Derfor, er det ikke mulig å produsere alminnelige retningslinjer for fremgangen. Imidlertid anbefales det at slike metoder kun utføres av entreprenører med høy nivå av kunnskap og, hvis mulig, med tidligere erfaring i å bruke litium-baserte materialer som elektrolytten.

Blokken kuttet fra betongdekket av I-84 er en av de to ubehandlede blokker fra et sett av 6 middels skadede blokker. Den ble valgt til å motta en elektro osmotisk puls behandling. Profilene viser betydelig penetrering av litium ned til en dybde på 15 mm. Noen litium konsentrasjoner under 15 mm ble målt til å være ved konsentrasjoner over normale bakgrunns konsentrasjoner, likevel er det ikke kjent om dette er et resultat av variasjonen i bakgrunns målinger eller tegn på at EOP teknikken trakk svært små mengder litium til denne dybde. Uansett, nivåene av litium på 16,5 og 18,5 mm (mindre enn 0,13 kg/m³ eller 50 ppm) er under nivået som kreves for å behandle ASR (Cosh, 2009)⁸¹.

6.5.3.5 Bro Støttestrukturer, Latchford, Ontario, Canada

Denne buebroen bærer motorvei 11 over Montreal River like sør for Latchford, i Nord-Ontario. Elektrokjemisk kloriduttrekk (ECE) ble brukt til å behandle korrosjonsproblemer i støttestrukturene i året 1992, betong fjerning var ikke et alternativ i nærheten av kompresjonspunktene til stål buen. Litium borat ble brukt som elektrolytt i ECE systemet for å redusere risikoen for å forverre ASR, fordi strukturen ble antatt å inneholde potensielt reaktive tilslag. Fremgangsmåten av ECE resulterer i generering av hydroxylioner ved innebygde stål katoden, og dermed økt risikoen for ASR. Ytterligere forsterkning av alkalier kan forekomme, som natriumborat blir ofte brukt som elektrolytt. Bruk av en litium-basert anolytt bør motvirke effekten av den økte pH.

Fortsatt oppfølging av strukturen for å fastslå effektiviteten av behandlingen ble planlagt, men det er ikke kjent om slik overvåkning foregår (FHWA-RD-03-047)¹⁰¹.

6.5.3.6 Bro dekk, Arlington, VA, USA

Som med broen i Ontario beskrevet ovenfor, var det viktigste formålet med den elektrokjemiske behandlingen av brudekket på I-395 i Arlington, Virginia, fjerning av klorider og litium borat ble brukt som elektrolytt i respons til bekymringer vedrørende potensialet for ASR. Brudekket ble behandlet i 1995. Detaljer om prosjektet er gitt andre steder (Whitmore and Abbott, 2000)¹⁰². Installasjon og drift av systemet var typisk for en hvilken som helst annen ECE applikasjon, med unntak av at spesielle tiltak var nødvendige for å hindre avrenning av elektrolytten fra det hellende dekk. Behandlingen varte i åtte uker, og periodisk analyse av elektrolytten i denne perioden indikerte en rask nedgang i litiumkonsentrasjonen over tid.

Kjerner tatt før og etter behandling viste at litium penetrerte en betydelig dybde inn i betongen. Litium konsentrasjoner ved en dybde på 6-19 mm varierte 315-343 ppm og ved en dybde på 19 til 32 mm er konsentrasjonen av litium var i området 203 til 265 ppm.

6.5.3.7 Bro dekk, Seaford, DE, USA

ECE behandling med litium borat som en elektrolytt ble også brukt på en 50 år gammel bro, klassifisert som en kulturarv konstruksjon i Seaford, Delaware. Brudekket ble behandlet i 1997.

Ingen referanse er gitt på dette prosjektet i FHWA-HRT 06-073²⁸ report.

6.5.3.8 Brygge fundamenter, New Jersey Tollvei, NJ, USA

Utbedring av fem brygge fundamenter på New Jersey Turnpike var trolig første gang (i 1999) en elektrokjemisk migrasjon teknikk ble brukt utelukkende i den hensikt å redusere potensialet for ASR (Whitmore and Abbot, 2000)¹⁰².

Reparasjon av noen av de større sprekker ble gjennomført før litium behandling og i disse tilfellene blande-vannet for fuger var en 10% LiNO₃ løsning. Fundamentene var massive seksjoner (ca. 6 m ved 6 m med 1,5 m dyp), med en singel matte av stål i en dybde på ca 1 m. Den lille mengden av stål nødvendiggjort bruk av et system av innebygde anoder og katoder. En rekke vertikale hull ble boret til et dyp på i underkant av 1 m inn i fundamentene. I noen av disse hullene, var stål katoder støpt på plass og koblet sammen med armerings matten til den negative terminalen på likeretteren. En titan anode ble innsatt i andre hull, og disse ble koblet til en titan-netting som dekker den øvre overflaten av

fundamentene. Anodene ble koblet til den positive terminalen på likeretteren. En litium borat løsning ble brukt som en anolytt for å fylle hullene som inneholder anoder og til å vætte toppoverflaten av fundamentet.

6.5.3.9 Testområde bro søyler i TX, USA

Bygget på slutten av 1990-tallet var I-10 og I-45 veikrysset i Houston, Texas, åpnet for trafikk i 2000. I løpet av de siste 7 årene, har betydelige sprekker utviklet i søylene som støtter krysset. Seks moderat skadet og seks alvorlig-skadet søyler (koniske søyler med gjennomsnittlig tverrsnitts dimensjoner på ca 2 × 2 m) ble valgt for en feltforsøk med hovedfokus på litium behandling (vakuump og elektrokjemisk metoder). Også på anvendelse av silan-baserte produkter for å redusere interne relativ fuktighet. Flere detaljer om den elektrokjemiske impregneringsmetoden, som involverte kobling av en anode (en 30%-litium nitratopløsning vættet på overflaten betongen) til innstøpt armeringsstål, som virker som en katode, og kjøre av litium nitrat løsning inn i kolonner ved hjelp 40V i løpet av seks til åtte uker, kan bli funnet i East (2007)⁹⁰.

De elektrokjemisk prøvene viste betydelige litium konsentrasjoner (større eller lik 1 kg/m³) ble funnet ned til stålstangen som var plassert på en dybde av 50 mm (Folliard, et al., 2008)⁸⁵.

Drimalas et al. (2012)¹⁰³, presenterte data for søylene samt barrierer i Leominster. Dette arbeidet var en del av FHWA's ASR utvikling og distribusjon program. Begge strukturene gikk gjennom en rekke behandlinger, inkludert aktuell anvendelse av litium nitrat og vakuum og elektrokjemiske litium nitrat impregneringer.

Begge testområdene har vist at det tar mange år å gi et klart svar på hvordan en behandling vil dempe en konstruksjons forverring grunnet ASR. Bruk av litium som en etter-behandling for ASR har ofte vist begrenset effektivitet ved å begrense fremdriften av ekspansjonen i ASR-berørte elementer som har blitt behandlet. Houston bro søyler har høyeste nivå av ekspansjon med søyler behandlet med elektrokjemisk impregnering av litium. Lignende resultater viser at vakuumimpregnert søyler av litium er ikke gunstig i tillegg. Lignende resultater i Leominster området, MA viste enhver bruk av litium forbindelser anvent med vakuum eller overflatisk påføring bidrar ikke til å bremse ned utvidelsen av ASR-berørt betongen.

6.6 Konklusjoner

- McCoy og Caldwell (1951)²⁹ viste at ekspansjon var i stor grad eliminert dersom litium-til-natriumen-plus-kalium forholdet var lik eller større enn 0.74; d.v.s., $[Li]/[Na+K] \geq 0.74$. En rekke nyere laboratoriestudier har bekreftet dette funnet, og $[Li]/[Na+K] = 0.74$ har blitt "standard dose" for å kontrollere ASR i betong som inneholder reaktive tilslag.
- Den viktigste fordelen med $LiNO_3$ over andre litium forbindelser er at den ikke øker konsentrasjonen av hydroxylioner (OH^-) i pore løsningen, og dermed eliminerer pessimum effekt av andre lithium forbindelser.
- $LiNO_3$ passer sammen med kjemiske tilsetninger som brukes i betong og har ikke vesentlig påvirkninger på egenskaper i betongen som styrke, elektrisk motstand, tørking krymping og motstand mot frysing og tining.
- Med hensyn til Norge og norske forhold, er det lite sannsynlig at utnyttelse av litium i norsk i betongen trenger noen spesiell oppmerksomhet.
- Det er godt dokumentert at for små laboratorie prøver, når de tørkes, og fullstendig nedsenkes i litium nitrat (eller hydroksyd), og deretter settes for akselerert ASR testing (høy temperatur, høy luftfuktighet osv.) vil vise vesentlig mindre ekspansjon enn sammenlignende prøver som ikke var nedsenket i litium-baserte løsninger.
- Tilstrekkelig litiumkonsentrasjonen i betong for å bekjempe ASR er omtrent 0.10 to 0.25 kg/m^3 .
- Overflatebehandlinger med litium nitrat løsning forårsaker ikke tilstrekkelig litium inntrengning i ASR-berørt betong.
- Gjentatte overflate påføringer av litium nitrat løsning har ubetydelige effekter på ASR-indusert ekspansjon og sprekke dannelse.
- Det er usannsynlig at overflate behandling av ASR-berørt betong er effektiv i å redusere ekspansjon og sprekke dannelse.
- Vakumimpregnerings metoder kan drive litium i dybden, men nivået av litium er utilstrekkelig til å redusere ekspansjon grunnet ASR utenom i overflateområdet.
- Elektrokjemisk impregnering er den mest lovende teknikken for å oppnå dypere inntrengning av litium i betong. Litium konsentrasjoner som overstiger verdien beregnet til å være tilstrekkelig for å undertrykke utvidelse (100 ppm) har blitt registrert helt ned til dybden av armerings stål, dvs. 50 mm fra den behandlede overflate.
- Elektrokjemisk impregnering forårsaker migrering av alkalier (natrium og kalium) til armering som tjener som katode i den elektrokjemiske prosessen. Derfor, er det mulig at ASR kan forverres i betongen ved siden av armeringsstålet, grunnet lokal økning i hydroksyl, natrium, og kalium konsentrasjoner. Imidlertid er antatt økt risiko for ASR kontroversiell.
- Resultater oppnådd fra elektro-osmotiske puls (EOP) behandlinger overstiger ikke av resultater oppnådd i elektrokjemiske litium i impregneringsbehandlinger.

7 Referanser

- ¹ EN 1504-2:2004, Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 2: Surface protection systems for concrete, 2004.
- ² BD 43/03, The impregnation of reinforced and pre-stressed concrete highway structures using hydrophobic pore-lining impregnants. DMRB 2.4.2. Highways Agency, London UK, 2003.
- ³ B. Fournier, M.A. Bérubé, M.D.A. Thomas, N. Smaoui and K.J. Folliard: Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali Silica Reaction - A Review. CANMET Materials Technology Laboratory, Report Number MTL 2004-11. 2004.
- ⁴ Canadian Standards Association (CSA): Guide to the Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali-Aggregate Reaction. CSA A864-00, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada, 2000.
- ⁵ A. J. J. Calder, M. McKenzie: Performance of impregnants. Published Project Report PPR362, Transport Research Laboratory, Wokingham, UK. 2009.
- ⁶ P. J. Grabe, R. E. Oberholster: Programme for the treatment and replacement of ASR affected concrete sleepers in the Sishen-Saldanha railway line. Proc., 11th Int. Conf. AAR, Québec City, Canada, pp. 1059-1068, 2000.
- ⁷ M. A. Bérubé, D. Chouinard, M. Pigeon, J. Frenette, M. Rivest, D. Vézina: Effectiveness of sealers in counteracting alkali-silica reaction in highway median barriers exposed to wetting and drying, freezing and thawing, and de-icing salt. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(2): 289-300, 2002a.
- ⁸ M. A. Bérubé, D. Chouinard, M. Pigeon, J. Frenette, M. Rivest, D. Vézina: Effectiveness of sealers in counteracting alkali-silica reaction in highway median barriers exposed to wetting and drying, freezing and thawing, and de-icing salt. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(2): 329-337, 2002b.
- ⁹ P. D. Carter: Evaluation of Damp-proofing Performance and Effective Penetration Depth of Silane Sealers in Concrete. ACI Materials Journal Special Publication, 151, p95-118, 1994.
- ¹⁰ G. E. Hoppe: Rehabilitation and impregnation of a concrete arch bridge to inhibit the further effects of alkali aggregate reaction and the monitoring of the effectiveness of the coating system. ACI Materials Journal Special Publication, 131, p357-380, 1992.
- ¹¹ T. Miyagawa, A. Hattori, M. Fujii, S. Kurihara: Effect of various types of silanes on expansion due to alkali-silica reaction. Proc., 10th Int. Conf. AAR, Melbourne, Australia, pp. 591-598, 1996.

-
- ¹² Y. Kubo, A. Hattori, S. Kurihara, T. Miyagawa: Long term effect of silane treatments on expansion due to alkali-silica reaction by water control. Proc., 11th Int. Conf. AAR, Québec City, QC, Canada, pp. 1069-1078, 2000.
- ¹³ T. Niina, S. Matsumoto, Y. Hisari, D. Murahashi, T. Miyagawa: Fundamental study for controlling ASR expansion by silane penetrant system. Proc., 14th Int. Conf. AAR, Austin, Texas, USA. 2012.
- ¹⁴ T. Drimalas, K. Folliard, M. Thomas, B. Fournier, A. Bentivegna: Study of the effectiveness of lithium and silane treatments on field structures affected by ASR. Proc., 14th Int. Conf. AAR, Austin, Texas, USA. 2012.
- ¹⁵ B. Fournier, M. A. Bérubé, K. J. Folliard, M. Thomas: Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures. The Federal Highway Administration, Report No. FHWA -HIF-09-004, 62 pp + appendix.
- ¹⁶ BA 85/04: Coatings for concrete highway structures and ancillary structures. DMRB 2.4.3. Highways Agency, London UK, 2004.
- ¹⁷ B. Godart, M Michel, P. Fasseu: Treatment of structures by waterproof coating. Proc., 10th Int. Conf. AAR, Melbourne, Australia, pp. 583-590, 1996.
- ¹⁸ S. Tanikawa, J-C. Laiw, R. N. Swamy: A flexible acrylic rubber surface coating a cure for ASR expansion. Proc., 10th Int. Conf. AAR, Melbourne, Australia, pp. 614-621, 1996.
- ¹⁹ J. Wang, M. Humphrey, D. Bayer: Control of ASR expansion by coating. Proc., 10th Int. Conf. AAR, Melbourne, Australia, pp. 622-629, 1996.
- ²⁰ R. N. Swamy, S. Tanikawa: Acrylic rubber coating to control alkali silica reactivity. Proc., 9th Int. Conf. AAR, London, UK, pp. 1026-1034, 1992.
- ²¹ T. Daidai, O. Andrade, K. Torii: The maintenance and rehabilitation techniques for ASR-affected bridge piers with fracture of steel bars. Proc., 14th Int. Conf. AAR, Austin, Texas, USA. 2012.
- ²² H. Ólafsson: AAR problems in Iceland – Present state. Proc., 8th Int. Conf. AAR, Kyoto, Japan, pp. 65-70. 1989.
- ²³ F.F. Reuss (1809) Reuss, F. F. Memoires de la Societe Imperiale des Naturalistes de Moscou 2, 327.
- ²⁴ Stanley, C., and McFeat-Smith, I., (2008) Electro-Osmosis using multi pulse sequencing for removing and repelling water out of buildings and other structures. 33rd Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 25 – 27 August 2008, Singapore (online: <http://cipremier.com/100033004>).
- ²⁵ Hock, V.F., T. Maase, T.H., Mclnerney, M.K., and Kirstein, E., (1998) Demonstration of Electro-Osmotic Pulse Technology for Groundwater Intrusion Control in Concrete Structures. U.S. Army Center for Public Works, report TR98/68, 44 pages.

-
- ²⁶ Marshall, O.S., Hock, V.F., Gintert, L.A., Singleton, M., (2009). Dehumidification for enhancement of electro-osmotic pulse technology in underground storage facilities. Department of Defense Corrosion Conference, august 10-14, 2009. Gaylord National, Washington, DC.
- ²⁷ Anderson, B., Costa, J., Femmer, P., (2009) Electro-Chemical Dewatering System (online: <http://www.structural.net/case-study/1/electro-chemical-dewatering-system.aspx>).
- ²⁸ Folliard, K.J., Thomas, M.D.A., Fournier, B., Kurtis, K.E., and Ideker, J.H., (2006). "Interim Recommendations for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent Alkali-Silica Reaction (ASR)". FHWA-HRT-06-073, 94 pages.
- ²⁹ McCoy, W.J. and Caldwell, A.G. (1951). "A new approach to inhibiting alkali-aggregate expansion," *Journal of the American Concrete Institute*, 47, 693-706.
- ³⁰ Lawrence, M. and Vivian, H.F. (1961). "The reactions of various alkalis with silica" *Australian Journal of Applied Science*, 12, N.1, 96-103.
- ³¹ Tremblay, C., Bérubé, M.A., Fournier, B., Thomas, M.D., Folliard, K.J., (2012) Experimental investigation of the mechanisms by which LiNO₃ is effective against ASR. *Cement and Concrete Research*, 40, 583–597.
- ³² Chatterji, S., Thalow, N., and Jensen, A.D. (1987). "Studies of the Alkali-Silica Reaction Part 4: Effect of Different Alkali Salt Solutions on Expansion," *Cement and Concrete Research*, 17:777-83.
- ³³ Sakaguchi, Y., Takakura, M., Kitagawa, A., Takahiro, H., and Fuminori, T. (1989). "The inhibiting effect of lithium compounds on alkali-silica reaction," *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Kyoto, Japan, 229-234.
- ³⁴ Stark, D. (1992). "Lithium salt admixtures - an alternative method to prevent expansive alkali-silica reactivity," *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, London, United Kingdom, July.
- ³⁵ Lumley, J.S. (1997). "ASR suppression by lithium compounds," *Cement and Concrete Research*, 27, n.2: 235-44.
- ³⁶ Ramachandran, V.S., "Alkali-Aggregate Expansion Inhibiting Admixtures," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 20, Nos. 2–3, 1998, pp. 149–161.
- ³⁷ Diamond, S. (1999). "Unique response of LiNO₃ as an alkali-silica reaction-prevention admixture," *Cement and Concrete Research*, 29:1271-5.
- ³⁸ Thomas, M.D.A. and Bleszynski, R.F., (2000). "The use of silica fume to control expansion due to alkali-aggregate reactivity in concrete-a review," *Materials Science of Concrete* (Edited by Skalny and Mindess), Vol. 6, American Ceramic Society.
- ³⁹ Collins, C.L., Ideker, J.H., Willis, G.S., Kurtis, K.E., "Examination of the Effects of LiOH, LiCl, and LiNO₃ on Alkali-Silica Reaction," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 8, 2004, pp. 1403–1425.

-
- ⁴⁰ Tremblay, C., Berube, M.A., Fournier, B., Thomas, M.D.A., Stokes, D.B., (2004b) "Performance of Lithium-Based Products Against ASR: Application to Canadian Reactive Aggregates, Reaction Mechanisms and Testing". 12th International Conference on Alkali-aggregate Reaction (AAR) in Concrete, Beijing (China), Proceedings edited by Tang, M. and Deng, International Academic Publishers, Beijing World Publishing Corp, October 2004, Vol. 1, pp. 668-677.
- ⁴¹ Kurtis, K., "Transmission Soft X-Ray Microscopy of the Alkali-Silica Reaction," Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley, CA, 1998.
- ⁴² Kurtis, K.E., Monteiro, P.J.M., "Chemical Additives to Control Expansion of Alkali-Silica Reaction Gel: Proposed Mechanisms of Control," *Journal of Materials Science*, Vol. 38, 2003, pp. 2027–2036.
- ⁴³ Diamond, S. and Ong, S. (1992). Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, London, United Kingdom, July 1992.
- ⁴⁴ Ramyar, K., Copuroglu, O., Andic, O., Fraaij, A.L.A., (2004). "Comparison of Alkali-Silica Reaction Products of Fly Ash or Lithium-Salt-Bearing Mortar Under Long-Term Accelerated Curing," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 7, pp. 1179–1183.
- ⁴⁵ Mei, L.B., Lu, D., Deng, M., Tang, M.S., (2004). "Expansion of Siliceous Aggregate in LiOH Solution". Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete, Beijing, China, October 2004, pp. 399-406.
- ⁴⁶ Kawamura, M., Fuwa, H., (2003). "Effects of Lithium Salts on ASR Gel Composition and Expansion of Mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 6, June 2003, pp. 913–919.
- ⁴⁷ Wijnen, P.W.J.G., Beelen, T.P.M., de Haan, J.W.,; Rummens, C.P.J., van de Ven, L.J.M., and van Santen, R.A. (1989). "Silica gel dissolution in aqueous alkali metal hydroxides studies by ²⁹Si NMR," *Journal of Non-Crystalline Solids*, 109:85-94.
- ⁴⁸ Qi, Z., Wen Z-Y., (2004). "Effects of Lithium Hydroxide on Alkali Silica Reaction Gels," Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity, Beijing, China, October 2004, pp. 801–804.
- ⁴⁹ Kurtis, K.E., Monteiro, P.J.M., Meyer-Ilse, W., "Examination of the Effect of LiCl on ASR Gel Expansion," Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Quebec, Canada, June 11–16, 2000, pp. 51–60.
- ⁵⁰ Prezzi, M., Monteiro, P.J.M., and Sposito, G. (1997). "The alkali-silica reaction-part I: Use of the double-layer theory to explain the behavior of the reaction-product gels," *ACI Materials Journal*, America Concrete Institute, 94, No.1, 10-17.
- ⁵¹ Prezzi, M.; Monteiro, P.J.M.; and Sposito, G. (1998). "Alkali-Silica Reaction- Part 2: The Effect of Chemical Additives," *ACI Materials Journal*, America Concrete Institute, 95, No. 1, 3-10.

-
- ⁵² Rodrigues, F.A., Monteiro, P.J.M., and Sposito, G. (2001). "The alkali-silica reaction: The effect of monovalent and bivalent cations on surface charge density of opal," *Cement and Concrete Research*, 31:1549-52.
- ⁵³ Feng, X., Thomas, M.D.A., Bremner, T.W., Balcom, B.J., Folliard, K.J. (2005). "Studies on Lithium Salts to Mitigate ASR-induced Expansion in New Concrete: A Critical Review," *Cement and Concrete Research*, 2005, 35, 1789-1796.
- ⁵⁴ Ohama, Y., Demura, K. and Kakegawa, M. (1989). "Inhibiting alkali-aggregate reaction with chemical admixtures," *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, (Ed. K.Okada, S. Nishibayashi, and M. Kawamura), Kyoto, Japan, pp. 253-258.
- ⁵⁵ Stark, D., Morgan, B., Okamoto, P., and Diamond, S. (1993). "Eliminating or minimizing alkali-silica reactivity," SHRP-C-343, National Research Council, Washington, D.C.
- ⁵⁶ Qinghan, B., Nishibayashi, S., Xuequan, W., Yoshino, A., Hong, Z., Tiecheng, W., and Mingshu, T. (1995). "Preliminary study of the effects of LiNO₃ on expansion of mortars subjected to alkali-silica reaction," *Cement and Concrete Research*, 25:1647-1654.
- ⁵⁷ Stokes, D.B., Wang, H.H., and Diamond, S. (1997). "A lithium-based admixture for ASR control that does not increase the pore solution pH," *Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, SP-173, pp. 855-867.
- ⁵⁸ Bérubé, M.A., Tremblay, C., Fournier, B., Thomas, M.D., Stokes, D.B. (2004) "Influence of Lithium-Based Products Proposed for Counteracting ASR on the Chemistry of Pore Solution and Cement Hydrates," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1645–1660.
- ⁵⁹ Blackwell, BQ, Thomas, MDA and Sutherland, A. 1997. "Use of lithium to control expansion due to alkali-silica reaction in concrete containing U.K. aggregates." *Proceedings of the Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, (Ed. V.M. Malhotra), ACI SP-170, Vol. 1, American Concrete Institute, Detroit, pp. 649-663.
- ⁶⁰ Thomas, M.D.A., Hooper, R., and Stokes, D. (2000). "Use of lithium-containing compounds to control expansion in concrete due to alkali-silica reaction," *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)*, Quebec, Canada, June 11-16, 783-792.
- ⁶¹ Collins, C.L., Ideker, J.H., Willis, G.S., Kurtis, K.E., (2004). "Examination of the Effects of LiOH, LiCl, and LiNO₃ on Alkali-Silica Reaction," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 8, 2004, pp. 1403–1425.
- ⁶² Durand, B. (2000). "More results about the use of lithium salts and mineral admixtures to inhibit ASR in concrete," *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)*, Quebec, Canada, June 11-16, 623-632.
- ⁶³ Thomas, M.D.A, Baxter, S., Stokes, D., and Hill, R., (2001). "The combined use of fly ash and lithium for controlling expansion due to alkali-silica reaction," presented at the International Center for Aggregate Research (ICAR) Symposium, Austin, TX.

-
- ⁶⁴ Tremblay, C., Bérubé, M.A., Fournier, B., Thomas, M.D.A., (2004a) "Performance of Lithium-Based Products Against ASR: Effect of Aggregate Type and Reactivity, and Reaction Mechanisms," Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology (Suppl. Papers), Las Vegas, NV, May 2004, pp. 247–267.
- ⁶⁵ Tremblay, C., Berube, M.A., Fournier, B. and Thomas, M.D.A., (2006a) "Effectiveness of Lithium-Based Products in Concrete Madewith Canadian Aggregates Susceptible to ASR", 8th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology (Proceedings of a Special Symposium honoring Prof. Marc-Andre Bérubé), Montréal (Canada), Proceedings published by CANMET, Ottawa, ON, Canada. May–June 2006a.
- ⁶⁶ Tremblay, C., Bérubé, M.A., Fournier, B., Thomas, M.D.A., Folliard, K.J., (2006b) "Use of the Accelerated Mortar Bar Test to Evaluate the Effectiveness of LiNO₃ Against Alkali-Silica Reaction, Part 2: Comparison With the Concrete Prism Test Results," In preparation, to be submitted to the ASTM Journal of Testing and Evaluation, 2006.
- ⁶⁷ Fournier, B., Stokes D., Ferro A., "Comparative Field and Laboratory Investigations on the Use of Supplementary Cementing Materials (SCMs) and Lithium-Based Admixtures to Control Expansion Due to Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete," Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, 2003, pp. 823–851.
- ⁶⁸ Qian, G., Deng, M., Tang, M., (2002) "Expansion of Siliceousand Dolomitic Aggregatesin Lithium Hydroxide Solution," Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp. 763–768.
- ⁶⁹ Thomas, M.D.A. and Stokes, D. (1999). "Use of a lithium-bearing admixture to suppress expansion in concrete due to alkali-silica reaction,," Transportation Research Record, No. 1668, pp. 54-59.
- ⁷⁰ Stokes, D.B., Manissero, C.B., Roy, D.M., Malek, R.I., and Roumain, J.C. (2000). "Portland cement manufacture containing lithium for ASR control," Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Quebec, Canada, June 11-16, 773-782.
- ⁷¹ Johnston, D.P., Stokes, D., Fournier, B., and Surdahl, R., (2003) "Kinetic Characteristics of ASTM C 1260 Testing and ASR Induced Concrete Damage," Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, Eds. Tang Mingshu and Deng Min, October 2003, pp. 338–346.
- ⁷² Wang, H., Tysl, S., and Gillot, J.E. (1994). "Practical implications of lithium-based chemicals and admixtures in controlling alkali-silica reaction," Fourth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Chemical Admixtures, SP-148-20, pp 353-366.
- ⁷³ Wang, H. and Stokes, D.B. (1996). "Compatibility of lithium-based admixtures with other concrete admixtures," Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Melbourne, Australia, August 18-23, 884-891.
- ⁷⁴ McKeen, R.G., Lenke, L.R., Pallachulla, K.K., and Barringer, W.L. (2000). "Mitigation of alkali-silica reaction in New Mexico," Transportation Research Record 1698.

-
- ⁷⁵ Kim, T., Olek, J., (2012) Influence of lithium ions on the chemistry of pore solutions in pastes and mortars with inert aggregates. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).
- ⁷⁶ Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J., Ideker, J.H., and Resendez, Y., (2006). "The Use of Lithium To Prevent or Mitigate Alkali-Silica Reaction in Concrete Pavements and Structures". FHWA-HRT-06-133, 47 pages.
- ⁷⁷ Bulteel, D., (2012) Threshold effect of LiOH, LiCl or LiNO₃ on alkali-silica reactions. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).
- ⁷⁸ Thomson, M.C. and Stokes, D.B. (1999). "Field installation in Pennsylvania to assess SHRP recommendations for ASR control." TRB Catalogue of 1999 Practical Papers, Design and Construction of Transportation Facilities, Paper No. 991190, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 29-30.
- ⁷⁹ Thomson, M.C. (2000). "Field installation in Pennsylvania to assess SHRP recommendations for ASR control: Part 2 | Laboratory testing of job material.," Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions (Ed. Bérubé et al.), Quebec City, Canada, pp. 1215-1224.
- ⁸⁰ Johnston, D.P. (2001). "Mitigation of potential alkali-silica reactivity using lithium." SHRP Strategic Highway Research Program Concrete and Structures ASR Showcase Test and Evaluation Project 34.
- ⁸¹ Cosh, I.T., (2009) "The use of lithium compound to treat hardened concrete suffering damage due to alkali-silica reactivity. M.Sc. thesis, University of New Brunswick.
- ⁸² Whitmore, D.W., (2009). "Field Studies in Mitigating ASR in Existing Pavement, Topical Application of Lithium". Innovative Pavement Research Foundation, report IPRF-01-G-002-03-10, 38 pages.
- ⁸³ Folliard, K.J., Thomas, M.D.A., Fournier, B., Resendez, Y., Drimalas, T., Bentivegna, A., (2012) Evaluation of mitigation measures applied to ASR-affected concrete elements: Preliminary findings from Austin, Tx exposure site. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).
- ⁸⁴ Ahlstrom, G.M., (2012). The United States Federal Highway Administration's alkali-silica reactivity development and deployment program. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).
- ⁸⁵ Folliard, K.J., Thomas, M.D.A., Ideker, J.H., East, B., Fournier, B. 2008. Case studies of treating ASR-affected structures with lithium nitrate. Proc. of the 13th Int. conf. on AAR in Concrete, June 16-20, 2008, Trondheim (Norway).
- ⁸⁶ Thomas, M.D.A., Folliard, K.J., Fournier, B., Drimalas, T., Rivard, P., (2012) Study of remedial actions on highway structures affected by ASR. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

-
- ⁸⁷ Stokes, D.B., Thomas, M.D.A., and Shashiprakash, S.G. (2000b). "Development of a lithium-based material for decreasing ASR-induced expansion in hardened concrete," Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, (Ed. M.A. Bérubé et al.), CRIB, Quebec City, Canada, pp. 1079-1087.
- ⁸⁸ Johnston, D.P., Surdahl, R. and Stokes, D.B. (2000). "A case study of a lithium-based treatment of an ASR-affected pavement." Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, (Ed. Bérubé et al.), CRIB, Quebec, Canada, pp. 1149-1158.
- ⁸⁹ Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J., Protocol for Selecting Alkali-Silica Reaction (ASR)-Affected Structures for Lithium Treatment, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HRT-04-113, 2004.
- ⁹⁰ East, B., (2007). "Laboratory and Field Investigations on the use of Lithium Nitrate to Prevent or Mitigate Alkali-Silica Reaction," M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin.
- ⁹¹ Ueda, T., Nanasawa, A., (2012). Effect of electrochemical penetration of lithium ions on concrete expansion due to ASR. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).
- ⁹² Ueda, T., Baba, Y., Nanasawa, A., (2011) "Effect of electrochemical penetration of lithium ions on concrete expansion due to ASR". Journal of Advanced Concrete Technology, 9, 31-39.
- ⁹³ Miyagawa, T., Yamamoto, T., Mihara, T., Era, K., (2012). "Controlling ASR expansion by lithium ion pressureized injection method. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).
- ⁹⁴ Wang, W.C., Liu, C.C., Lee, C., (2012). "Effect of electrolyte on the performance in electrochemical repairing technique for the concrete affected by ASR". Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).
- ⁹⁵ Liu, CC (2003): Identify the reactivity of aggregates in Taiwan and using electrochemical techniques to mitigate expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, National Central University, ChungLi, Taiwan (in Chinese).
- ⁹⁶ Shayan, A., Xu, A., Pritchard, R., (2012). "Influence of cathodic protection impressed currents on AAR expansion of concrete containing reactive aggregates". Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).
- ⁹⁷ Shayan, A., Xu, A. and Hii, A., 2006. Causes of deterioration of precast bridge piles: experimental study/Causes of deterioration of precast bridge piles and effect of repairs on columns. Proceedings of the 6th Austroads Bridge Conference, Perth, Western Australia, 14 pp.
- ⁹⁸ Miller, J., (1997). "The perception of the ASR problem with particular reference to electrochemical treatments of reinforced concrete". Proceedings of Eurocorr'97, Trondheim, Norway.

-
- ⁹⁹ Banfill, P.E.G., (1999). "Electrochemical re-alkalisation, chloride removal and alkali-silica reactions in concrete". Annual progress report 1998-1999, COST 521, workshop, Annecy, France.
- ¹⁰⁰ Kashima, A., Kawamata, K., Suzuki, H., Miyagawa, T., Kojima, T., "Application of Cathodic Protection on Reinforced Concrete Deteriorated by Alkali-Silica Reaction," Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Trondheim, Norway, June 16-20, 2008.
- ¹⁰¹ Folliard, K.J., Thomas, M.D.A. and Kurtis, K.E., (2003). "Guidelines for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent ASR". FHWA-RD-03-047.
(<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/03047/index.cfm>).
- ¹⁰² Whitmore, D., Abbot, S. "Use of an Applied Electric Field to Drive Lithium Ions into Alkali-Silica Reactive Structures," International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, (Ed. M-A. Bérubé et al.), Quebec City, Canada, pp.1089–1098, 2000.
- ¹⁰³ Drimalas, T., Folliard, K.J., Thomas, MDA., Fournier, B., Bentivegna, A., (2012) Study of the effectiveness of lithium and silane treatments on filed structures affected by ASR. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Vedlegg, hvor abstract fra omtalte referanser er inkludert.

1.

EN 1504-2:2004, Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 2: Surface protection systems for concrete, 2004.

Abstract:

This document specifies requirements for the identification, performance (including durability aspects), safety and evaluation of conformity of products and systems to be used for surface protection of concrete, to increase the durability of concrete and reinforced concrete structures, as well as for new concrete and for maintenance and repair work.

The surface protective methods covered by this document are the following:

- hydrophobic impregnation;
- impregnation;
- coating.

Flooring systems in buildings which are not intended to protect or reinstate the integrity of a concrete structure are standardised in EN 13813.

When products and systems complying with this standard are used in flooring applications that involve substantial mechanical loading, they should also satisfy the requirements of EN 13813.

2.

BD 43/03, The impregnation of reinforced and pre-stressed concrete highway structures using hydrophobic pore-lining impregnants. DMRB 2.4.2. Highways Agency, London UK, 2003.

Abstract:

Covers the use of pore lining impregnants for concrete structures. Details are given for safety, new construction and structures in service, elements, measures to be taken, requirements of surface impregnation, re-application and other concrete surface treatments.

3.

B. Fournier, M.A. Bérubé, M.D.A. Thomas, N. Smaoui and K.J. Folliard: Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali Silica Reaction - A Review. CANMET Materials Technology Laboratory, Report Number MTL 2004-11. 2004.

Abstract:

Unexpected or premature concrete deterioration due to alkali-aggregate reactivity is a widespread problem worldwide. Routine site inspections performed on a regular basis may permit identification of the problem; however, AAR in concrete cannot generally be diagnosed without detailed site investigations. Such investigations would include determination of the distribution and severity of the various defects affecting the concrete structure and in-situ

testing, as well as laboratory testing of samples collected from the affected concrete structures. For critical structures such as large dams and fair to large size highway bridges, detailed investigations including a more extensive sampling program might be necessary to quantify the current condition of the concrete, to assess structural integrity, and to evaluate the potential for future deterioration (prognosis). Such investigations can involve a detailed sampling program for further testing in the laboratory and in-situ monitoring of the progress of expansion/deterioration. The results of the above processes of investigation will then be analyzed to propose appropriate management actions to be taken for each of the particular applications.

The most common management actions for concrete structures affected by ASR can generally be grouped into activities to 1) control moisture access to the concrete by improving drainage systems or applying physical barriers or a variety of waterproof coatings, 2) slow down the process of ASR through chemical treatments such as the use of lithium-based compounds, 3) restrain expansion forces using physical containment, post-tensioning, encapsulation, and 4) try to control the deleterious effect of AAR expansion by releasing stresses using slot-cutting. The effectiveness of the above methods has shown to vary widely from one application to another; however, it is generally recognized that most of the above remedial measures are temporary solutions that may help to save some time and money until the deleterious process of AAR expansion has stopped.

4.

Canadian Standards Association (CSA): Guide to the Evaluation and Management of Concrete Structures Affected by Alkali-Aggregate Reaction. CSA A864-00, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada, 2000.

Abstract:

This Guide has been written by Canadian experts on the diagnosis and treatment of concrete structures affected by alkali- aggregate reaction (AAR). The purpose of the Guide is to provide information on the signs and symptoms of concrete affected by AAR, how to identify AAR and distinguish it from other mechanisms of concrete deterioration, and how to assess the extent and severity of AAR in concrete. It also provides advice on the best ways of evaluating, maintaining, and treating structures affected by AAR. This Guide will be of use to people involved in such work and to the owners of structures affected by AAR.

5.

A. J. J. Calder, M. McKenzie: Performance of impregnants. Published Project Report PPR362, Transport Research Laboratory, Wokingham, UK. 2009.

Abstract:

Since the early 1990s there has been a requirement to utilise hydrophobic pore-lining impregnants to provide additional durability on Highways Agency structures subjected to aggressive conditions – primarily arising from the use of de-icing salts. The material that has generally been used as an impregnant is monomeric alkyl (isobutyl) – trialkoxy silane. More

recently alternative materials have come onto the market and the Highways Agency (HA) has updated its requirements to include new test methods to assess the effectiveness and performance of pore-lining impregnants. The purpose of these tests is to facilitate the acceptance of these alternative materials. A series of experiments was undertaken to assess the effectiveness of available impregnants for suppressing the ingress of chloride ions into concrete and their long term effectiveness in service. Laboratory tests demonstrated that the ingress of chloride ions by ponding and water uptake by sorptivity was significantly reduced by treatment with the pore-lining impregnants. By contrast, pore-blockers provided only very limited resistance to chloride ingress and virtually no resistance to water uptake. A limited number of tests were also undertaken on cores extracted from bridges.

6.

P. J. Grabe, R. E. Oberholster: Programme for the treatment and replacement of ASR affected concrete sleepers in the Sishen-Saldanha railway line. Proc., 11th Int. Conf. AAR, Québec City, Canada, pp. 1059-1068, 2000.

Abstract:

Concrete sleepers in the Sishen-Saldanha iron ore export railway line (Orex) in South Africa, which was built between 1973 and 1976, are affected by alkali-silica reaction (ASR). Research that commenced in 1987 showed that treatment of affected sleepers from the line with silane effectively stopped expansion. Consequently the line was inspected over its total length of 861 km and a survey conducted on a representative sample of sleepers to establish the extent and degree of cracking. A system of classifying the sleepers into different classes based on their condition in terms of crack position, width and length was developed. The expected service life of affected sleepers in each class was determined by static and dynamic load tests performed in a laboratory. A programme was then drawn up to budget for (i) the treatment of a certain number of sleepers per year with silane to slow down ASR-related deterioration and (ii) the replacement of those that had deteriorated (based on their visual condition) to the extent that they had a limited safe service life. It appears at this stage from relative humidity measurements taken on treated and untreated sleepers in the line as well as routine systematic inspections, that the silane treatment has been effective in slowing down deterioration due to ASR.

7.

M. A. Bérubé, D. Chouinard, M. Pigeon, J. Frenette, M. Rivest, D. Vézina: Effectiveness of sealers in counteracting alkali-silica reaction in highway median barriers exposed to wetting and drying, freezing and thawing, and de-icing salt. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(2): 289-300, 2002a.

Abstract:

Low- and high-alkali, plain and air-entrained large concrete cylinders, 255 mm in diameter by 310 mm in length, were made with a highly alkali-silica reactive limestone. After curing, a

number of cylinders were sealed with silane, oligosiloxane, polysiloxane, linseed oil, or epoxy, with others subjected to 179 freezing and thawing cycles in humid air (one cycle per day). All cylinders were then subjected to 14-day exposure cycles, including in the most severe case periods of humid storage in air, drying, wetting in salt water, and freezing and thawing cycles. All low-alkali specimens did not either expand or develop surface cracking, even those with a deficient air void system and exposed to freezing and thawing cycles. All unsealed high-alkali cylinders subjected early to a series of freezing and thawing cycles did not significantly expand during these cycles, but presented high expansion afterwards. Wetting and drying significantly reduced alkali-silica reaction (ASR) expansion compared with constant humid storage; however, it promoted map-cracking. Regardless of the air content, freezing and thawing increased greatly the concrete expansion in the presence of ASR, even after ASR was almost complete; freezing and thawing also greatly promoted surface cracking. On the other hand, all cylinders early sealed with silane, oligosiloxane, or polysiloxane did not either significantly expand or show map-cracking, whatever the exposure conditions and the air content; these cylinders progressively lost mass with time. On the other hand, the epoxy resin was not effective. The linseed oil prevented map-cracking while significantly reducing expansion, however not sufficiently. After one or 1.5 years, some expanding cylinders were sealed with silane, oligosiloxane, or polysiloxane; they started to loose mass and contracted immediately after being sealed, whatever the exposure conditions. The results obtained thus indicate that a good sealer may greatly improve the aesthetic appearance (e.g., map-cracking) and stop expansion of ASR-affected concrete elements of 255 mm or less in thickness, made with a water-to-cement ratio in the range of 0.50, and exposed to wetting and drying, freezing and thawing, and salt water.

8.

M. A. Bérubé, D. Chouinard, M. Pigeon, J. Frenette, M. Rivest, D. Vézina: Effectiveness of sealers in counteracting alkali-silica reaction in highway median barriers exposed to wetting and drying, freezing and thawing, and de-icing salt. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(2): 329-337, 2002b.

Abstract:

This study follows another experimental study where different types of sealers were applied on plain and air-entrained large concrete cylinders made with high-alkali contents and highly alkali-silica reactive limestone aggregates. The main objective was to determine the effectiveness of these sealers in counteracting concrete expansion and surface deterioration due to alkali-silica reaction under various exposure conditions. This study indicated that all three sealers tested, the silane-, oligosiloxane-, and polysiloxane-based sealers, could stop concrete expansion due to ASR and even produced contraction, even for concrete cylinders subjected to wetting and drying, freezing and thawing, and sodium chloride solutions. In 1991, the same silane, oligosiloxane, and polysiloxane were applied on sections of median barriers showing various degrees of deterioration due to ASR. These sections were subjected to wetting and drying, freezing and thawing, and, during winter, to deicing salt. The silane was also applied on other sections of the same barriers in 1994. Observations and measurements over 10 years

indicate that the aesthetic appearance of these median barriers, particularly those sealed with the silane, was greatly improved, while internal humidity was significantly reduced, and concrete expansion as well, when not arrested. The period of time during which the above three sealers were capable to stop ASR expansion varies with the sealer used and the degree of concrete deterioration at the time of sealing. For instance, the silane, which was the best among all products tested, caused concrete contraction for at least 6 years in median barriers that were severely affected by ASR, and likely for more than 10 years in moderately affected barriers. The overall results confirm the conclusions obtained previously in the laboratory: a good sealer such as the silane tested may greatly improve the aesthetic appearance and stop the expansion of non-massive ASR-affected concrete members, at least up to about 300 mm in thickness, and subjected to wetting and drying, freezing and thawing, and salt water. However, the poor result obtained in the field with another silane-based sealer indicates that a sealer cannot be selected based on its composition only.

9.

P. D. Carter: Evaluation of Damp-proofing Performance and Effective Penetration Depth of Silane Sealers in Concrete. ACI Materials Journal Special Publication, 151, p95-118, 1994.

Abstract:

Penetrating concrete sealers are often used on highway bridges and parking structures to slow down the rate of chloride-related reinforcing steel corrosion, thereby extending service life and reducing life-cycle structure costs. Silane sealers are the type most commonly used and are evaluated. Presents data on the effects of several variables on the resultant damp-proofing performance and penetration depth. These variables include substrate conditions that influence sealer penetration depth, total active silane content, and the effects of subsequent silane retreatments. The Alberta Transportation and Utilities (AT&U) sealer evaluation methods that are used to measure damp-proofing performance and effective penetration depth are described. Data show that the permeability of modern high-quality, low-permeability concretes can be significantly improved by silane sealers, whereas porous, high water-cement ratio concretes may be more effectively sealed by barrier coatings that seal the surface of porous concrete and do not penetrate. The concept and method of measuring the effective penetration depth is explained. Increasing the concentration of the active silane in a penetrating sealer improves both the effective penetration depth and the overall damp-proofing performance on modern, good-quality concrete. Periodic resealing of the concrete with lower concentrations of silane results in a similar effect. Resealing can be successfully done through the previously sealed surface without expensive methods of surface preparation as long as the surfaces are clean and dry.

10.

G. E. Hoppe: Rehabilitation and impregnation of a concrete arch bridge to inhibit the further effects of alkali aggregate reaction and the monitoring of the effectiveness of the coating system. ACI Materials Journal Special Publication, 131, p357-380, 1992.

Abstract:

The 100 m reinforced concrete open spandrel arch bridge over the Storms River Gorge was constructed in the mid-1950s, and in 1982 surface cracking of the concrete was noticed. Cores were obtained from the various members and laboratory testing confirmed that the concrete was suffering from the effects of alkali-aggregate reaction (AAR). In 1986, the decision was made to rehabilitate this bridge, consisting of two distinct stages, of which the first was widening and strengthening the superstructure, as well as strengthening the concrete arch rib itself. The second stage consisted of treating the concrete surfaces with a hydrophobic coating to halt any further effects of AAR. To assess the long-term effectiveness of the hydrophobic coating, the bridge was instrumented and strain gage readings were taken at regular intervals. The analysis of the readings show that the concrete has been shrinking since the strain readings were started, confirming that, to date, the silane hydrophobic coating is still effective.

11.

T. Miyagawa, A. Hattori, M. Fujii, S. Kurihara: Effect of various types of silanes on expansion due to alkali-silica reaction. Proc., 10th Int. Conf. AAR, Melbourne, Australia, pp. 591-598, 1996.

Abstract:

Recently, a number of examples of premature deterioration caused by alkali-silica reaction has been reported. Various types of surface treatments are applied for repair work. This paper deals with various types of silanes, which are typical hydrophobic impregnation agents, as repair materials. In the deterioration mechanism, water control is one of the most important factors. Thus, many kinds of surface treatments are applied to control the amount of water present in the concrete. Surface treatments can be classified into two types from the viewpoint of how to control the water in concrete. One type allows no movement of water into or out of the concrete. The other type is a hydrophobic treatment which restricts water penetration into concrete, but allows water vapour to move out. The former system may promote concrete deterioration. Silane has been used as typical hydrophobic for concrete structures deteriorated by alkali-silica reaction. In this study, the effect of the molecular size (molecular weight: 120 - 416), the type (alkyl, alkoxy, methoxy, ethoxy), and the number of alkoxy groups of silane on the hydrophobicity of concrete were investigated.

12.

Y. Kubo, A. Hattori, S. Kurihara, T. Miyagawa: Long term effect of silane treatments on expansion due to alkali-silica reaction by water control. Proc., 11th Int. Conf. AAR, Québec City, QC, Canada, pp. 1069-1078, 2000.

Abstract:

The long term effect of silane treatment to repair concrete structures was investigated in the quasi-actual condition to evaluate the effective depth and water control properties of silane treatment. Quasi-actual concrete specimens and small specimens were placed outdoors and the relative humidity of concrete at various depth from surface were measured. Furthermore, the effect of silane treatments to reduce alkali-silica expansion by water control was discussed. Water control properties and the effect of silane treatments were simulated on the basis of moisture transfer analysis. The results were compared with experimental data. The analytical models of silane treatment and environment for simulation were reliable enough to evaluate the effect of silane treatment.

13.

T. Niina, S. Matsumoto, Y. Hisari, D. Murahashi, T. Miyagawa: Fundamental study for controlling ASR expansion by silane penetrant system. Proc., 14th Int. Conf. AAR, Austin, Texas, USA. 2012.

Abstract:

This experimental study examined effective application of silane penetrant to structures affected by alkali silica reaction. Model specimens simulating a real structure were exposed outdoors for 19 months, with or without penetrant application and with or without exposure to natural rain. Expansion ratio was measured at different depths from the application surface to determine the range of effectiveness of silane penetrant in expansion control. Relative humidity in the holes made in the specimens was measured as the index of internal moisture content which could influence the expansion behavior. The experiment demonstrated that application of silane penetrant was effective in reducing moisture in concrete and controlling expansion even with exposure to rain. Range of effectiveness was found to reach a depth of about 200 mm in moisture reduction and about 250 mm in expansion control.

14.

T. Drimalas, K. Folliard, M. Thomas, B. Fournier, A. Bentivegna: Study of the effectiveness of lithium and silane treatments on field structures affected by ASR. Proc., 14th Int. Conf. AAR, Austin, Texas, USA. 2012.

Abstract:

This paper presents information two of the different demonstration projects undertaken under FHWA's Alkali-Silica Reactivity (ASR) Development and Deployment Program, with an aim at implementing in the field a number of techniques for mitigating the deleterious effects of ASR

in highway structures. This paper presents data of highway bridge columns in Houston, TX and jersey barriers in Leominster, MA that were treated different types of products in order to minimize expansion. Novel techniques including electrochemical lithium impregnation and other forms of applications are presented herein. These long-term demonstration projects provide accurate field evaluations of concrete deteriorating from ASR. A number of techniques are used to monitor these sites with the results to date are shown in this paper.

15.

B. Fournier, M. A. Bérubé, K. J. Folliard, M. Thomas: Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures. The Federal Highway Administration, Report No. FHWA -HIF-09-004, 62 pp + appendix.

Abstract:

Alkali-aggregate reaction (AAR) is only one of the many factors that might be fully or partly responsible for the deterioration and premature loss in serviceability of concrete infrastructure. Two types of AAR reaction are currently recognized depending on the nature of the reactive mineral; alkali silica reaction (ASR) involves various types of reactive silica (SiO_2) minerals and alkali-carbonate reaction (ACR) involves certain types of dolomitic rocks ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Both types of reaction can result in expansion and cracking of concrete elements, leading to a reduction in the service life of concrete structures.

This document described an approach for the diagnosis and prognosis of alkali-aggregate reactivity in transportation structures. A preliminary investigation program is first proposed to allow for the early detection of ASR, followed by an assessment (diagnosis) of ASR completed by a sampling program and petrographic examination of a limited number of cores collected from selected structural members. In the case of structures showing evidence of ASR that justifies further investigations, this report also provides an integrated approach involving the quantification of the contribution of critical parameters with regards to ASR.

16.

BA 85/04: Coatings for concrete highway structures and ancillary structures. DMRB 2.4.3. Highways Agency, London UK, 2004.

Abstract:

Covers the use of coatings on new concrete highway structures and those in service, and ancillary structures such as service buildings.

17.

B. Godart, M Michel, P. Fasseu: Treatment of structures by waterproof coating. Proc., 10th Int. Conf. AAR, Melbourne, Australia, pp. 583-590, 1996.

Abstract:

In the field of the treatment of the structures affected by AAR, the drying out of concrete represents, in theory, the most judicious way to reduce or to stop the development of this phenomenon. However, its application in ideal conditions is not easy. It requires especially, the application of a sufficiently efficient waterproof treatment on all surfaces exposed to humidity. In this context, laboratory testing, based on expansion tests of reactive concrete specimen which were, dried, treated and then stored in an atmosphere at 38°C and 100 % relative humidity, was first, carried out to evaluate the effectiveness of the various waterproofing systems. Although, these tests showed great variability of the performance of products, they did not find the perfect product. Nevertheless, the deck of a bridge affected by an evolutive AAR was completely treated with one of the products which gave the best results on test samples, this being a thin coating of acrylic resin-cement. Accurate monitoring of the dimensional variation of the structure, its mechanical behaviour and the conditions of its facings show, up to now, no adverse effect. It is still too soon to come to a conclusion on the long-term outcome of this method of treatment on structures affected by alkali aggregate reaction, and the measurements are being continued.

18.

S. Tanikawa, J-C. Laiw, R. N. Swamy: A flexible acrylic rubber surface coating a cure for ASR expansion. Proc., 10th Int. Conf. AAR, Melbourne, Australia, pp. 614-621, 1996.

Abstract:

Previous tests conducted by the authors have shown that a carefully developed acrylic rubber surface coating can prevent the intrusion of moisture and chlorides into concrete. This paper shows that such a coating can control the expansive strains due to alkali-aggregate reactivity. Concrete prisms containing synthetic reactive aggregates, and without and with this surface coating were exposed to water at 38°C and 4% sodium chloride solution at 20°C and 38°C with the test specimens fully or half immersed or subjected to wetting and drying. The coating was applied before exposure, after 0.15% expansion and after 35% expansion. It was shown that the coating was able to effect substantial and significant reductions in the expansions, particularly when it was applied prior to any reactivity, as well as when it was applied to cracked concrete undergoing alkali-aggregate reactivity and exposed to unfriendly salt-laden environments. However, the coating could not prevent expansion totally because the presence of all the necessary reactive ingredients within the concrete right from the beginning. In real structures a total strategy involving the benefits of such protective coating systems can ensure continued service life without losing structural integrity.

19.

J. Wang, M. Humphrey, D. Bayer: Control of ASR expansion by coating. Proc., 10th Int. Conf. AAR, Melbourne, Australia, pp. 622-629, 1996.

Abstract:

This paper presents the results of a two-year investigation carried out by the authors, in search of a scientific method in selecting coatings for the control of ASR induced expansion in concrete structures. The effectiveness of the coatings is evaluated and some of the important influencing factors are discussed. It is found that the water resistance of a coating is an important parameter and, by selecting an appropriate coating system and applying it at an early date, it is possible to control ASR induced expansion.

20.

R. N. Swamy, S. Tanikawa: Acrylic rubber coating to control alkali silica reactivity. Proc., 9th Int. Conf. AAR, London, UK, pp. 1026-1034, 1992.

Abstract:

This paper presents test data on the effectiveness of a highly elastic acrylic rubber coating in controlling the deleterious effects of ASR in concrete. The test specimens were subjected to outdoor exposure and three accelerated aggressive regimes. Both uncoated and coated specimens were tested and an epoxy resin coating was also used for comparison purposes. The acrylic rubber coating gave the best results and slowed the alkali silica reactivity in all cases and maintained about 80% of the original concrete strength.

21.

T. Daidai, O. Andrade, K. Torii: The maintenance and rehabilitation techniques for ASR-affected bridge piers with fracture of steel bars. Proc., 14th Int. Conf. AAR, Austin, Texas, USA. 2012.

Abstract:

The brittle fracture of steel bars in ASR-affected bridge piers has recently been reported in many places in Japan. At present, the development of rehabilitation and maintenance techniques for severely deteriorated bridge piers due to ASR is an important subject to concrete engineers. In the case study of the Arisawa Bridge in Toyama Prefecture, the authors carried out a series of investigations on both, the reduction in mechanical properties of concrete and the degree of fracture of steel bars in RC piers in which a severe deterioration again occurred after the surface coating had been applied. This paper describes the process of re-deterioration of ASR-affected bridge piers after the repair and the new countermeasures for them. Based on the survey results, the maintenance procedure for ASR-deteriorated bridge piers is proposed.

22.

H. Ólafsson: AAR problems in Iceland – Present state. Proc., 8th Int. Conf. AAR, Kyoto, Japan, pp. 65-70. 1989.

Abstract:

Alkali content in Icelandic cement is high and some aggregate are reactive. Therefore precautions were taken concerning all construction other than housing. In housing, concrete cast in the period 1960-1979 serious AAR problems occur. From 1979 no serious AAR cases have been found, thanks to preventive measures taken, silica fume replacement in cement being the most important one. Research on remedial measures for AAR damaged concrete is of high priority.

23.

F.F. Reuss (1809) Reuss, F. F. Memoires de la Societe Imperiale des Naturalistes de Moscou 2, 327.

Abstract:

Not available.

24.

Stanley, C., and McFeat-Smith, I., (2008) Electro-Osmosis using multi pulse sequencing for removing and repelling water out of buildings and other structures. 33rd Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 25 – 27 August 2008, Singapore (online: <http://cipremier.com/100033004>).

Abstract:

Water ingress into sub-surface concrete structures takes place by capillary action, even through dense and un-cracked concrete. The water ingress problem can also be amplified by inflow through cracks in the concrete. Therefore the permanent drying of concrete structures cannot easily be achieved by using traditional waterproofing solutions as these do not easily prevent ingress through the body of the concrete due to capillary action.

Research over the past 20 years has resulted in the development of the Multi Pulse Sequencing (MPS) system which applies the technology of electro-osmosis to arrest the capillary ingress of the ground water and cause it to move in the opposite direction, to such an extent that it can repel water against a hydraulic pressure of 60bar. The MPS system ionizes the water molecules by applying low voltage DC pulses at a very low current level.

The system utilizes high grade materials and is virtually maintenance free.

Installation costs are competitive with traditional methods and on-going maintenance costs have been shown to be negligible for drying out leaking walls, basements, and tunnel linings for a range of applications over the last 8-10 years. These include the MTRC's Hong Kong Station pedestrian subway, a number of deep basements for major commercial buildings in Hong Kong, electrical cable tunnels in China and concrete dams in Norway amongst other projects.

A recent application for the London Underground's Walthamstow station has overcome water ingress problems that could not be successfully treated by traditional methods and has achieved their dryness certification standards and electro-magnetic compliance standards. Calibration of the electric current levels in the individual electrode circuits provides an effective means of monitoring the ongoing relative humidity levels in structural elements including those that are not readily accessible for inspection. Current levels will increase in response to any further ingress of water thus providing a unique self-control and performance monitoring system.

25.

Hock, V.F., T. Maase, T.H., McInerney, M.K., and Kirstein, E., (1998) Demonstration of Electro-Osmotic Pulse Technology for Groundwater Intrusion Control in Concrete Structures. U.S. Army Center for Public Works, report TR98/68, 44 pages.

Abstract:

Groundwater intrusion through a building's foundation (i.e., a "wet basement problem") can cause serious damage that is expensive to correct. In older buildings, such as those common on U.S. Army installations, severe damp-basement problems call for immediate action to mitigate water damage. Electro-osmotic pulse (EOP) technology offers an alternative to the "trench and drain" approach that can mitigate some water-related problems from the interior of affected areas without the cost of excavation. The EOP alternative can further mitigate corrosion damage to mechanical equipment along with humidity and mold problems.

This study demonstrated and document the effectiveness of EOP technology to control groundwater intrusion in concrete structures at Fort Jackson, SC and McAlester Army Ammunition Plant (AAP), OK. The cost of installation was determined to be 40 percent lower than the cost of the conventional trench and drain approach. The operating or energy cost of the EOP system was shown to be negligible — equivalent to the expenditure of burning a 60W light bulb.

26.

Marshall, O.S., Hock, V.F., Gintert, L.A., Singleton, M., (2009). Dehumidification for enhancement of electro-osmotic pulse technology in underground storage facilities. Department of Defense Corrosion Conference, august 10-14, 2009. Gaylord National, Washington, DC.

Abstract:

Ammunition storage magazines at military bases experience water intrusion problems, with large volumes of water seeping through concrete walls, floors and ceiling joints, accumulating up to 1½ inches of water depth during periods of high rainfall. During hot humid days, moisture in the air condenses on the cold metal surfaces of the contents within the bunkers, adding to the interior moisture problem. The water intrusion and high humidity causes corrosion of the ammunition and equipment within the magazines, corrodes the steel reinforcement in the concrete, and contributes to poor air quality through promotion of mold and bacteria growth and propagation, aggravating asthma and allergies of soldiers working in these confined spaces. To address these issues, the combined technologies of dehumidification (DH) and Electro-osmotic pulse (EOP) are being employed to maintain the relative humidity within the structures at or less than 55% and to stop the moisture intrusion through the concrete walls and floors. The cost and functional performance of these technologies was evaluated during the period of January 2008 to December 2008 in order to substantiate the return on investment of these technologies as applied to this application, and are reviewed as part of this presentation.

27.

Anderson, B., Costa, J., Femmer, P., (2009) Electro-Chemical Dewatering System (online: <http://www.structural.net/case-study/1/electro-chemical-dewatering-system.aspx>).

Abstract:

For building owners and managers, one of the biggest issues is a damp or moldy basement area resulting from water intrusion through cracked concrete slabs and foundation walls. This is evidenced by the fact that structural engineers are often asked by architects and building owners about the cost to design crack-free concrete structures. Those with experience in concrete repair have found that structural and concrete mix designs must be coupled with exceptional field curing and placement practices in order to achieve "crack-free" or "watertight" concrete.

Structural engineers often state that concrete has two very important and distinctive features: it gets hard and it cracks. One cannot place enough steel in concrete to stop random cracking. However, concrete repair specialists who remediate water leakage in cracked concrete profess

that it is better and more reliable to place a positive side membrane, rather than negative-side crack filler. If cost was not an issue, the most reliable approach for long-term water tightness in a leaking concrete structure is to place a new positive side membrane to ensure against future cracks and subsequent leakage. Most agree that keeping oxygen, water and potentially damaging ions at the concrete crack or steel reinforcing bar interface would be preferable.

The technology exists today for concrete to be crack-free, however there is a catch: cost must not be an issue, temperature variation should not be greater than approximately 20-degrees Fahrenheit from concrete placement time until the concrete is in service, and the concrete structure must stay at a constant service temperature. Obviously, these factors complicate concrete performance. Concrete in excess of 3,500 psi compressive strength is considered watertight except at joints, cracks, tie-holes and honeycombs. Advancements in both powdered and liquid admixtures have helped reduce the shrinkage effects of water, and improved flow and placement characteristics. When low water-to-cement ratio mix designs are used in heavily reinforced sections, coupled with complex forming configurations, the probability of subsequent cracks is almost certain. Even when the most recent ACI code structural design parameters are followed, state-of-the-art admixtures are used, coupled with best practice concrete placement and curing techniques, cracks can still be probable.

28.

Folliard, K.J., Thomas, M.D.A., Fournier, B., Kurtis, K.E., and Ideker, J.H., (2006). "Interim Recommendations for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent Alkali-Silica Reaction (ASR)". FHWA-HRT-06-073, 94 pages.

Abstract:

Alkali-silica reaction (ASR) is a significant durability problem that has resulted in premature deterioration of various types of concrete structures in the United States and throughout the world. Although several viable methods exist to prevent ASR-induced damage in new concrete structures, very few methods mitigate further damage in structures already affected by ASR-induced expansion and cracking. Lithium compounds have been recognized for more than 50 years as effectively preventing expansion caused by ASR, and there has been renewed interest in recent years in using lithium compounds as either an admixture in new concrete or as a treatment of existing structures. This report is intended to provide practitioners with the necessary information and guidance to test, specify, and use lithium compounds in new concrete construction, as well as its use in repair and service life extension applications. This report replaces the previous report (Guidelines for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent ASR, Folliard, et al., 2003) and includes significant changes, especially those related to recommendations for testing and specifying lithium compounds.

This report provides a basic overview of ASR, including information on mechanisms, symptoms of ASR damage in field structures, mitigation approaches, test methods, and specifications. A comprehensive summary of lithium compounds is provided, including information on their production, availability, and use in laboratory concrete studies and field applications (including a range of case studies). Guidelines for using lithium compounds as an admixture in new concrete and for treating existing structures suffering from ASR-induced damage are presented, including information on how to assess the efficacy of lithium compounds in laboratory tests. Some basic information also is provided on the economics of using lithium both in new concrete and as a treatment for existing structures. A summary of conclusions is included and identifies several technical and practical issues that should be considered for future laboratory studies and field applications.

29.

McCoy, W.J. and Caldwell, A.G. (1951). "A new approach to inhibiting alkali-aggregate expansion," *Journal of the American Concrete Institute*, 47, 693-706.

Abstract:

Investigators have studied for a decade the chemical reactions between high-alkali cement and siliceous mineral constituents of some aggregates towards deterioration of concrete. Papers on this subject indicate a consensus that there are just two possible remedial measures when reactive aggregates are used - low-alkali cement or substitution of a pozzolanic material for 20 to 30 percent of the portland cement. Investigative work focused off the beaten path of pozzolans and lowering cement alkali content resulted in experimental data which indicate that small amounts of certain materials added to high-alkali cement have an inhibiting effect on expansion reaction. For example it has been found that 1 percent or less of specific salts will reduce expansion more than 75 percent in Pyrex glass mortar bar tests using a small percentage of opal and quartz sand as aggregate. Additional information indicates that small amounts of certain proteins (0.2 percent or less) added to the cement appear to have a greater inhibiting effect on the expansive reaction than is obtained by comparable air entrainment effected by the conventional air-entraining agents. Such inhibitors appear to have no appreciable detrimental effect on the properties of the high-alkali cements as determined by ASTM specification tests for cement.

30.

Lawrence, M. and Vivian, H.F. (1961). "The reactions of various alkalies with silica" Australian Journal of Applied Science, 12, N.1, 96-103.

Abstract:

Not available.

31.

Tremblay, C., Bérubé, M.A., Fournier, B., Thomas, M.D., Folliard, K.J., (2012) Experimental investigation of the mechanisms by which LiNO₃ is effective against ASR. Cement and Concrete Research, 40, 583–597.

Abstract:

Various series of experiments were carried out on cements pastes, concretes made with a variety of reactive aggregates, composite specimens made of cement paste and reactive aggregate particles, and a variety of reactive natural aggregates and mineral phases immersed in various Li-bearing solutions. The main objective was to determine which mechanism(s) better explain(s) the effectiveness of LiNO₃ against ASR and variations in this effectiveness as well with the type of reactive aggregate to counteract. The principal conclusions are the following: (1), the pH in the concrete pore solution does not significantly decrease in the presence of LiNO₃; (2), the concentration of silica in the pore solution is always low and not affected by the presence of LiNO₃, which does not support the mechanism relating to higher solubility of silica in the presence of lithium; (3), the only reaction product observed in the LiNO₃-bearing concretes looks like classical ASR gel and its abundance is proportional to concrete expansion, thus is likely expansive while likely containing lithium; this does not support the mechanisms relating to formation of a non or less expansive Si–Li crystalline product or amorphous gel; (4), early-formed reaction products coating the reactive silica grains or aggregate particles, which could act as a physical barrier against further chemical attack of silica, were not observed in the LiNO₃-bearing concretes, but only for a number of reactive materials after immersion in 1 N LiOH at 350 °C in the autoclave (also at 80 °C for obsidian); (5), higher chemical stability of silica due to another reason than pH reduction or early formation of a protective coating over the reactive phases, is the mechanism among those considered in this study that better explains the effectiveness of LiNO₃ against ASR.

32.

Chatterji, S., Thalow, N., and Jensen, A.D. (1987). "Studies of the Alkali-Silica Reaction Part 4: Effect of Different Alkali Salt Solutions on Expansion," Cement and Concrete Research, 17:777-83.

It has been shown that the extent of expansion due to alkali-silica reaction depends on the type of alkali compound and its concentration in the surrounding liquid phase. It is of particular interest to note that a 3N alkali hydroxide solution causes less expansion than a 3N alkali salt solution. The result also showed that the expansion due to alkali-silica reaction is not directly proportional to the degree of chemical reaction. These results, though at variance to a generally held belief, are consistent with a recently proposed mechanism of alkali-silica reaction. The results indicate that in an accelerated alkali-silica test the use of an alkali salt is preferable to an alkali hydroxide.

33.

Sakaguchi, Y., Takakura, M., Kitagawa, A., Takahiro, H., and Fuminori, T. (1989). "The inhibiting effect of lithium compounds on alkali-silica reaction," Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 229-234.

Abstract:

Expansion of mortar bars, which contained Pyrex glass, due to alkali-silica reaction (ASR) was inhibited by addition of lithium compounds (lithium carbonate, lithium nitrate and lithium hydroxide). Lithium hydroxide was also found effective in inhibiting the expansion of mortar bars containing reactive aggregates. The inhibiting effect increased in proportion to the amount of its addition. Expansion was inhibited by impregnating the solution with lithium nitrate to both of mortar bars and concrete prisms which had been subject to accelerated expansion. The effects of lithium compounds were examined by observing the boundary face between Pyrex glass and hardened cement paste by means of energy dispersive X-ray spectrometer and by analyzing the extracted pore solution from the mortars. It was confirmed that the alkali-silica gel, the reaction product of Pyrex glass and hardened cement paste, was not observed at the boundary face, and that the concentration of lithium ion in pore solution decreased and that of sodium and potassium ion in it was nearly constant with the passage of time.

In conclusion, these results suggest that the inhibiting effect of lithium compounds is attributed to the production of a kind of lithium silicate, which hardly swells and dissolves, at the surface of aggregate.

34.

Stark, D. (1992). "Lithium salt admixtures - an alternative method to prevent expansive alkali-silica reactivity," Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London, United Kingdom, July.

Abstract:

ASTM C 227 and P 214 mortar bar tests were run to determine the capability of several lithium salts to inhibit expansive ASR. Both type and dosage of salt were evaluated in the presence of different alkali (hydroxyl ion) concentration and highly and slowly reactive aggregate. Analyses are based on expansion measurements.

35.

Lumley, J.S. (1997). "ASR suppression by lithium compounds," Cement and Concrete Research, 27, n.2: 235-44.

Abstract:

Concrete prism tests have been carried out to test the effectiveness of lithium compounds in reducing the expansion of concrete due to alkali silica reaction. Calcined flint cristobalite was used as the reactive aggregate in concrete mixes with material proportions close to those of field concretes.

With respect to the quantity of lithium required to alleviate asr in a given mix the results are broadly in agreement with those published by other laboratories using other reactive aggregates. The work also showed that adding only half the necessary quantity of lithium to a concrete mix does little or nothing to reduce asr expansion, so that full measures of lithium compounds need always to be used wherever the addition of lithium for this purpose is considered desirable. The supply and cost of lithium compounds are also briefly discussed in this report.

36.

Ramachandran, V.S., "Alkali-Aggregate Expansion Inhibiting Admixtures," Cement and Concrete Composites, Vol. 20, Nos. 2-3, 1998, pp. 149-161.

Abstract:

Many concrete structures have exhibited deterioration due to the alkali-aggregate expansion reactions. A review has been prepared to describe the nature of the alkali-aggregate reactions, test methods that are adopted to evaluate the aggregates for their potential to cause

expansion and the methods suggested to counter this reaction. Some methods seem to be effective but further work has to be carried out before establishing the efficacy of others. Results obtained using additives such as silica fume and other siliceous materials such as fly ash, slag, and rice husk ash have been discussed. Some chemicals based on lithium compounds have shown promise as, also, have other non-lithium bearing compounds.

37.

Diamond, S. (1999). "Unique response of LiNO₃ as an alkali-silica reaction-prevention admixture," *Cement and Concrete Research*, 29:1271-5.

Abstract:

Lithium hydroxide and various lithium salts have been known to ameliorate the effects of alkali silica reaction for many years. The use of lithium hydroxide is not without risk. A significant increase in the pore solution OH⁻ ion concentration (and pH) by lithium hydroxide and inadequate dosages are known to result in increased, rather than decreased expansion. Almost insoluble lithium salts (such as lithium fluoride and lithium carbonate) are effective at large dose levels, but generate lithium hydroxide in solution, and are thus subject to the same difficulty as LiOH. It is shown that lithium nitrate, a fully soluble neutral salt, does not generate significant increases in hydroxide ion concentration, and thus does not undergo the risk of accelerating the alkali silica reaction at the same time that it is attempting to ameliorate its effects. Lithium nitrate is, however, subject to the same extensive sorption by newly forming cement hydration products as other forms of lithium treatment, and a high dosage level is needed to indefinitely maintain the requisite concentration in solution.

38.

Thomas, M.D.A. and Bleszynski, R.F., (2000). "The use of silica fume to control expansion due to alkali-aggregate reactivity in concrete-a review," *Materials Science of Concrete (Edited by Skalny and Mindess)*, Vol. 6, American Ceramic Society.

Abstract:

Not available.

39.

Collins, C.L., Ideker, J.H., Willis, G.S., Kurtis, K.E., "Examination of the Effects of LiOH, LiCl, and LiNO₃ on Alkali-Silica Reaction," Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 8, 2004, pp. 1403–1425.

Abstract:

Lithium additives have been shown to reduce expansion associated with alkali–silica reaction (ASR), but the mechanism(s) by which they act have not been understood. The aim of this research is to assess the effectiveness of three lithium additives—LiOH, LiCl, and LiNO₃—at various dosages, with a broader goal of improving the understanding of the means by which lithium acts. The effect of lithium additives on ASR was assessed using mortar bar expansion testing and quantitative elemental analysis to measure changes in concentrations of solution phase species (Si, Na, Ca, and Li) in filtrates obtained at different times from slurries of silica gel and alkali solution. Results from mortar bar tests indicate that each of the lithium additives tested was effective in reducing expansion below an acceptable limit of 0.05% at 56 days. However, different lithium additive threshold dosages ($[\text{Li}_2\text{O}]/[\text{Na}_2\text{Oe}]$) were required to accomplish this reduction in expansion; these were found to be approximately 0.6 for LiOH, 0.8 for LiNO₃, and 0.9 for LiCl. Quantitative elemental analysis indicated that sodium and lithium were both bound in reaction products formed within the silica gel slurry. It is also believed that lithium may have been preferentially bound over sodium in at least one of the reaction products because a greater percent decrease in dissolved lithium than dissolved sodium was observed within the first 24 h. It appears that lithium additives either decreased silica dissolution, or promoted precipitation of silica-rich products (some of which may be nonexpansive), because the dissolved silica concentration decreased with increasing dosage of lithium nitrate or lithium chloride additive.

40.

Tremblay, C., Berube, M.A., Fournier, B., Thomas, M.D.A., Stokes, D.B., (2004b) "Performance of Lithium-Based Products Against ASR: Application to Canadian Reactive Aggregates, Reaction Mechanisms and Testing". 12th International Conference on Alkali-aggregate Reaction (AAR) in Concrete, Beijing (China), Proceedings edited by Tang, M. and Deng, International Academic Publishers, Beijing World Publishing Corp, October 2004, Vol. 1, pp. 668-677.

Abstract:

Concrete prisms were made with twelve Canadian moderately to highly alkali-silica reactive (ASR) aggregates of various petrographic natures, using various dosages of LiNO₃ and Li-glass.

The prisms were tested in humid air, half of them at 38°C, the other half at 60°C. Cement paste mixtures were also made and stored at 23, 38 and 60°C. At different times, the pore solution of concrete and paste specimens was extracted under high pressure and chemically analysed. An autoclave test in 1N LiOH solution at 300 psi (350°C) followed by SEM and XRD analyses was also used to investigate the chemical effect of LiOH on reactive aggregates. Aggregate powders were immersed in Li-Na-K solutions at 60°C to assess the lithium consumption. The results obtained indicate the following: (1) the Li-glass evaluated is not effective against ASR; (2) the recommended [Li]/[Na+K] molar ratio of 0.74 (100% dosage) in the form of LiNO₃ is effective in the case of 6 reactive aggregates; 3 reactive aggregates call for a higher dosage (125-150%), while LiNO₃ is not effective with the last three ones, even at the 150% dosage; (3) the required dosage of LiNO₃ is more related to aggregate composition than to the degree of reactivity; (4) with LiNO₃, the [Na++K+] significantly increased in the concrete and cement paste pore solutions, while the pH is not affected; (5) Li is the most preferentially alkali ion entrapped in the cement hydration products; (6), at equilibrium in the pore solution, the [Li+]/[Na++K+] ratio is always less than 50% of the original ratio; (7) in the concrete pore solution and the solutions in which the aggregate powders were immersed, the [Li+] and [Li+]/[Na++K+] tend to decrease with time in the presence of reactive aggregates; this suggests that Li ions are progressively and more preferentially consumed than Na and K ions; (8) the formation of a well-crystallized lithium silicate (Li₂SiO₃) on the surface of reactive particles is observed under the SEM and was identified by XRD.

41.

Kurtis, K., "Transmission Soft X-Ray Microscopy of the Alkali-Silica Reaction," Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley, CA, 1998.

Abstract:

Not available.

42.

Kurtis, K.E., Monteiro, P.J.M., "Chemical Additives to Control Expansion of Alkali-Silica Reaction Gel: Proposed Mechanisms of Control," Journal of Materials Science, Vol. 38, 2003, pp. 2027–2036.

Abstract:

Calcium chloride, lithium chloride, and acetone have previously been shown to affect expansion caused by alkali-silica reaction (ASR), a deleterious reaction occurring between reactive

siliceous minerals present in some aggregate and the strongly alkaline pore solution in concrete. Here, the effect of these chemical additives was examined by transmission soft X-ray microscopy and a quantitative elemental analysis, using ICP-OES. In examining the effect of calcium chloride on ASR gels, the formation of a calcium silicate product, believed to be non-expansive, was identified by X-ray microscopy. Additionally, the elemental analysis results suggest that the concentration of calcium ions in the pore solution, which is dependent upon the solubility of the chemical additive and the percent addition, relative to the concentration of silica species in solution is an important parameter for effective control of expansion associated with ASR. In examining the effect of lithium chloride, quantitative elemental analysis showed silica dissolution in solutions of 0.7 M NaOH+0.1 M LiCl, but with silicon present in slightly lower concentrations than in 0.7 M NaOH solutions alone. However, X-ray microscopy showed less evidence of repolymerization of the dissolved silica into an expansive gel in the presence of lithium chloride as compared to the reaction of the ASR gel in alkaline (0.7 M NaOH) solutions without lithium. With acetone, the results, including X-ray images showing the formation of repolymerized gel in 0.7 M NaOH solution containing 10% v/v acetone, indicate that the use of acetone as a chemical additive may not be as effective as once believed in preventing expansion caused by ASR. It is proposed that any reduction in expansion by use of acetone is temporary and diminishes over time.

43.

Diamond, S. and Ong, S. (1992). "The Mechanism of Lithium Effects on ASR," Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, London, United Kingdom, July 1992.

Abstract:

A considerable body of literature attests to the potential favorable effect of lithium in prevention of ASR damage. The results of new investigations concerning the mechanisms governing such effects are reopened. Trials were carried out with mortars prepared using Aalborg white cement of almost zero alkali content. Pore solution studies indicate that LiOH added is rapidly absorbed from solution by hydrating cement components; this effect results in the necessity for larger dosages of lithium for ASR control that would otherwise be needed. LiOH added to mortars containing reactive aggregates in the virtual absence of other alkalis do produce an ASR reaction product, which appears to be non-expansive. LiOH added along with NaOH and KOH is partially incorporated into mixed alkali ASR gels, but at a lower proportion than was added. Even though lithium appears to be incorporated into the reaction production gel, the overall extent of reaction appears to be reduced proportionately to the amount of lithium added, and might be entirely suppressed at a high enough dosage. Paradoxically, while

mortar bar tests indicate that expansion is prevented if the dosage of lithium in the mixed alkali mortars is sufficiently high, at intermediate dosage levels greater expansions were recorded than in the absence of lithium treatment.

44.

Ramyar, K., Copuroglu, O., Andic, O., Fraaij, A.L.A., (2004). "Comparison of Alkali-Silica Reaction Products of Fly Ash or Lithium-Salt-Bearing Mortar Under Long-Term Accelerated Curing," Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 7, pp. 1179–1183.

Abstract:

The alkali–silica expansion of mortar specimens bearing fly ash (FA), lithium carbonate, and lithium fluoride under long-term accelerated curing was investigated. ASTM C1260 standard test method was applied and expansions were recorded up to 56 days. The composition of alkali–silica reaction (ASR) products was also studied by environmental scanning electron microscopy (ESEM). It was observed that in Li-bearing mixtures, the expansions ceased beyond 28 days. However, in fly-ash-bearing mixtures, the reactions were continued and expansions were increased steadily throughout the test. No clear correlation was found between the composition of massive reaction products and expansion values. However, except for lithium-fluoride-bearing samples, good correlation was observed between the composition of crystallized reaction products and expansion values.

45.

Mei, L.B., Lu, D., Deng, M., Tang, M.S., (2004). "Expansion of Siliceous Aggregate in LiOH Solution". Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete, Beijing, China, October 2004, pp. 399-406.

Abstract:

The absorption water products of alkali-silica reactions has been studied in this paper, the absorption water ability is $\text{KOH} > \text{NaOH} > \text{LiOH}$. The expansion reaction of siliceous aggregate has been investigated in different environment such as LiOH, KOH, LiOH+KOH. LiOH-silica reaction produced compact texture and less-expansive product L-S-H that was around unreacted aggregates- and protected the reactive aggregate from further attack by alkalis. The LiOH-silica reaction itself doesn't cause expansion and cracking of concrete, LiOH can inhibit the expansion due to ASR.

46.

Kawamura, M., Fuwa, H., (2003). "Effects of Lithium Salts on ASR Gel Composition and Expansion of Mortars," Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 6, June 2003, pp. 913–919.

Abstract:

Suppression of alkali–silica reaction (ASR) expansion in mortar and concrete by the addition of lithium salts has been confirmed by some workers. It has been revealed that lithium hydroxide tended to reduce the reaction between sodium or potassium hydroxide and reactive silica, and that the ASR gel incorporating lithium was less expansive. However, it has not been reported how the addition of a lithium salt influenced the composition of the ASR gel. The calcium in ASR gel is considered to play an important role in the expansion of the gel. Thus, it is significant to characterize ASR gel composition in mortars containing lithium salts by BSE–EDS analysis. This study aims to discuss the mechanisms of suppression of ASR expansion in mortar by lithium salts from the viewpoint of ASR gel composition. The average CaO/SiO₂ ratio in ASR gels decreased with increasing amount of added lithium salts. It should be noted that the extent of variations in the CaO/SiO₂ ratio in ASR gels significantly decreased with increasing amount of lithium salts. The addition of relatively small amounts of LiOH and Li₂CO₃ resulted in increased expansion. We also obtained an unexpected result that ASR gels became homogeneous with respect to their CaO contents at high dosage levels. However, the reduction in average CaO/SiO₂ ratios and the homogenization in the CaO content of ASR gels due to the addition of lithium salts may not be related to the expansion of mortars.

47.

Wijnen, P.W.J.G., Beelen, T.P.M., de Haan, J.W.,; Rummens, C.P.J., van de Ven, L.J.M., and van Santen, R.A. (1989). "Silica gel dissolution in aqueous alkali metal hydroxides studies by ²⁹Si NMR," Journal of Non-Crystalline Solids, 109:85-94.

Abstract:

The rate of silica gel dissolution in aqueous alkaline media was investigated using ²⁹Si nuclear magnetic resonance spectroscopy. A profound difference of alkali metal hydroxides on the dissolution rate of amorphous silica gel was observed. The dissolution rate increases in order LiOH ≈ CsOH) < (RbOH ≈ NaOH) < KOH, as was confirmed by the β = silicomolybdate complexation method. Silica gel dissolution involved formation of monomeric silicic acid, Q₀. The monomeric anions oligomerise into dimer species, which in turn form cyclic and linear trimer species. The structure of highly polymerised silicate species depends on the alkali metal cation, i.e. low pH silicate solutions have structurally different silicate species as a

function of alkali metal hydroxide, as is shown by ^{29}Si -NMR spectroscopy. Potassium cations gave rise to more polymerised silica species compared with other alkali metal cations studied. On the contrary, when lithium hydroxide and silica gel are mixed in a molar $\text{SiO}_2/\text{Li}_2\text{O} = 1:1$, a microcrystalline phase is formed which consists of lithium silicate crystals. Crystallisation of the lithium silicate proceeds via monomeric silica being in solution.

48.

Qi, Z., Wen Z-Y., (2004). "Effects of Lithium Hydroxide on Alkali Silica Reaction Gels," Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reactivity, Beijing, China, October 2004, pp. 801–804.

Abstract:

The reaction of opal with a combined solution of sodium hydroxide and lithium hydroxide was investigated. Sol-Gel Expansion Method has been carried to test the expansion capability of ASR gels. To make clear the effect of lithium hydroxide on SiO_2 dissolution from opal particles, SiO_2 concentration in final solution was determined by kalium fluosilicate method.

The results of Sol-Gel Expansion Method suggested that a high dosage level is required to alleviate ASR in a given mix, which is broadly in agreement with those published by other laboratories using other reactive aggregates and tests. The concentration of SiO_2 in the final solution indicated that the reaction of the alkali with the opal starting material is inhibited in the presence of lithium hydroxide. SEM revealed that the morphology of the reaction products is markedly different from those of opal with sodium hydroxide and there is a protective layer on the surface of the reacted opal grains.

49.

Kurtis, K.E., Monteiro, P.J.M., Meyer-Ilse, W., "Examination of the Effect of LiCl on ASR Gel Expansion," Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Quebec, Canada, June 11–16, 2000, pp. 51–60.

Abstract:

Lithium containing salts have been previously shown to affect expansion caused by ASR, but the mechanisms of action are not understood. The effect of LiCl on an alkali-silica reaction gel in 0.7M NaOH was examined by transmission soft x-ray microscopy. Interpretations of the x-ray images in consideration of quantitative elemental analysis and surface chemistry principles suggests two mechanisms by which lithium may act to reduce expansion of alkali-silica reaction gel. First, lithium may limit repolymerization, effectively reducing the potential for expansion.

Second, lithium may to promote the aggregation of relatively larger (but still colloidal) silicate particles.

50.

Prezzi, M., Monteiro, P.J.M., and Sposito, G. (1997). "The alkali-silica reaction-part I: U use of the double-layer theory to explain the behavior of the reaction-product gels," ACI Materials Journal, America Concrete Institute, 94, No.1, 10-17.

Abstract:

An understanding of the expansion mechanisms resulting from the alkali-silica reaction is essential to the assessment of the susceptibility of a concrete structure to deterioration by these processes, and to the planning and implementation of preventive measures. As a result of the alkali-silica reaction between certain reactive aggregates and the highly alkaline pore fluids in a cement paste, a reaction-product gel develops that, in the presence of water, expands and may cause cracking of mortar or concrete. To explain the volume change behavior of mortar bars containing a reactive aggregate, a theoretical model is proposed in this paper. The expansion of the alkali-silica reaction-product gels is attributed to swelling caused by electrical double-layer repulsive forces. For a given colloidal system, double-layer theory indicates that the larger the valence of the counter-ions in the double layer, or the larger the concentration of these ions, the smaller the double-layer thickness and the repulsive forces that may be generated in the presence of water (aqueous solution). Experimental results available in the literature support the double-layer model. According to these results, the expansion of mortar bars in the ASTM C 1260 test is related to the composition of the reaction-product gels. The reaction-product gels containing larger amounts of equivalent sodium oxide (Na₂O_e) and smaller CaO/Na₂O_e cause larger expansions in the mortar bars.

51.

Prezzi, M.; Monteiro, P.J.M.; and Sposito, G. (1998). "Alkali-Silica Reaction- Part 2: The Effect of Chemical Additives," ACI Materials Journal, America Concrete Institute, 95, No. 1, 3-10.

Abstract:

Many aggregates are susceptible to the alkali-silica reaction. As result of this reaction. mortar bars and concrete elements containing portland cement expand. In order to limit this expansion. chemical admixtures that interfere with the alkali-silica reaction can be introduced into the mixing water. The research discussed below describes how several of these chemical admixtures affect mortar-bar expansion. Mortar bars containing any of several chemical

admixtures in the mixing water at initial molar concentrations of 1 or 2 were subjected to ASTM C 1260 tests. After the expansion test, samples were prepared from each of the mortar bars and examined in a scanning electron microscope with EDX capabilities. The following chloride salts and hydroxides were used: NaOH, KOH, LiOH NaCl, KCl, LiCl, CaCl₂, MgCl₂, and AlCl₃. For a given initial molar concentration, the expansion test results indicated that the chloride salts with monovalent cations were the most damaging, followed by those with divalent and trivalent cations. These results are in agreement with a theoretical model presented in a previous paper that explains the volume change behavior of the reaction product gels. This model attributes the swelling of the reaction product gel to double-layer repulsion forces.

52.

Rodrigues, F.A., Monteiro, P.J.M., and Sposito, G. (2001). "The alkali-silica reaction. The effect of monovalent and divalent cations on surface charge density of opal," *Cement and Concrete Research*, 31:1549-52.

Abstract:

The degree of expansion of alkali-silica reaction (ASR) gel is dependent on the valence and relative concentrations of cations present in the ASR gel. The electrical double-layer (EDL) model can predict which gel will be more expansive. If double-layer models are applied in a complex system, as in concrete, it is necessary to characterize the surface charge density of amorphous silica as a function of pH and electrolytes. The effects of Li⁺, Na⁺, K⁺, Mg⁺², Ca⁺², and Ba⁺² on the surface charge density of opal have been measured as a function of pH. The results indicate that divalent ions produce much lower surface charge density than monovalent ions, resulting in less expansive gels.

53.

Feng, X., Thomas, M.D.A., Bremner, T.W., Balcom, B.J., Folliard, K.J. (2005). "Studies on Lithium Salts to Mitigate ASR-induced Expansion in New Concrete: A Critical Review," *Cement and Concrete Research*, 2005, 35, 1789-1796.

Abstract:

This paper provides a critical review of the research work conducted so far on the suppressive effects of lithium compounds on expansion due to alkali-silica reaction (ASR) in concrete and on the mechanism or mechanisms by which lithium inhibits the expansion. After a thorough examination of the existing literature regarding lithium salts in controlling ASR expansion, a summary of research findings is provided. It shows that all the lithium salts studied, including

LiF, LiCl, LiBr, LiOH, LiOH·H₂O, LiNO₃, LiNO₂, Li₂CO₃, Li₂SO₄, Li₂HPO₄, and Li₂SiO₃, are effective in suppressing ASR expansion in new concrete, provided they are used at the appropriate dosages. Among these compounds, LiNO₃ appears to be the most promising one. Although the mechanism(s) for the suppressive effects of lithium are not well understood, several mechanisms have been proposed. A detailed discussion about these existing mechanisms is provided in the paper. Finally, some recommendations for future studies are identified.

54.

Ohama, Y., Demura, K. and Kakegawa, M. (1989). "Inhibiting alkali-aggregate reaction with chemical admixtures," Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, (Ed. K.Okada, S. Nishibayashi, and M. Kawamura), Kyoto, Japan, pp. 253-258.

Abstract:

The alkali-aggregate reaction problem in reinforced concrete structure has had worldwide attention for the past 50 years. However, effective measures for inhibiting the alkali-aggregate reactions have not been found till now, and it is most important in the present concrete technology to find out such measure for improving the durability of the concrete structures. The present paper deals with some trials to inhibit the alkali-aggregate reaction with chemical admixtures and a cement modifier.

Mortars containing a reactive aggregate are prepared with various contents of chemical admixtures such as sodium silicofluoride, silane and lithium compounds and a cement modifier. Mortar specimens are molded, and cured through autoclaving. Then the expansion of the specimens is measured through autoclaving. From the test results, the effectiveness of the additions of the chemical admixture and cement modifier in reducing expansion resulting from the alkali-aggregate reaction is discussed.

55.

Stark, D., Morgan, B., Okamoto, P., and Diamond, S. (1993). "Eliminating or minimizing alkali-silica reactivity," SHRP-C-343, National Research Council, Washington, D .C.

Abstract:

This report describes investigations into various aspects of alkali silica reactivity (ASR) as it affects performance of highway structures. Emphasis was placed on practical needs of the concrete engineer, primarily with respect to improving means to evaluate the potential of

aggregate for expansive ASR in new concrete, procedures to evaluate material for safe use in new concrete, and means to mitigate ASR and associated adverse effects in existing concrete.

A rapid test method, based on immersion of mortar bars in sodium hydroxide solution, as originally developed at the National Building Research Institute in South Africa, was further evaluated and extended to identify cement alkali levels and pozzolan proportions required to prevent deleterious ASR with a particular aggregate.

Extensive research was carried out on the efficacy of using lithium salts in concrete to suppress expansion due to ASR. Reaction chemistry was investigated, together with dosage requirements to prevent expansion. Results were extremely favorable and the approach is highly recommended.

Means to mitigate ASR and its effects on concrete also were investigated. It was found that restraint to expansion and application of lithium hydroxide solutions are possible means to control expansion due to ASR.

Work in this project was oriented to educating highway engineers in identifying ASR in concrete, primarily through seminars and publications.

56.

Qinghan, B., Nishibayashi, S., Xuequan, W., Yoshino, A., Hong, Z., Tiecheng, W., and Mingshu, T. (1995). "Preliminary study of the effects of LiNO₂ on expansion of mortars subjected to alkali-silica reaction," *Cement and Concrete Research*, 25:1647-1654.

Abstract:

The effect of LiNO₂ on the expansion of mortars made completely of reactive aggregate with five particle size fractions was investigated by means of an autoclave test. The results show that the effect of LiNO₂ varies with its content and Na₂O level, or more specifically, with the molar ratio of Li/Na in mortars. When the ratio reaches 0.8 at higher Na₂O level (greater than 2% in this study), ASR expansion is substantially suppressed and the ratio below or beyond this value will give different results. For the other cases of lower Na₂O levels the results are distinguished from this and the best Li/Na molar ratios of 0.1, 0.3 and 0.5 corresponding to the Na₂O levels of 0.5, 1.0 and 1.5%, respectively, are recommended.

57.

Stokes, D.B., Wang, H.H., and Diamond, S. (1997). "A lithium-based admixture for ASR control that does not increase the pore solution pH," Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, SP-173, pp. 855-867.

Abstract:

This paper describes the effect of a lithium nitrate-based admixture on the hydroxide ion concentration of the pore solution of hydrating pastes made from portland cement and water. No significant increase in the hydroxide ion concentration results from using this admixture in the mix, which is thus different than any published study with any other lithium compound. It has been reported that underdosing with lithium salts can increase the expansion due to ASR. The authors propose that this is mainly due to increases in hydroxide concentration observed with other lithium salts and therefore this admixture will not show such an effect. Mortar bar tests with the new admixture verify the hypothesis that the lithium nitrate-based admixture does not increase expansion at any dose. This is then a much safer admixture to use in the field with respect to risk from damaging ASR expansions. It is also much safer to handle than lithium hydroxide-based admixtures since solutions of lithium nitrate are much closer to neutral pH than lithium hydroxide solutions.

58.

Bérubé, M.A., Tremblay, C., Fournier, B., Thomas, M.D., Stokes, D.B. (2004) "Influence of Lithium-Based Products Proposed for Counteracting ASR on the Chemistry of Pore Solution and Cement Hydrates," Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 1645–1660.

Abstract:

Low- and high-alkali cement pastes were made with or without LiNO_3 or a Li-bearing glass. The $[\text{Li}]/[\text{Na}+\text{K}]$ molar ratio was kept constant to 0.74. The specimens were stored at 23, 38, and 60 °C in sealed containers. After 3, 7, 28, and 91 days, their pore solutions were extracted and analysed, and their residual water contents were obtained by drying. The Li glass was found to react quite slowly, and the corresponding $[\text{Li}^+]$ in solution progressively increased with time, temperature, fineness (as-received glass vs. ground glass), and the $[\text{Na}^{++}\text{K}^+]$ concentration in solution. This glass increased the pH by about 0.1, and by about 0.2 after it was finely ground. In contrast, LiNO_3 decreased the pH by about 0.1, despite significantly increasing the $[\text{Na}^{++}\text{K}^+]$ in the pore solution. The higher the total % Na_2O_e content (including Li) in the original mixtures, the higher the total alkali content incorporated in the cement hydrates. The $[\text{Li}^+]-[\text{Na}^{++}\text{K}^+]$ ratio in solution was about half of the initial ratio (0.74), while this ratio in the cement hydrates

was always over 1.1. Li is the alkali most preferentially incorporated into the cement hydrates, while K is the least.

59.

Blackwell, BQ, Thomas, MDA and Sutherland, A. 1997. "Use of lithium to control expansion due to alkali-silica reaction in concrete containing U.K. aggregates." Proceedings of the Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, (Ed. V.M. Malhotra), ACI SP-170, Vol. 1, American Concrete Institute, Detroit, pp. 649-663.

Abstract:

The paper presents a brief review of the literature pertaining to the effect of lithium salts on alkali-silica reaction (ASR) and some recent data from a laboratory study of the efficacy of lithium hydroxide monohydrate (LiOH.H₂O) in suppressing ASR expansion in concrete containing reactive U.K. aggregates. A synthesis of the published data indicates that the effect of lithium on ASR is not strongly influenced by the form of lithium used and that mortar-bar expansion may be effectively eliminated if sufficient lithium is added such that $[Li/(Na+K)] > 0.70$ to 0.80 . -Expansion tests were carried out on concrete prisms cast with two different reactive U.K. aggregates and a range of cement and alkali levels. Some mixtures incorporated lithium hydroxide monohydrate (LiOH.H₂O) such that the lithium-cement alkalis molar ratio was 0.74 (i.e. $[Li/(Na+K)] = 0.74$). Lithium was effective in reducing the expansion and preventing cracking in all the concretes; the maximum expansion observed in lithium-bearing concretes was 0.023% after 1 year. Higher expansions were observed in lithium-bearing concrete containing a highly-reactive siltstone compared with similar concrete containing flint sand, although expansions were still low. Although little significance can be attached to these differences, the possibility of a relationship between the safe level of lithium and the level of reactivity of the aggregate is discussed (i.e. more reactive aggregates require higher dosages of lithium). Lithium additions resulted in shrinkage of fly ash concrete containing reactive aggregate. It is probable that lower levels of lithium are required when used in combination with pozzolans, if the level of such material is not sufficient to completely eliminate expansion by itself.

60.

Thomas, M.D.A., Hooper, R., and Stokes, D. (2000). "Use of lithium-containing compounds to control expansion in concrete due to alkali-silica reaction," Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Quebec, Canada, June 11-16, 783-810.

Abstract:

This paper reports results from an experimental study aimed at evaluating the efficacy of lithium-containing compounds in controlling alkali-silica reaction (ASR) and establishing appropriate dosage levels for use with reactive U.K. aggregates. Two chemical compounds, lithium hydroxide monohydrate (LiOH.H₂O) and lithium nitrate (LiNO₃), and three reactive aggregates (flint sand, greywacke and siltstone) were used in the study. Expansion tests were carried out on concrete prisms stored at 38°C and large concrete blocks (300 x 300 x 500 mm) stored on an outdoor exposure site in southeast England.

Expansion data for concrete containing LiOH.H₂O show that the level of lithium required to control expansion to an acceptable level (i.e. $\leq 0.04\%$) increases with the amount of alkali present and varies with different aggregates. Generally, the data to 54 months indicate that a level of 1.0 kg of LiOH.H₂O for each 1.0 kg of equivalent sodium oxide (Na₂O_t) is sufficient for the flint sand and greywacke aggregates. This is equivalent to a lithium to alkali molar ratio of $[Li]/[Na+K] = 0.74$. Higher levels of lithium are required with the siltstone aggregate. The incorporation of fly ash in the concrete mix may reduce the level of lithium required to control expansion. Lower levels of LiOH.H₂O may actually increase expansion above that of control mixes without lithium. Pore solution studies indicate that lithium does not necessarily prevent reaction between the alkalis and silica, but may change the nature of the reaction product.

61.

Collins, C.L., Ideker, J.H., Willis, G.S., Kurtis, K.E., (2004) "Examination of the Effects of LiOH, LiCl, and LiNO₃ on Alkali-Silica Reaction," Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 8, 2004, pp. 1403–1425.

Abstract:

Not available.

62.

Durand, B. (2000). "More results about the use of lithium salts and mineral admixtures to inhibit ASR in concrete," Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Quebec, Canada, June 11-16, 623-632.

Abstract:

A series of experiments was conducted at Hydro-Quebec's Research Institute to evaluate the efficacy of four lithium compounds (LiOH, Li₂CO₃, LiF and LiNO₃) when used as chemical admixtures to reduce expansion due to the alkali-silica reaction. One fly ash and one ground

granulated blast furnace slag were also tested. 75 x 75 x 300 mm concrete prisms with a binder content of 420kg/m³ and a W/C of 0.41 were made with three different Canadian aggregates and four different levels of admixture. A total of 70 concrete mixtures (210 prisms) were made according to CSA A23.2-14A (1994) procedures and expansions were measured up to three year. Expansion tests have shown that lithium salts can reduce the expansion of concrete specimens exposed to 38°C and 100% relative humidity. However, the amount of lithium compounds needed to reduce the expansion below 0.04% at two year is sometimes high and it varies depending on the type of aggregates. Expansion tests up to a 1000 days provide more accurate results regarding the long term effect of lithium compounds or mineral admixtures. Some aggregate/admixture combinations show an increase in expansion rate after the two year period.

63.

Thomas, M.D.A, Baxter, S., Stokes, D., and Hill, R., (2001). "The combined use of fly ash and lithium for controlling expansion due to alkali-silica reaction," presented at the International Center for Aggregate Research (ICAR) Symposium, Austin, TX.

Abstract:

This paper presents preliminary data from a comprehensive research program investigating the efficacy of combinations of fly ash and lithium compounds for preventing damaging expansion due to alkali-silica reaction in concrete. The data presented include results from mortar bar expansion tests using two highly reactive aggregates from New Mexico and Pyrex glass (i.e. ASTM C 227 and C 441), and from a modified version of the accelerated mortar bar test (ASTM C 1260). Cements were blended to give a range of alkali levels and fly ashes from six different sources were selected to provide a range of chemical compositions. Lithium was added to mortars in the form of a 30% lithium nitrate solution. The data indicate that the beneficial effects of lithium and fly ash are cumulative when the materials are combined and, in some cases, there is a synergistic effect.

64.

Tremblay, C., Bérubé, M.A., Fournier, B., Thomas, M.D.A., (2004a) "Performance of Lithium-Based Products Against ASR: Effect of Aggregate Type and Reactivity, and Reaction Mechanisms," Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology (Suppl. Papers), Las Vegas, NV, May 2004, pp. 247–267.

Abstract:

Not available.

65.

Tremblay, C., Berube, M.A., Fournier, B. and Thomas, M.D.A., (2006a) "Effectiveness of Lithium-Based Products in Concrete Madewith Canadian Aggregates Susceptible to ASR", 8th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology (Proceedings of a Special Symposium honoring Prof. Marc-Andre Bérubé), Montréal (Canada), Proceedings published by CANMET, Ottawa, ON, Canada. May–June 2006a.

Abstract:

To evaluate the effectiveness of lithium-based products to counteract alkali-silica reaction (ASR), a total of 87 concrete mixtures were made incorporating 12 reactive aggregates of various types and degrees of ASR, and using various dosages of LiNO₃ and Li glass in combination or not with supplementary cementing materials (SCM). The concrete prisms were tested at 38 °C (100 °F), according to CSA A23.2-14A or ASTM C 1293, and also at 60 °C (140 °F) to evaluate the possibility of accelerating the testing procedure. Using LiNO₃ at the [Li]/[Na + K] ratio of 0.74 recommended by the manufacturer, satisfied the 2-year 0.04% expansion limit criterion (CSA A23.2-28A) at 38 °C (100 °F) for six aggregates; three aggregates required a ratio between 0.74 and 1.11, while a ratio 1.11 was not effective with the other three aggregates. The lithium glass was not effective. The ternary silica fume/slag cement tested was effective and the fly ashes and slag as well provided they were in sufficient quantities and they had a proper composition. Most LiNO₃-SCM combinations did not show significant synergetic effect. The required LiNO₃ dosage is not related to the aggregate reactivity. The 6-month expansion at 60 °C (140 °F) correlated well with the 2-year expansion at 38 °C (100 °F) for the control and SCM mixtures, but not for the LiNO₃ mixtures.

66.

Tremblay, C., Bérubé, M.A., Fournier, B., Thomas, M.D.A., Folliard, K.J., (2008) "Use of the Accelerated Mortar Bar Test to Evaluate the Effectiveness of LiNO₃ Against Alkali-Silica Reaction, Part 2: Comparison With the Concrete Prism Test Results," ASTM Journal of Testing and Evaluation, 2006.

Abstract:

For the time being, the concrete prism test (CPT) CSA A23.2-14A or ASTM C1293 remains the most reliable test method to evaluate the effectiveness of lithium nitrate against alkali-silica reaction (ASR) in concrete; however, the extended testing period of two years has often limited its acceptance by practitioners. In its actual form, the popular accelerated mortar bar test (AMBT) CSA A23.2-25A or ASTM C1260 cannot be used to predict this effectiveness, thus it needs to be modified accordingly. Part I of this study looked at the influence of a number of parameters on the effectiveness of lithium to control expansion of mortar bars incorporating a variety of reactive aggregates from Canada and the United States. The second part of this study (Part II) compares the results obtained in modified versions of the AMBT with those from the CPT performed on the same aggregates, with the objective of proposing the best accelerated test procedure for determining the minimum amount of lithium nitrate necessary to counteract ASR expansion in concrete. The results obtained in this study have shown that the effectiveness of lithium nitrate greatly varies from one reactive aggregate to another while not being correlated with the degree of reactivity or the petrographic nature of the reactive aggregates to counteract. A safe method of predicting the effective $[Li]/[Na+K]$ to used in concrete is proposed which uses two AMBTs, one of which involves adding lithium to both the mortar bar and the soak solution. It allows the prediction of an effective $[Li]/[Na+K]$ for aggregates that respond relatively well to lithium. The method allows the identification of aggregates that respond particularly badly to the lithium, for which the concrete prism test is recommended for evaluating the minimum lithium dosage to use for ASR control.

67.

Fournier, B., Stokes D., Ferro A., "Comparative Field and Laboratory Investigations on the Use of Supplementary Cementing Materials (SCMs) and Lithium-Based Admixtures to Control Expansion Due to Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete," Proceedings of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, 2003, pp. 823–851.

Abstract:

Not available.

68.

Qian, G., Deng, M., Tang, M., (2002) "Expansion of Siliceous and Dolomitic Aggregates in Lithium Hydroxide Solution," Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp. 763–768.

Abstract:

Autoclave expansion behaviors of siliceous and dolomite-bearing aggregates in LiOH and KOH solutions were studied. The results show that lithium hydroxide can suppress ASR expansion and induce ACR expansion. It is the duplex effect of lithium hydroxide that could be used for exploring the mechanism responsible for the expansion of dolomite-bearing aggregates in alkali environments. It has been shown that the expansion of argillaceous dolomite limestone with typical texture from Kingston, Ontario, Canada, can be attributed to ACR rather than to ASR. However, some other argillaceous dolomite limestones exhibit both ACR and ASR. Meanwhile, XRD detected that solid products of dedolomitization in LiOH solution were brucite, calcium carbonate and lithium carbonate with a consequent solid volume increase.

69.

Thomas, M.D.A. and Stokes, D. (1999). "Use of a lithium-bearing admixture to suppress expansion in concrete due to alkali-silica reaction," Transportation Research Record, No. 1668, pp. 54-59.

Abstract:

The findings of a laboratory study on the effects of a lithium-based admixture on alkali-silica reaction are presented. The admixture essentially represents an intermediate stage in the lithium extraction process of the ore spodumene. Spodumene ore is normally crushed and fired in a kiln to 'untie' the lithium prior to its extraction. The material at this stage is known as decrepitated spodumene (DS). DS is basically an amorphous alumino-silicate that contains significant quantities of 'available' lithium. As such, DS has the potential to act both as a pozzolanic mineral admixture as well as a chemical suppressant of alkali-silica reactivity. Laboratory testing included pore solution studies of pastes and mortars containing DS and expansion studies of mortar bars containing Pyrex glass (ASTM C311) and concrete prisms containing reactive aggregates from three different sources in North America. The results show that significant quantities of lithium are released by the DS into the pore solution of pastes and mortars over time. After 1 year, the Li⁺ concentration of pastes with 15 to 20 percent DS (mass replacement of high-alkali cement) was approaching 0.3 moles/liter. The efficacy of DS in controlling expansion in concrete containing reactive aggregates was found to depend on the nature of the reactive aggregate. Higher quantities of DS were required with more reactive

aggregate. This is thought to be due to the rapid expansion observed for concretes containing such aggregates. The expansion occurs before significant lithium is released from the DS, and thus higher levels of DS are required. It is possible that the efficiency of DS with such aggregates may be improved by increasing the fineness or modifying the manufacturing process.

70.

Stokes, D.B., Manissero, C.B., Roy, D.M., Malek, R.I., and Roumain, J.C. (2000). "Portland cement manufacture containing lithium for ASR control," Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Quebec, Canada, June 11-16, 773-782.

Abstract:

A process and composition for portland cement manufacture has been developed using lithium-bearing ores in the raw feed to the kiln for the purpose of incorporating lithium into the clinker to control ASR. Laboratory work and a short trial at a cement plant indicate that the clinkering process can be achieved with lower energy costs per ton of portland cement produced. Analysis of the laboratory produced materials as well as the plant produced materials by x-ray diffraction, optical microscopy, and other means are discussed, as well as mortar bar studies of cement produced in the trial.

71.

Johnston, D.P., Stokes, D., Fournier, B., and Surdahl, R., (2004) "Kinetic Characteristics of ASTM C 1260 Testing and ASR Induced Concrete Damage," Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, Eds. Tang Mingshu and Deng Min, October 2004, pp. 338–346.

Abstract:

Most laboratory testing of concrete and mortars for Alkali-Silica Reaction (ASR) involves getting information regarding whether or not deleterious expansions could be expected for the concrete in service. The information gathered in this way does not address how much time will pass until significant damage might occur in the concrete in question. This paper explores correlations between rates of reaction determined from fitting an expression of the Kolmogorov-Avrami-Mehl-Johnson equation to ASTM C1260 data and the onset of cracking in concretes in service, and large concrete specimens stored outdoors. The data from the onset of cracking in field structures was gathered from field observations, and for the outdoor concrete specimens is defined by the point in time when expansions of 0.04% were achieved. Statistically

significant correlations exist in these evaluations, which suggest that not only can relative potential for ASR be evaluated by existing laboratory tests, but that information about the time to damage in the field concretes may also reside in the information obtained from these tests.

72.

Wang, H., Tysl, S., and Gillot, J.E. (1994). "Practical implications of lithium-based chemicals and admixtures in controlling alkali-silica reaction," Fourth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Chemical Admixtures, SP-148-20, pp 353-366.

Abstract:

Not available.

73.

Wang, H. and Stokes, D.B. (1996). "Compatibility of lithium-based admixtures with other concrete admixtures," Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Melbourne, Australia, August 18-23, 884-891.

Abstract:

Lithium-based chemicals have long been known to be effective in controlling concrete expansion caused by alkali-silica reaction (McCoy and Caldwell). Lithium chemicals are readily available for this application. However, we need to ensure that lithium admixture can be used together with other chemical admixtures in a concrete mix design. The study in this program showed that Lifetime™ lithium admixture, which is commercially available and specially formulated for concrete applications to control ASR, worked well in concrete. It did not show incompatibility problems with several ASTM Type A (water reducing agent), D (water reducing and retarding agent), F (superplasticizer) and G (superplasticizer and retarding agent) admixtures and an air- entraining agent.

74.

McKeen, R.G., Lenke, L.R., Pallachulla, K.K., and Barringer, W.L. (2000). "Mitigation of alkali-silica reaction in New Mexico," Transportation Research Record 1698.

Abstract:

The research experiments reported were conducted at the Materials Research Center, ATR Institute, University of New Mexico, at the request of the Research Bureau, New Mexico State

Highway and Transportation Department (NMSHTD). The purpose was to determine the amount of additives required for mitigation of alkali-silica reactivity (ASR) based on screening tests. Fly ash additives routinely used in New Mexico and a new material—lithium nitrate—proposed by the Strategic Highway Research Program were evaluated. The work was motivated by continuous problems with early deterioration of concrete structures due to alkali-silica reactivity. The work was based on the use of acceptance criteria established by NMSHTD for expansion due to ASR, as measured in screening tests. Recommendations resulting from this research do not consider all aspects of the behavior of concrete mixtures and structures. The additive recommendations are based on reduction in mortar-bar expansion during accelerated tests.

75.

Kim, T., Olek, J., (2012) Influence of lithium ions on the chemistry of pore solutions in pastes and mortars with inert aggregates. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Abstract:

This paper presents the results of the investigation of the chemistry of pore solutions in cement slurries and mortars containing various dosages of lithium nitrate. Specifically, the effects of the following parameters on the chemistry of pore solutions were investigated: a) timing of lithium nitrate (LiNO_3) introduction, b) the dosage of lithium nitrate, c) water-to-cement ratio, d) length of curing time, and e) curing temperature.

The focus of the cement slurry studies was on determining whether the removal of the lithium ions from the pore solution takes place during the actual hydration process or if the lithium ions are adsorbed on the existing particles of C-S-H gel. It was hypothesized that the information regarding the timing of the lithium ions removal will be helpful in developing potential methods of lithium nitrate treatments which will minimize the loss of the admixture. The analysis of the composition of pore solution in cement slurries indicated that the removal of the lithium ions takes place during the actual hydration process.

Mortar specimens prepared using the non-reactive aggregate were tested to study the influence of lithium ions on the chemistry of pore solution. It was established that a linear correlation exists between the initial concentration of the lithium and the concentration of lithium ions remaining in the pore solution.

76.

Thomas, MDA., Fournier, B., Folliard, K.J., Ideker, J.H., and Resendez, Y., (2006). "The Use of Lithium To Prevent or Mitigate Alkali-Silica Reaction in Concrete Pavements and Structures". FHWA-HRT-06-133, 47 pages.

Abstract:

Alkali-silica reaction (ASR) was first identified as a form of concrete deterioration in the late 1930s (Stanton 1940). Approximately 10 years later, it was discovered that lithium compounds can be used to control expansion due to ASR. There has recently been increased interest in using lithium technologies to both control ASR in new concrete and to retard the reaction in existing ASR-affected structures. This facts book provides information on lithium, its origin and properties, and on its applications. The mechanism of alkali-silica reaction is discussed together with methods of testing to identify potentially alkali-silica reactive aggregates. Traditional methods for minimizing the risk of damaging ASR are presented; these include the avoidance of reactive aggregates, controlling the levels of alkali in concrete and using supplementary cementing materials such as fly ash, slag and silica fume. The final two sections of the facts book discuss the use of lithium, first as an admixture for new concrete construction and second as a treatment for existing concrete structures affected by ASR.

77.

Bulteel, D., (2012) Threshold effect of LiOH, LiCl or LiNO₃ on alkali-silica reactions. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Abstract:

Use of lithium compounds can limit the development of Alkali-Silica Reaction (ASR) in concrete. The aim of this study is to assess the effect of lithium compounds on mechanism of ASR.

Our approach uses chemical method which allows a quantitative measurement of the specific degree of ASR. We use a chemical concrete sub-system called model reactor involving the main ASR reagents: chertaggregate, portlandite and mixture of different ratios: LiOH/NaOH or lithium salts/NaOH. The measured reaction degrees are porous volume and absolute density on flint aggregate but also molar fraction of silica dissolved and molar fraction of silanol inside aggregate due to breaking up siloxane bonds.

The results show that alteration by ASR depends Li/Na ratio for a same proportion of hydroxide ions. This evolution is not graduated, unlike it appears a threshold effect. Indeed, below threshold Li/Na ratio, ASR occurs but from this value, ASR is very limited.

78.

Thomson, M.C. and Stokes, D.B. (1999). "Field installation in Pennsylvania to assess SHRP recommendations for ASR control." TRB Catalogue of 1999 Practical Papers, Design and Construction of Transportation Facilities, Paper No. 991190, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 29-30.

Abstract:

At the close of the Strategic Highway Research Program (SHRP), several specific suggestions were made in regard to the prevention of alkali-silica reactivity (ASR) in new concrete. One recommendation was that additional research on the field performance of highway structures should be performed. Another was that agencies should consider the addition of LiOH.H₂O as a means of preventing ASR in new concrete. In May of 1997, the Pennsylvania Department of Transportation placed a test section of pavement on the Lackawanna Valley Industrial Highway (LVIH) in order to test some of the recommendations from SHRP regarding the prevention of ASR in new concrete. In addition to a control section which contained high alkali cement and highly reactive coarse and fine aggregates, eleven other sections were placed, most of which contained the same high alkali cement, the same reactive aggregates, and different proportions of Class F fly ash, ground granulated blast furnace slag, and/or LiOH.H₂O. One of the eleven sections contained low alkali cement. The follow-up monitoring program for this ASR pavement test section is described. In addition, there is a laboratory testing program for the materials utilized on the job, which is intended to help correlate laboratory test results with field test results. The various laboratory test results planned by both PaDOT and The Portland Cement Association are outlined, as well. Conclusions: Although difficult, the placement of an ASR test pavement which incorporates varying percentages of ground granulated blast furnace slag, Class F fly ash, and other admixtures for ASR remediation can be accomplished without the use of high range water reducers.

79.

Thomson, M.C. (2000). "Field installation in Pennsylvania to assess SHRP recommendations for ASR control: Part 2 | Laboratory testing of job material.," Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions (Ed. Bérubé et al.), Quebec City, Canada, pp. 1215-1224.

Abstract:

In May of 1997, the Pennsylvania Department of Transportation placed a pavement test section on the Lackawanna Valley Industrial Highway (LVIH) to test some recommendations for alkali-silica reactivity (ASR) prevention in new concrete resulting from the Strategic Highway Research

Program (SHRP). In addition to a control section containing high alkali cement and highly reactive coarse and fine aggregates, eleven other sections were placed, most of which contained the same cement and aggregates, and different proportions of Class F fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBFS), and/or LiOH H₂O. One of the eleven sections contained low alkali cement. A laboratory testing program for the materials utilized on the job, intended to help correlate laboratory test results with field test results, was also planned and executed. Based on the ASTM C 441 test results, the 100% high alkali cement test section will show the worst field performance, the test section containing 15% Class F fly ash plus Na₂O:LiOH H₂O of 1:0.75 by weight will show the best field performance, and the other test section combinations of high alkali cement plus mineral admixture or LiOH H₂O, and low alkali cement, will fall between these two extremes. The predicted field performances of the seven combinations of high alkali cement and mineral admixtures that could be tested utilizing both ASTM C 441 and AASHTO T 303 ranked somewhat differently by the two different test procedures. Only monitoring of the actual pavement test sections will demonstrate which of the two test procedures better predicts the actual field performance of these seven test sections

80.

Johnston, D.P. (2001). "Mitigation of potential alkali-silica reactivity using lithium." SHRP Strategic Highway Research Program Concrete and Structures ASR Showcase Test and Evaluation Project 34.

Abstract:

Not available.

81.

Cosh, I.T., (2009) "The use of lithium compound to treat hardened concrete suffering damage due to alkali-silica reactivity. M.Sc. thesis, University of New Brunswick.

Abstract:

The purpose of this study was to examine the effectiveness of using lithium to treat hardened concrete experiencing distress due to alkali-silica reaction (ASR). A number of concrete structures in the U.S. have been treated with lithium to mitigate ASR but little is known about the effectiveness of the treatment. In this study, the effectiveness of the treatment was evaluated by measuring the depth of penetration of lithium into both laboratory concrete and ASR-affected structures in the field and by determining the effect of the treatment on the subsequent expansion of the concrete. The treatments performed were simultaneous electrochemical lithium impregnation and chloride extraction, electro-osmotic pulse, vacuum impregnation and surface ponding (topical treatment). Control specimens that did not receive

treatment were also prepared. A second phase of treatment involved casting and treating smaller blocks to investigate the effects of treatments on expansion at the surface and at depth. It was also of interest to determine what effect exposure to sodium chloride de-icing salts and to potassium acetate, a non-chloride anti-icing salt, has on concrete that is being treated with lithium salts. Several samples of concretes that have been topically treated with lithium in the field were collected and the effectiveness of these treatments was assessed. Field treatments in this study did not deliver a sufficient concentration to a sufficient penetration depth to constitute an effective treatment as judged by the guidelines published in FHWA-HRT-06-073. Laboratory topical treatments performed similarly. Electro-Chemical treatments did not consistently deliver sufficient concentrations but warrant further study. Electro Osmotic treatments did not outperform ECE type treatments.

82.

Whitmore, D.W., (2009). "Field Studies in Mitigating ASR in Existing Pavement, Topical Application of Lithium". Innovative Pavement Research Foundation, report IPRF-01-G-002-03-10, 38 pages.

Abstract:

Alkali-Silica-Reactivity (ASR) is a problem exclusive to concrete where there is a reaction between hydroxyl ions (OH⁻) ions present in cement and/or other sources and specific reactive aggregates present in concrete mixtures. This reaction can be present in any concrete construction including roadways, bridges, building and wharves. There is a harmful aspect to this reaction where it causes an expansive gel that causes distress in concrete. This distress can be manifested in forms of cracking, scaling, delaminations and spalls. This is the area of concern when dealing with concrete airport pavements. The result of these distresses may range from excessive growth of concrete pavements, to creation of foreign object debris (FOD).

This study consists of the evaluation of surface applied lithium salts to prevent or slow down the deterioration of concrete pavements due to ASR. Lithium salts have shown the potential to mitigate the causes of the expansion of concrete as a result of ASR. This project consisted of a field study of treatment of concrete pavements already exhibiting ASR by the monitoring and evaluation of treated and control pavement sections. This project was intended to track changes in the serviceability of treated pavement test sections relative to the untreated control sections. Evaluating the ability of lithium salt solutions to maintain and extend the functional service life of existing airfield pavement and reducing the generation of foreign object debris (FOD) were the principal foci of this work.

Site selection included pavement in 3 geographically and geologically diverse areas of the country: Cheyenne, WY (CYS); Phoenix, AZ (PHX) and Atlanta, GA (ATL). These airports were selected based on the level of distress, environmental exposure and amount of area available to treat. Large areas were selected for full-scale topical application of lithium in order to provide an indication of overall effects and the potential for service life extension. At each of the airports initial characterization sampling of the concrete was completed to determine the physical properties that may affect the topical treatment. This included petrographic Damage Rating Index, density, absorption, voids, rate of absorption, coefficient of linear thermal expansion and measurement of the alkali content. In addition to the testing of concrete samples, the pavement surface was characterized by visual condition assessment of the pavement following ASTM and FAA procedures.

Lithium was applied in a full-scale application fashion at a rate of 4.5 gallons per 1,000ft² to give an indication of overall effects and provide a better indication of the service life extension that can be expected. Many trends were observed in the application of the lithium solution. The use of a pre-wetting phase did not show any added benefit, in either daylight or nighttime application. However there was a large benefit to the post-wetting phase. This prevented lithium salt crystallization on the surface of the concrete due to evaporation of the solution liquid which subsequently produced a slick and somewhat “greasy” surface. Also to prevent this effect, the application of was also completed in two applications of 2.25 gallons per 1,000ft² on subsequent days.

Initial alkali testing showed that in most cases the alkali content of the concrete was above the threshold required for further reactivity at the surface. Petrographic analysis of cores taken at the airports also showed that the initial ASR deterioration observed was likely due to alkali-silica reactivity and therefore all areas should continue to show deterioration due to ASR. In CYS and PHX the control zones showed less expansion in the transverse direction than the treated zones. While this might seem to be alarming, the treated areas in CYS were more deteriorated in the beginning of the testing and in the initial petrographic testing showed more reactive concrete.

The two types of visual surveys have given an insight into the level of deterioration of the concrete surface during the testing period. Where CYS showed an ever increasing level of deterioration, and a subsequent deterioration of serviceability, Atlanta and Phoenix’s serviceability did not deteriorate at the same rate. Cracking and joint deterioration at CYS simply continued and was seemingly not kept in check by the topical application of lithium salts. This site was perhaps too far gone to receive any benefit. PHX and ATL began the testing with PCI ratings in the “Excellent” to “Very Good” range and during the testing changed very little. It may be concluded from this observation that whatever benefit is received from the application

of lithium salts may best be served by airport pavements that are in the initial stages of deterioration. However no changes in deterioration or creation of foreign object debris was observed. This type of observation may only be seen after more years of service. If the treatment was effective in these cases, then after several more years it would be assumed that the deterioration would be more severe in the control zone.

At all sites, the penetration of the lithium salts into the concrete was measured. Lithium penetrated only the very top layer of the concrete. At no site did it penetrate any further than 18mm and this was only observed in a multiple application zone. Penetration was measured to be deeper in multiple application zones as compared to single application zones. However at none of the sites did it reach a molar ratio of 0.37 of lithium per alkali; the theoretical ratio for preventing ASR expansion in new concrete. Environmental exposure seems to have affected the lithium absorption at the three different sites. ATL is easily the most humid and receives the most precipitation, which would provide a mode of diffusion for the lithium salts to penetrate further into the concrete.

It is difficult to conclude if the topical application of lithium was successful at mitigating ASR in the tested airport pavements. Penetration depths were shallow, and as such cannot be expected to provide mitigation to the entire thickness of the concrete treated. No FOD generation was observed. Additional time is required to determine whether the treated areas will fare better than the control areas. In some cases the treated areas deteriorated less than the control areas when compared using the PCI rating system. In other cases the treated areas deteriorated more than the control areas when compared using the PCI rating system. With longer timeframe for observation it can be determined if there becomes a more marked difference between the control and treated areas. This also may be aided with the comparison of initial ROSAN test data with future evaluations. Additional evaluation at a later date would provide a clearer picture as to the performance of the topical application. Future testing would be beneficial to provide a more definite conclusion. Any benefit of the treatment will become measureable and apparent with time.

83.

Folliard, K.J., Thomas, M.D.A., Fournier, B., Resendez, Y., Drimalas, T., Bentivegna, A., (2012) Evaluation of mitigation measures applied to ASR-affected concrete elements: Preliminary findings from Austin, Tx exposure site. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Abstract:

This paper summarizes the key findings to date on an outdoor exposure site devoted to studying mitigation measures aimed at reducing the future expansion of concrete elements already affected by alkali-silica reaction (ASR). The primary focus of this project was on the transportation infrastructure, and small-scale specimens based on pavement, bridge deck, and bridge column elements were cast using concrete containing two different reactive aggregates. After ASR was initiated in the various specimens and expansion reached approximately 0.1 percent, a wide range of mitigation measures were applied to the various elements, including sealers, coatings, polymer overlays, hot-mix asphalt overlay, portland cement concrete overlays, fiber-reinforced polymer (FRP) wraps, and lithium nitrate (applied topically, electrochemically, and by vacuum). This paper presents results from only the pavement slab and bridge deck sections and focuses primarily on coatings and sealers; the findings from the columns will be reported elsewhere. The most effective treatments to date have been coatings and sealers (e.g., silanes) that reduce the relative humidity in concrete. The application of lithium nitrate solution to ASR-affected, hardened concrete was found to be ineffective in reducing future expansion.

84.

Ahlstrom, G.M., (2012). The United States Federal Highway Administration's alkali-silica reactivity development and deployment program. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Abstract:

In 2006 The United States transportation legislation, The Safe Accountable Efficient Transportation Equity Act: A Legacy for Users (SAFETEA-LU) provided the Federal Highway Administration (FHWA) with nearly \$10 million to continue efforts to address alkali-silica reactivity (ASR) as a major durability issue. The ASR Development and Deployment Program was established in 2006 to provide technical assistance to States and practitioners to address ASR issues. This paper will briefly discuss previous national ASR programs, discuss the scope of the ASR Development and Deployment Program, and the successes achieved to date through the Program.

85.

Folliard, KJ, Thomas, MDA, Ideker, JH, East, B, Fournier, B. 2008. Case studies of treating ASR-affected structures with lithium nitrate. Proc. of the 13th Int. conf. on AAR in Concrete, June 16-20, 2008, Trondheim (Norway).

Abstract:

Lithium compounds have been found to be effective in reducing expansion of small, ASR-affected laboratory specimens, but there have been little, if any, data showing that lithium compounds are effective in field applications. The research described in this paper aims to fill in this gap in knowledge and focuses on the treatment of ASR-affected structures in the United States. The findings of this study show that topical applications of lithium nitrate are ineffective in reducing ASR-affected due to a lack of penetration of the lithium solution. Vacuum impregnation of lithium in field structures was also found to be ineffective, again due to a lack of lithium penetration. Electrochemical methods of driving lithium compounds into were found to be quite effective in increasing lithium penetration, but the observed migration of sodium and potassium from within the concrete to the reinforcing steel may negate the effects of increased lithium penetration.

86.

Thomas, M.D.A., Folliard, K.J., Fournier, B., Drimalas, T., Rivard, P., (2012) Study of remedial actions on highway structures affected by ASR. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Abstract:

This paper presents information of the different demonstration projects undertaken under FHWA's Alkali-Silica Reactivity (ASR) Development and Deployment Program, with an aim at implementing in the field a number of techniques for mitigating the deleterious effects of ASR in highway structures.

87.

Stokes, D.B., Thomas, M.D.A., and Shashiprakash, S.G. (2000b). "Development of a lithium-based material for decreasing ASR-induced expansion in hardened concrete," Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, (Ed. M.A. Bérubé et al.), CRIB, Quebec City, Canada, pp. 1079-1087.

Abstract:

This paper discusses work performed in the development of an aqueous lithium-based solution for use on hardened concrete to minimize ongoing alkali-silica induced expansions. The material is based on lithium nitrate and includes a proprietary blend of surfactants for aiding in penetration of hardened concrete. Penetration tests are described showing its advantages over other lithium-based solutions. For example, a lithium nitrate solution penetrated twice as well as a lithium hydroxide solution, and a lithium nitrate solution with the proper choice of surfactants penetrated 50% better than the lithium nitrate solution alone, and three times as well as the lithium hydroxide solution. Mortar bar testing with high alkali cement and a highly reactive rhyolite with the lithium nitrate and surfactants shows twice the reduction in post-treatment expansion over treatments with lithium hydroxide solutions when the same amount of lithium is used in both. Soaking bars with the solution has shown better than 75% reduction in post treatment expansion compared to control. Finally, reduction in alkali-silica induced expansion following treatment on concrete prisms made with high alkali cement and the same reactive aggregate is shown and discussed. In both the mortar bars and the concrete prisms, the level of expansion (and hence, the cracking) influenced the effectiveness of the treatments.

88.

Johnston, D.P., Surdahl, R. and Stokes, D.B. (2000). "A case study of a lithium-based treatment of an ASR-affected pavement." Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, (Ed. Bérubé et al.), CRIB, Quebec, Canada, pp. 1149-1158.

Abstract:

This work describes an ongoing project to evaluate the effectiveness of a lithium solution treatment of a pavement in South Dakota, which is undergoing primarily ASR-induced distress. Descriptions of the site, the application of the treatment, and the monitoring program are all presented. The monitoring program consists primarily of measurements of lithium ion penetration, static modulus of elasticity measurements, and impact echo measurements. Modulus values were higher in the treated sections compared to the controls, and this effect persists and increased in the years following treatment. Impact echo measurements show slightly higher frequencies in the control versus the treated sections. Compression wave

velocities were measured on cores before and after removal from the pavement. Larger differences of velocity were noted in the control cores compared to the treated cores, suggesting a higher stress level in the control versus the treated sections. Discussion of current test results indicate that the lithium-based treatment has reduced the stress levels in the pavement.

89.

Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J., Protocol for Selecting Alkali-Silica Reaction (ASR)-Affected Structures for Lithium Treatment, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HRT-04-113, 2004.

Abstract:

This document describes a protocol for evaluating damaged structures to determine whether they are suitable candidates for lithium treatment to address alkali-silica reaction (ASR). A major part of this report deals with the approach/tools that can be used to determine whether ASR is the principal cause or only a contributing factor to the observed deterioration (diagnosis), determine the extent of deterioration due to ASR in the structure, and evaluate the potential for future expansion due to ASR (prognosis). Finally, the report lists items to be included in the proposal that will be submitted for the selection of structures for lithium treatment.

Guidelines on evaluating and managing structures affected by ASR have been published by the Canadian Standards Association (CSA).(1) Pictures of field symptoms and petrographic features of ASR can be found in the documents from CSA, the British Cement Association, the American Concrete Institute, Stark, and Farny and Kosmatka. (See references 1, 2, 3, 4, and 5.) More recently, Folliard and Kurtis summarized such features as part of the Federal Highway Administration (FHWA) workshop material "Guidelines for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent ASR in Concrete."(6,7)

90.

East, B., (2007). "Laboratory and Field Investigations on the use of Lithium Nitrate to Prevent or Mitigate Alkali-Silica Reaction," M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin.

Abstract:

Not available.

91.

Ueda, T., Nanasawa, A., (2012). Effect of electrochemical penetration of lithium ions on concrete expansion due to ASR. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Abstract:

An electrochemical technique to accelerate the penetration of the lithium ions (Li⁺) in a lithium-based electrolyte solution into concrete has been developed for the purpose of suppressing ASR-induced expansion due to Li⁺. From the results of past research work, the penetration area of Li⁺ is limited around the concrete surface and it is difficult to make Li⁺ penetrate into the deeper part of concrete. In this study, experimental investigation was carried out aiming to grasp the influence of the kinds of lithium salts and the temperature of the electrolyte solution on the migration properties of ions in concrete and ASR-induced expansion of concrete. The electrochemical migration of Li⁺ was found to accelerate with rises in temperature and the effective diffusion coefficient of Li⁺ increased three times with changes in temperature from 20°C to 40°C in the case of a Li₂CO₃ electrolyte solution. Moreover, ASR-induced expansion of concrete after this treatment was suppressed compared with the case of non-treated specimens.

92.

Ueda, T., Baba, Y., Nanasawa, A., (2011) "Effect of electrochemical penetration of lithium ions on concrete expansion due to ASR". Journal of Advanced Concrete Technology, 9, 31-39.

Abstract:

Concrete expansion due to alkali-silica reactions (ASR) is one of the serious deterioration mechanisms of concrete structures. However, no promising repair method for ASR has been established yet. In a bid to remedy this situation, an electrochemical technique to accelerate the penetration of the lithium (Li⁺) in a lithium-based electrolyte solution into concrete has been developed for the purpose of suppressing ASR-induced expansion due to Li⁺. From the results of past research work, the penetration area of Li⁺ is limited around the concrete surface and it is difficult to make Li⁺ penetrate into the deeper part of concrete.

In this study, experimental investigation was carried out aiming to grasp the influence of the kinds of lithium salts and the temperature of the electrolyte solution on the migration properties of ions in concrete and ASR-induced expansion of concrete. The electrochemical migration of Li⁺ was found to accelerate with rises in temperature and the effective diffusion

coefficient of Li^+ increased three times with changes in temperature from 20 °C to 40 °C in the case of Li_2CO_3 electrolyte solution. Moreover, ASR-induced expansion of concrete after this treatment was suppressed compared with the case of non-treated specimens.

93.

Miyagawa, T., Yamamoto, T., Mihara, T., Era, K., (2012). "Controlling ASR expansion by lithium ion pressureized injection method. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Abstract:

Recently, lithium ion pressurized injection method has been spotlighted as the repair method of concrete structure which deteriorated by ASR. In this study, the effect of lithium ion on ASR expansion was investigated. The elemental analysis of the ASR gel specimen to which lithium ion had been supplied was also performed by using SEM, EPMA and TOF-SIMS. The change of the physical form of the ASR gel due to the supply of lithium ion was not found by SEM observation. However, the elemental analysis by TOF-SIMS enables to obtain the element mapping of the lithium ion in ASR gel. Furthermore, the elemental analysis by EPMA and TOF-SIMS demonstrated that lithium ion by the pressurized injection method has extended to the ASR gel. The compositional ratio of [Li] to [Na] in the ASR gel was able to be presumed.

94.

Wang, W.C., Liu, C.C., Lee, C., (2012). "Effect of electrolyte on the performance in electrochemical repairing technique for the concrete affected by ASR". Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Abstract:

This research is to study the effect of anolyte on the performance in repairing the concrete damaged by ASR using Accelerated Lithium Migration Technique (ALMT). The cylindrical concrete specimens were designed according to ASTM C1293, made by ASR reactive aggregate with 1.25 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. ALMT tests were performed using 1N $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, 1N LiNO_3 , saturated Li_2CO_3 and saturated $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ as anolytes, and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ as catholyte. 9 A/m² constant current density was used up to 30 days. The concentrations of Na^+ and Li^+ in catholyte were also measured during the test, and the distribution of ions in the specimens, the expansive behavior of the specimens also measured after ALMT test. The results show that using 1N $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ as anolyte was the most effective in driving alkali ion out and driving lithium ion into the concrete, and showing the better effect against expansive ASR.

95.

Liu, CC (2003): Identify the reactivity of aggregates in Taiwan and using electrochemical techniques to mitigate expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, National Central University, ChungLi, Taiwan (in Chinese).

Abstract:

Not available in English.

96.

Shayan, A., Xu., A., Pritchard, R., (2012). "Influence of cathodic protection impressed currents on AAR expansion of concrete containing reactive aggregates". Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Abstract:

Impressed current cathodic protection (CP) is an effective method of mitigating corrosion damage to chloride-contaminated reinforced concrete structures. This process generates OH ions through the cathodic reaction and increases the OH concentration in the concrete around the steel bars, which can promote AAR when the concrete contains reactive aggregates and cause further expansion and cracking.

Laboratory studies in the past two decades, using small concrete specimens and relatively high levels of CP current, have confirmed that CP currents can enhance AAR expansion of concrete. In this study, AAR-affected reinforced columns (300x300x1100 mm), were subjected to three levels of CP (5, 10 and 20 mA/m²), and their expansion monitored.

Results show that increasing CP currents caused increased AAR expansion. It is recommended that the AAR susceptibility of the concrete, and consequences of increased expansion, be evaluated before the application of impressed current CP systems.

97.

Shayan, A., Xu, A. and Hii, A., 2006. Causes of deterioration of precast bridge piles: experimental study/Causes of deterioration of precast bridge piles and effect of repairs on columns. Proceedings of the 6th Austroads Bridge Conference, Perth, Western Australia, 14 pp.

Abstract:

Not a critical work for this project.

98.

Miller, J., (1997). "The perception of the ASR problem with particular reference to electrochemical treatments of reinforced concrete". Proceedings of Eurocorr'97, Trondheim, Norway.

Abstract:

Not a critical work for this project.

99.

Banfill, P.E.G., (1999). "Electrochemical re-alkalisation, chloride removal and alkali-silica reactions in concrete". Annual progress report 1998-1999, COST 521, workshop, Annecy, France.

Abstract:

Not a critical work for this project.

100.

Kashima, A., Kawamata, K., Suzuki, H., Miyagawa, T., Kojima, T., "Application of Cathodic Protection on Reinforced Concrete Deteriorated by Alkali-Silica Reaction," Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Trondheim, Norway, June 16-20, 2008.

Abstract:

A cathodic protection method was applied to specimens suffered from the combined deterioration of alkali-silica reaction (ASR) and chloride attack. The purpose of this study was to verify through experiment the effects of cathodic protection on expansion due to ASR.

Specimens were deteriorated by ASR or chloride attack and ASR, by exposing specimens in outdoors or immersing them in salt water for three years after fabrication. These specimens have been operated through 1.0 mA of current volume for approximately two years under the different curing condition. As a result, encouragement of expansion and changes in external appearance caused by the cathodic protection method was not observed. In addition, corrosion protection effects of cathodic protection were recognized.

101.

Folliard, K.J., Thomas, M.D.A. and Kurtis, K.E., (2003). "Guidelines for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent ASR". FHWA-RD-03-047.

(<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/03047/index.cfm>).

Abstract:

Alkali-silica reaction (ASR) is a significant durability problem that has resulted in premature deterioration of various types of concrete structures in the United States and throughout the world. Although several viable methods exist to prevent ASR-induced damage in new concrete structures, very few methods mitigate further damage in structures already affected by ASR-induced expansion and cracking. Lithium compounds have been recognized for more than 50 years as effectively preventing expansion due to ASR, and there has been renewed interest in recent years in using lithium compounds as either an admixture in new concrete or as a treatment of existing structures. This report is intended to provide practitioners with the necessary information and guidance to test, specify, and use lithium compounds in new concrete construction, as well as in repair and service life extension applications.

This report first provides a basic overview of ASR, including information on mechanisms, symptoms of ASR damage in field structures, mitigation approaches, test methods, and specifications. A comprehensive summary of lithium compounds is provided next, including information on their production, availability, and use in laboratory concrete studies and field applications (including a range of case studies). Guidelines for using lithium compounds as an admixture in new concrete and for treating existing structures suffering from ASR-induced damage then are presented, including information on how to assess the efficacy of lithium compounds in laboratory tests. Some basic information also is provided on the economics of using lithium both in new concrete and as a treatment for existing structures. Finally, the report provides a summary of conclusions and identifies several technical and practical issues that should be considered for future laboratory studies and field applications.

102.

Whitmore, D., Abbot, S. "Use of an Applied Electric Field to Drive Lithium Ions into Alkali-Silica Reactive Structures," International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, (Ed. M-A. Bérubé et al.), Quebec City, Canada, pp.1089–1098, 2000.

Abstract:

One of the most daunting issues related to alkali-silica reactivity, is determine what can be done to maintain hardened structures that are suffering from the deleterious effects. Some of the earliest research demonstrated that lithium could slow, or halt altogether, the expansion of the ASR gel. Experimentation and field installation have proven that a applied electric field can be utilized to mitigate lithium ions into a concrete structure.

103.

Drimalas, T., Folliard, K.J., Thomas, MDA., Fournier, B., Bentivegna, A., (2012) Study of the effectiveness of lithium and silane treatments on filed structures affected by ASR. Proc. of the 14th Int. conf. on AAR in Concrete, May 20-25, 2012, Austin (Texas, USA).

Abstract:

This paper presents information two of the different demonstration projects undertaken under FHWA's Alkali-Silica Reactivity (ASR) Development and Deployment Program, with an aim at implementing in the field a number of techniques for mitigating the deleterious effects of ASR in highway structures. This paper presents data of highway bridge columns in Houston, TX and jersey barriers in Leominster, MA that were treated different types of products in order to minimize expansion. Novel techniques including electrochemical lithium impregnation and other forms of applications are presented herein. These long-term demonstration projects provide accurate field evaluations of concrete deteriorating from ASR. A number of techniques are used to monitor these sites with the results to date are shown in this paper.

Vedlegg: Beskrivelse av oppdraget

Alkalireaksjoner er en skademekanisme som er avhengig av et visst fuktinnhold i betongen for at reaksjoner og ekspansjoner skal foregå. Kritisk grenseverdi for fuktinnhold er ofte satt til 80 % RF, og erfaringer viser at økende fuktinnhold gir økt nedbrytningshastighet. Overflatebehandling av betong, innkledning av betong og elektrokjemisk uttørking av betong er eksempler på preventive tiltak som har til hensikt å redusere fuktinnholdet i betongen og dermed redusere reaksjons-/ ekspansjonshastigheten til en reaktiv betong.

Tilsetting av litium til fersk betong med reaktive delmaterialer er en kjent metode for å hindre utvikling av alkalireaksjoner. Tilførsel av litium ved påføring på betongoverflaten og etterfølgende transport inn i betongen via kapillærsug eller migrasjon, er en omdiskutert og omstridt metode for å redusere/stanse alkalireaksjoner i eksisterende betongkonstruksjoner.

Det skal utarbeides en statusrapport på effekt av overflatebehandling og andre preventive tiltak på eksisterende konstruksjoner med alkalireaktiv betong.

Rapporten skal gi en oversikt over erfaringer (fra felt og laboratorium) med ulike tiltak, med hensyn på effekt på betongens fuktinnhold og ekspansjons-/rissutvikling, herunder:

- Overflatebehandling med belegg (jfr definisjon i NS-EN 1504-2)
- Overflatebehandling med hydrofoberende impregnering (jfr definisjon i NS-EN 1504-2)
- Skjerming av betongoverflaten ved innkledning
- Elektrokjemisk uttørking
- Tilførsel av litium
- osv

Kritiske parametere for å oppnå en effekt av tiltaket skal belyses, herunder f eks:

- Betongkvalitet (masseforhold, ...)
- Type konstruksjonselement og dimensjoner
- Betongens ekspansjons-/risstilstand ved påføring
- Betongens fuktinnhold ved påføring
- Inntrengingsdybde av hydrofoberende impregneringer
- Beleggenes materialegenskaper (diffusjonstetthet, elastisitet, ...)
- Luftsirkulasjon bak innkledning
- osv

Mulige negative bivirkninger av de ulike tiltak skal også redegjøres for.

Rapporten skal baseres på et bredt søk i internasjonale litteraturlister og aktuelle «conference proceedings» – minimum ICAAR-konferanser opp til 2012 og tidsskrift utgitt av forlagene Elsevier, Thomas Telford, Canadian Science Publishing og Springer Science (herunder tidsskriftene: Cement and Concrete Research, Materials and Structures, Magazine of Concrete Research, Construction and Building Materials, Canadian Journal of Civil Engineering). Søkene skal minimum dekke tidsperioden fra 1995 opp til dags dato. Rapporten skal ha en utvidet referanseliste/vedlegg, hvor abstract fra omtalte referanser er inkludert.



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

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen