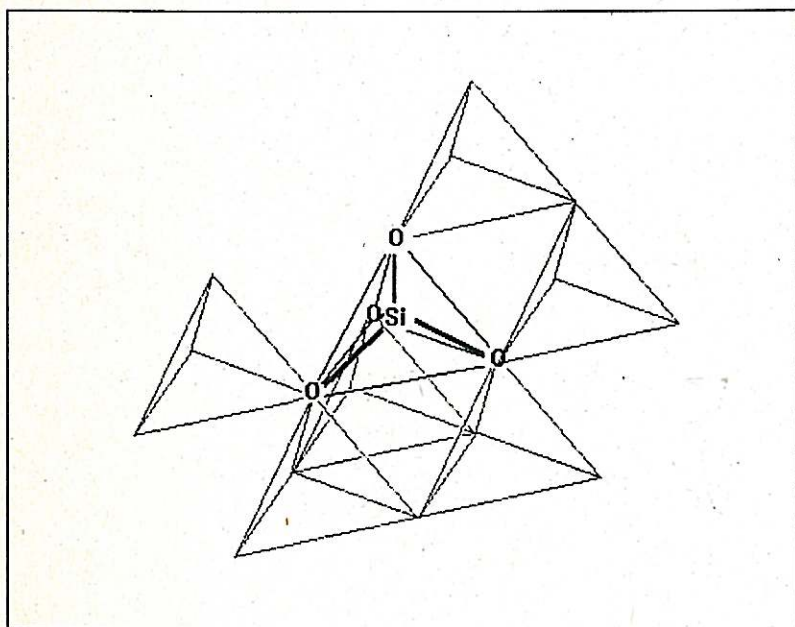


Hans Christian Gran

Alkalitilslagsreaksjoner i betong Kjemiske aspekter



BYGGFORSK

Norges byggforskningsinstitutt

Hans Christian Gran

**Alkalitilslagsreaksjoner i
betong
Kjemiske aspekter**

Prosjektrapport 194 – 1996

Prosjektrapport 194
Hans Christian Gran
Alkalitilslagsreaksjoner i betong
Kjemiske aspekter

Emneord: betong, alkalitilslagsreaksjoner, AKR,
skade

ISSN 0801-6461
ISBN 82-536-0508-0
200 eks. trykt av
S.E. Thoresen as
Cyclus resirkulert papir
Omslag 200 g, innmat 100 g

© Norges byggforskningsinstitutt 1996

Adr.: Forskningsveien 3B
Postboks 123 Blindern
0314 OSLO
Tlf.: 22 96 55 00
Fax: 22 69 94 38 og 22 96 55 42

Forord

Denne rapporten tar i hovedsak for seg de kjemiske sidene ved alkalitilslagsreaksjoner i betong. Målet har vært å gi en enkel innføring i emnet slik at det kan leses av folk uten spesiell kjemisk bakgrunn. Rapporten gir en kort historisk gjennomgang, en beskrivelse av stoffene som er med i reaksjonen, en beskrivelse av reaksjonsmekanismerne samt forhold som kan innvirke på reaksjonsforløpet. Reaksjoner mellom alkalier og tilslag i betong er kompliserte og styrt av mange parametre. På flere områder er mekanismen ikke fullt ut forstått og flere teorier foreligger. Det er derfor naturlig at dette gjenspeiles i rapporten. Rapporten tar ikke for seg de mer tekniske forhold som er knyttet til feltundersøkelser, skadetyper, rehabilitering, tilslagsvurdering og lignende.

Oslo, november 1995

Hans Christian Gran
for Norges byggforskningsinstitutt

Innhold

Forord.....	3
Innhold	4
Sammendrag.....	5
1. Bakgrunn	6
2. Komponentene som reagerer.....	7
2.1 Alkalier.....	7
2.2 Reaktivt tilslag.....	9
3. Reaksjonsmiljø og reaksjonsmekanismer	11
3.1 Porevannet.....	11
3.2 Reaksjonsmekanismer	13
4. Alkalikiselgel	21
4.1 Sammensetning	21
4.2 Ekspansjon/svelling.....	22
5. Fukt- og temperaturavhengighet	25
5.1 Fukt.....	25
5.2 Temperatur	25
6. Tilsetning av pozzolaner	27
7. Kjemiske testmetoder.....	28
8. Referanser	29

Sammendrag

Ekspansjon og oppsprekking i betongkonstruksjoner ble observert allerede tidlig i dette århundret. En sammenheng mellom slike observasjoner og reaksjon mellom alkalier i sement og tilslag ble imidlertid ikke påvist før i 1940. Stadfestelsen av en sammenheng initierte omfattende forskningsvirksomhet i en rekke land og flere typer alkalitilslagsreaksjoner ble identifisert.

Komponentene som reagerer er alkalier, Na^+ og K^+ , bundet i alkalihydroksider i porevæsken i betongen og reaktiv silika eller silikater i tilslaget. Alkaliene kommer hovedsakelig fra sementen eller ekstern tilførsel gjennom salting eller gjennom eksponering for sjøvann. Kjentegnet for reaktive silikamaterialer og silikater i tilslag er mangelfull eller åpen krystallstruktur.

Porevannet i betongen er viktig for reaksjonsprosessen. Det opptrer som transportmedium for reagerende stoffer og er medansvarlig for ekspansjon gjennom absorpsjon i alkalisilikareaksjonsprodukter/alkalisilikagel.

Reaksjonsmekanismene er beskrevet av flere. Hydroksylionene fra alkalier i porevannet angriper i hovedtrekk silikastrukturen og åpner denne for alkalikationer og i neste omgang kalsiumioner. Et kalsium-alkali-silikakompleks dannes som kan trekke til seg vann, svulle og danne et trykk i betongen.

Alkalisilikagel viser seg gjennom kjemiske analyser å variere sterkt i sammensetningen. Vanligvis er kalsiuminnholdet lavt nær reaksjonssonene og høyere når gelen presses ut i bindemiddelet.

Svelling/ekspansjon har ofte vært sett i sammenheng med gelsammensetningen. Nyere arbeider har vist at denne sammenhengen er komplisert. Det har vært vanskelig å relatere svelling og trykkdannelse til alkaliinnholdet i gelen. Også gelens alder har vist seg å ha betydning.

Fukt og temperatur har begge vist seg å ha betydelig innvirkning på ekspansjon. Ved relative fuktigheter over ca 80 % får man en markant økning i ekspansjon i mørtelprismer. Tilsvarende gir en forhøyning av temperaturen en vesentlig hastighetsøkning for både den kjemiske prosessen og ekspansjonen.

Tilsetning av pozzolaner har vist seg å ha gunstig effekt gjennom reduksjon av potensialet for alkalisilikareaksjoner. Den gunstige virkningen forklares ved reduksjon i forholdet mellom innhold av kalsium og silisium i den hydratiserte sementen. Lavt forholdstall Ca/Si øker den hydratiserte sementens evne til å ta opp alkaliioner slik at pH i porevannet reduseres.

Det eksisterer i dag ingen tilfredsstillende kjemiske testmetoder for bestemmelse av potensiell alkalireaktivitet av norsk tilslag.

1. Bakgrunn

Allerede i forrige århundre erkjente man at betong, til tross for at det er et bestandig materiale, kan ødelegges av påvirkninger fra miljøet. Frost og sjøvann ble ansett som de viktigste årsakene til nedbrytning. I løpet av 1920- og 1930-årene ble det rapportert en rekke tilfeller av skader i betongkonstruksjoner i form av utstrakt oppsprekking. Skadene oppsto i betong av relativt god kvalitet. Årsaken forble uoppklart inntil 1940 da T.E. Stanton i USA [1] endelig påviste tilstedeværelsen av en nedbrytende reaksjon mellom alkali og tilslag internt i betongen. Reaksjonen som medførte ekspansjon og oppsprekking av betongen viste seg snart å være mer avhengig av egenskapene til sementen og tilslaget enn av ytre miljøpåvirkning. Det viste seg at reaksjonen var forårsaket av en kombinasjon av høyt innhold av alkali i sementen og opalholdig tilslag. Dette utløste stor aktivitet og allerede året etter kunne Blanks [2] og Meissner [3] påvise dannelse av et kjemisk stoff/reaksjonsprodukt i betongen som følge av reaksjon mellom alkali og tilslag av andesitt og rhyolitt. Det viste seg også at en reaktiv tilslagsandel på bare 2 % var nok til å produsere reaksjon.

Flere forskere tok opp arbeidet også utenfor USA og i de første tiårene etter krigen ble alkalitilslagsreaksjoner påvist i en rekke land. Sentrale arbeider ble gjort av Idorn i Danmark, Vivian i Australia og Swenson i Canada. Foruten i nevnte land er reaksjoner påvist i bl.a. England, India, Island, Italia, Japan, New Zealand, Norge, Sør Afrika og Tyskland. I Norge ble reaksjonene først beskrevet av Arne Kjennerud [4], NBI. Han beskrev reaksjoner i massive betongfundamenter på Rjukan og et svømmebasseng i Skien.

Alkalitilslagsreaksjoner er hovedsakelig påvist i større konstruksjoner av betong, som dammer, bruer, fundamenter og dragere. Felles for alle disse konstruksjonene er at betongen har god tilgang på vann/fuktighet.

Arbeidet med alkalitilslagsreaksjoner har i hovedsak omfattet tre hovedområder:

- i) Påvisning, testing og vurdering av effekter av reaksjon. Herunder faller tynnslipanalyse, kjemiske tester og akselererte ekspansjonsmålinger av materiale tatt ut fra de aktuelle konstruksjonene.
- ii) Identifikasjon av reaktive mineralkomponenter i tilslaget. Herunder faller petrologisk/petrografisk analyse av tilslag ved hjelp av tynnslipanalyse og akselererte tester på mørtelprismer.
- iii) Forskning omkring reaksjonsmekanismer.

Tre forskjellige typer alkalitilslagsreaksjoner er beskrevet [5]:

- 1) *Alkalikarbonatreaksjon*. Reaksjon mellom alkali og finkornet magnesiumholdig kalksteinstilslag (dolomitisk kalkstein). Reaksjonsmekanismen er ennå ikke fullt ut kartlagt. Reaksjonen er ikke rapportert i Norge.

- 2) *Alkalisilikareaksjon.* Reaksjon mellom alkali og ustabile (metastabile) silika-mineraler (rent silisiumoksid, eksempler: kvarts, tridymitt, kristobalitt) i tilslaget. Disse mineralene er listet opp av Mielenz et al (se senere i rapporten) [6]. Reaksjonsmekanismen er relativt godt forstått.
- 3) *Alkalisilikatreaksjon.* Reaksjon mellom alkali og silikater (urene silisiumoksidforbindelser – d.v.s. med innhold av fremmede metaller som kalium, natrium, magnesium, kalsium). Reaksjonsmekanismen er ikke fullt forstått.

Senere er reaksjoner av type 3 også blitt kalt "Slow/Late Expanding Alkali Silica/Silicate Reactions (SLEASS)", langsomt/sent ekspanderende alkalisilika/silikat reaksjoner [7]. Disse reaksjonene omfatter mindre reaktive tilslagstyper og kjennetegnes ved langsom reaksjonsutvikling der tegn til reaksjon ses først etter 10 til 20 år. I Norge kommer alle alkalireaktive tilslagstyper inn under denne sistnevnte kategorien.

2. Komponentene som reagerer

2.1 Alkalier

Fellesbetegnelsen alkalier kommer fra det kjemikerne kaller det periodiske system; det vil si det systematiserte kartet over grunnstoffene. Alkaliene eller rettere sagt alkalimetallene er en av grunnstoffgruppene i dette kartet. I gruppen inngår grunnstoffene hydrogen (H), natrium (Na), kalium (K), rubidium (Rb) og cesium (Cs). Av disse alkaligrunnstoffene er det bare kalium og natrium som er av betydning i alkalitilslagsreaksjoner i betong. Natrium og kalium er naboer i det periodiske system og har således meget like egenskaper og kjemisk oppførsel. Natrium som natriumklorid (NaCl) er som de fleste er klar over hovedbestanddelen i det vi kaller koksalt.

Siden egenskapene til de to grunnstoffene er relativt like også i betongsammenheng har man valgt å innføre en såkalt natriumekvivalent. Årsaken til dette er at natrium og kalium har forskjellig vekt. Kalium er tyngst. Skal man ha like konsentrasjoner av natrium og kalium, det vil si samme antall atomer per volumenhet, må man veie inn mer kalium enn natrium.

Når en betong inneholder både natrium og kalium er derfor den totale mengden alkalier omgjort til natriumekvivalenter:

$$\text{Natrium ekvivalent} = \text{Vekt-\% Na}_2\text{O} + \text{Vekt-\% K}_2\text{O}$$

Natrium og kalium er angitt som oksider slik at Na₂O er natriumoksid og K₂O er kaliumoksid.

Alkaliene i betong kommer hovedsakelig fra sementen. De fleste sementer inneholder mer eller mindre alkalier. De tilføres gjennom råmaterialene som sementen lages av. Mest alkali finnes i leire og andre silikaholdige utgangsmaterialer. Portland sement er laget ved at oppmalt kalsiumkarbonat (kalkstein) og silikaholdige mineraler varmes opp i en roterende ovn. Etterhvert som temperaturen øker oppstår en rekke kompliserte reaksjoner, dels i fast fase og dels i smeltet fase. Ved ovns høyeste temperatur på ca. 1450 °C dannes nye sementmineraler. Disse består av kalsiumoksid (CaO) forkortet til C, silisiumoksid (SiO₂) forkortet til S, aluminiumsoksid Al₂O₃ forkortet til A og jernoksid (Fe₂O₃) forkortet til F. Det dannes i hovedsak fire forskjellige sementmineraler, C₃S, C₂S, C₃A og C₄AF, og disse utgjør hovedbestanddelene i den ferdige sementen.

Når råmaterialene til sementen går inn i sementovnen, vil halvparten av alkaliene først dannes til alkalisulfatsmelter og senere fordampe når blandingen når de varmeste områdene nederst i ovnen. I ovnen oppstår en syklus [8] der fordampede alkalier går bakover i ovnen, avsettes i de kaldere områdene og føres nedover igjen, smelter og fordampes på nytt. Figur 1 gir et bilde av sementovnen med tilførselstårn og reaksjonszoner. Alkalismeltene gir et gunstig reaksjonsmiljø for resten av råmaterialblandingen. I den ferdige sementen foreligger alkaliene som alkalisulfater kondensert på overflaten av sementkornene og løst i sementmineralene C₂S (mest K) og C₃A (mest Na). Norsk sement inneholder mer kalium enn natrium. Reduksjon av alkali er kostbart å gjennomføre. Prosessen blir mer energikrevende når varme alkalidamper fjernes fra sementovnen. For å unngå alkalitilslagsreaksjoner regner man at alkaliinnholdet ikke bør overstige 0.6 % av sementvekten. Anbefalinger i England sier også at vekt alkali fra alle kilder ikke skal overstige 3.0 kg per kubikkmeter betong.

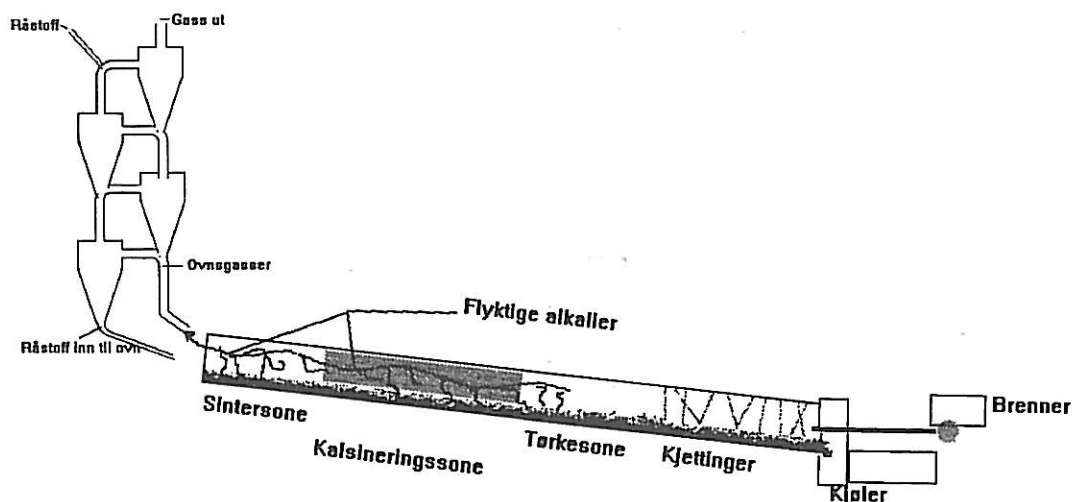


Fig. 1 Tegningen viser bilde av en sementovn med tilførselstårn (syklontårn) og kjøler. Flyktige alkalier beveger seg fra de varmeste områdene nederst til høyre i ovnen og avsettes fra øvre del av kjettingssonen og helt opp til syklontårnet.

Mange anser også at alkalier kan tilføres ved at de lekker ut fra tilslaget [9, 10, 11]. Spesielt sannsynlig er dette for tilslag som har oppnådd en grad av "geologisk nedbrytning" før det brukes som tilslag i betong. En delvis nedbrytning vil kunne gjøre at i hvertfall en del av alkaliene lekker ut til poresystemet i den hydratiserte sementpastaen. En tilslagstype som er aktuell her er feltspat.

I tillegg kommer eksterne kilder gjennom vegsaling og eksponering for sjøvann. Undersøkelser gjort i laboratorier indikerer at eksternt tilførte alkalier øker ekspansjonen i mørtelprismer [12, 13].

Også flyveaske kan inneholde alkalier. Sammensetningen av flyveaske er generelt varierende [14]. ASTM klassifiserer to typer aktuelle flyveasker. Type F med høyt silika og aluminiumsinnhold og type C med høyere innhold av kalsium. Begge flyveaskene kan inneholde en god del alkali. I type F er alkaliene konsentrert til glassfasen. Denne fasen er basis for dens pozzolanaktivitet og alkaliinnholdet i denne kan derfor potensielt være tilgjengelig for alkalitilslagsreaksjoner [15]. Kjemien her er imidlertid kompleks og ikke fullt ut forstått.

2.2 Reaktivt tilslag

Den reaktive delen av tilslag kan bestå av rent silisiumoksid og/eller ulike silikater. Man regner at SiO_2 utgjør ca. 65 % av den tilgjengelige delen av jordskorpen. SiO_2 forekommer som nevnt både alene som silika og som silikater der silika opptrer i kombinasjon med andre grunnstoffer. Silisiumoksid SiO_2 forekommer både i krystallinsk fase og som glass (amorft). Felles for krystallinske faser er at silisiumatomene (Si) og oksygenatomene (O) sitter sammen i en ordnet struktur. Enklest kan man tenke seg strukturen representert ved en pyramide med trekantet grunnflate (tetraeder) der et O-atom sitter i hvert hjørne og et Si-atom sitter i midten som vist på figur 2. Krystallinske silikaminerale og silikater er bygget opp ved at slike tetraedre er satt sammen på ulike måter, og slik at de hele tiden kun deler hjørner.

For silika eksisterer tre ulike krystallinske "byggesystemer" (polymorfer) av tetraedre. Disse er kvarts, tridymitt og cristobalitt. Kvarts som det finnes mest av er karakterisert ved sterk kryssbinding og tett struktur. Den er derfor bestandig og relativt uberørt av de fleste sterke syrer og baser. De to andre polymorfene derimot har mer åpen struktur og er derfor potensielt mer reaktive overfor alkali.

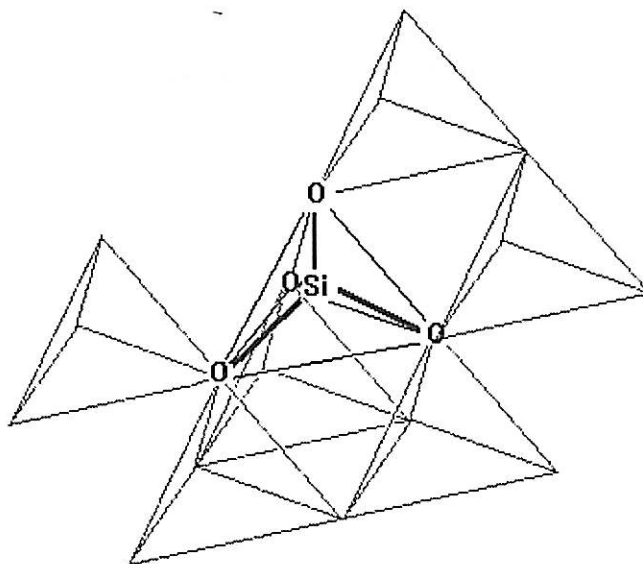


Fig. 2 Tegningen viser en typisk "byggesten", tetraeder, i krystallinske strukturer av silikater og silika-mineraler. Tilgrensende tetraedre er antydnet.

Som i krystallinske silikaforbindelser er silika også i glassfase kjennetegnet ved at Si-atomer og O-atomer er alternerende plassert. Imidlertid har glassfasen ingen systematisk struktur. Si-atomene og O-atomene er bundet sammen i kjeder med tverrbindinger. Glass er fysikalsk-kjemisk sett faktisk å betrakte som en væske.

Både krystallinsk fase og glassfase finnes i mange bergarter og mineraler. Ganske tidlig relaterte man derfor alkalireaktivitet til bestemte typer av de forskjellige bergartene og mineralene. Som eksempel kan nevnes Mielenz et al. i 1947 [16] og senere Dolar-Mantuani i 1983 [17]. Norske tilslag og mineraler som er identifisert som skadelig reaktive ved tilgang på alkalier er beskrevet av W. Jensen, 1993 [18]. Disse er listet opp i tabell 1.

Tabell 1

Oversikt over tilslag som er identifisert som potensielt reaktivt i Norge [18]

Magmabergarter	Sedimentære bergarter	Omvandlede (metamorfe) bergarter
Rhyolitt Granitt*	Sandstein og kvartsitt Gråvakke Mergel Argillitt (mer finkrystallinsk enn sandstein)	Fyllitt Gneiss Hornfels* Knusningsbergarter

*) Kun et tilfelle registrert i 1993

I de senere årene har en økende grad av usikkerhet oppstått omkring bruk av bergarts-type alene som kriterium for et tilslags potensielle reaktivitet. Poole 1992 [19] foreslår at man i stedet tar utgangspunkt i de enkelte mineralene tilslaget er sammensatt av.

Kjennetegn ved reaktivt tilslag er silikaminerale og silikater

- med uryddig krystallstruktur, mange svake punkter eller feil i krystallgitteret slik at gitteret lett kan brytes istykker av fremmede atomer
- som består av små krystaller, f.eks. mikrokrySTALLinsk kvarts
- som består av krystaller med spenninger, ses f.eks. i kvarts, gråvakke, hornfels, granitt og granittisk gneiss
- i glassfase, amorft, finnes f.eks. i rhyolitt
- som er mikroporøst med stor overflate for evt. reaksjoner

3. Reaksjonsmiljø og reaksjonsmekanismer

3.1 Porevannet

Når betonger blandes er v/c-tallet en viktig parameter. V/c-tallet ligger typisk mellom 0,35 og 0,55. Den vannmengde som trengs for fullstendig hydratisering av sementen er imidlertid mye mindre, og beregnet som v/c-tall er den på ca 0,24. Vann er derfor vanligvis tilstede i overskudd selv i velherdede (ikke uttørkede) betonger. Den herdede betongen består av uhydratisert sement, hydrasjonsprodukter, tilslag og vann. Ved herdeprosessen går porene der vannet er over fra å være et åpent gjennomgående system til å bli et diskontinuerlig system etterhvert som porene fylles med nydannede hydrasjonsprodukter. For v/c-tall over 0,35-0,40 ser man også at vann legger seg i grensesjiktene mellom pasta og tilslag. Porevannet kan derfor ses på som bindeleddet mellom tilslag og sementpasta og dermed mediet hvor alkalitilslagsreaksjonene finner sted.

Undersøkelser av porevannets sammensetning har vært gjort i mange laboratorier [20, 21, 22, 23]. Målingene har vært gjort på forskjellige måter. Vanligst, og regnet for å gi mest representative data, er porevannspresing med inntil 100 tonns trykk på små betongprøver som er 4 - 5 cm i diameter. Det bildet man får av porevannet i herdet betong er at alkalikonsentrasjonen er relativt høy. Den kan være inntil 1 mol per liter, tilsvarende 39 gram per liter eksempelvis for kalium. Kalsiumhydroksidkonsentrasjonen derimot er vesentlig lavere, tilsvarende 0,1 milligram per liter. Både alkalier og kalsium foreligger som ioner, K^+ , Na^+ og Ca^{2+} .

Alkalikonsentrasjonen øker i løpet av herdeprosessen. Barneyback og Diamond [22] fant stabil konsentrasjon etter 70 døgn herding, mens Marr og Glasser [21] registrerte dette etter 90 døgn. Grunnen til det lave kalsiuminnholdet er at alkaliene har bedre løselighet. Siden de deler anion (OH^-) med kalsium, vil kalsium felles ut som fast kalsiumhydroksid. Et eksempel på utviklingen av ionekonsentrasjoner i porevannet er gjengitt i figur 3 [22]. Tabell 2 viser tilsvarende analyseverdier målt av Page og Vennesland [23] ved hjelp av porevannspresing i perioden 7 til 84 døgn etter utstøping.

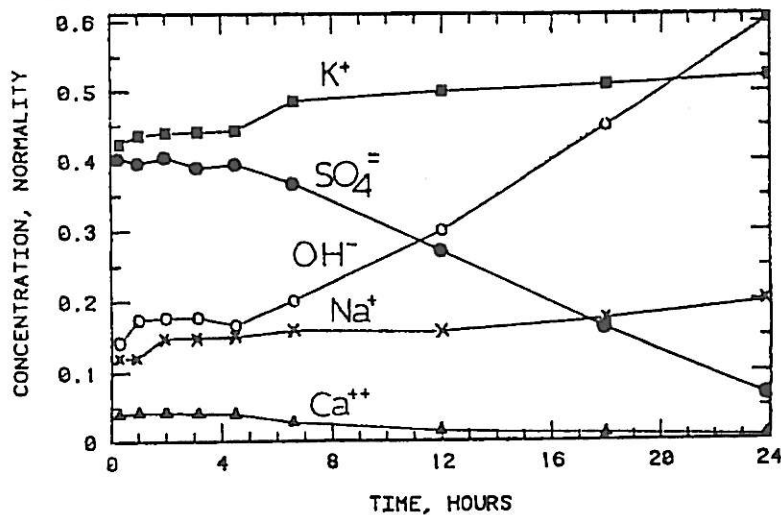


Fig. 3 Konsentrasjoner av kalsium, kalium, natrium, sulfat og hydroksyl ioner i presset porevann slik det ble registrert hos Dimond og Barneyback [22]. SO_4^{2-} kommer fra gips. Konsentrasjonen reduseres gjennom utfelling som ettringitt. OH^- øker for å balansere K^+ og Na^+ . Forfatterne fant også at Ca^{2+} -konsentrasjonen faller til en meget lav verdi allerede i løpet av en til to dager.

Tabell 2

Konsentrasjoner av forskjellige ioner i porevannet i betong under herdeprosessen [23]

Herdetid i døgn ved 22°C	Ionekonsentrasjon ($\times 10^{-3}$ mol per liter)				
	Na	K	Ca	OH	SO ₄
7	263	613	1	788	23
28	271	629	1	834	31
56	332	695	3	839	44
84	323	639	2	743	27

På grunn av det høye OH^- -innholdet er porevannets pH meget høy. For en mettet $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -løsning ligger pH på 12,5. For løsninger der KOH og NaOH er tilstede kan pH ligge på over 13. Den høye pH-verdien er som vi senere skal se noe av grunnlaget for at silkastrukturer i tilslaget kan brytes ned.

Konsentrasjoner av alkaliioner har vist seg å være lavere i betonger der alkalitilslagsreaksjoner pågår. Dette er blant annet observert av Diamond, Barneyback og Struble, 1981 [24] ved sammenligning mellom reagerende og ikke-reagerende mørtler. Se figur 4. En grundigere gjennomgang av poreløsningens sammensetning med metode for å forutsi alkaliionkonsentrasjoner, samt kinetikk og likevektsbetraktninger er å finne hos Taylor, 1987 [25]. Likevektsbetraktninger og behandling av porevæskedata er også mer utførlig gjennomgått av Glasser, 1992 [15].

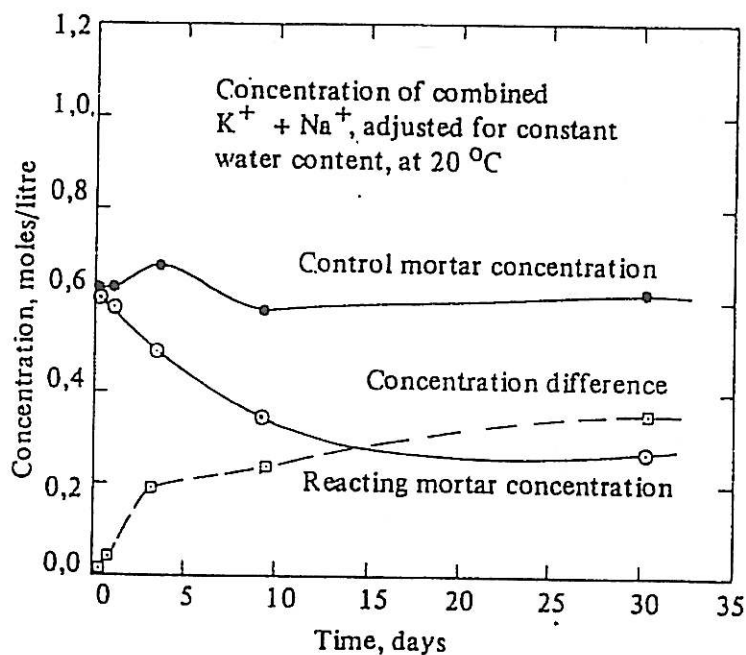


Fig. 4 Sammenligning av K⁺- og Na⁺-innholdet i porevannet i reagerende (o) og ikke-reagerende (•) mørtel som funksjon av tiden ved 20 °C [24].

3.2 Reaksjonsmekanismer

Flere teorier har i tidens løp vært foreslått for å beskrive de kjemiske reaksjonsmekanismene som ligger til grunn for alkalitilslagsreaksjonen. Selv om mekanismene etterhvert er blitt bedre forstått, hersker det fremdeles usikkerhet når det gjelder å forklare deler av reaksjonen. Spesielt er rollen til kalsiumhydroksid fremdeles uklar. Generelt er man enige om at reaktive silikamineraler og silikater kan brytes ned i et sterkt alkalisk (basisk) miljø slik det er i porevannet i betong. Strukturene brytes opp ved at de angripes av en kombinasjon av hydroksyl-, alkali- og kalsiumioner. Det dannes et reaksjonsprodukt som kan variere i sammensetning og egenskaper. Reaksjonsproduktet kan inneholde kalsium, alkalier og silisium (kalsium-alkali-silikakompleks) eller kun alkali og silika (alkali-silikakompleks). Reaksjonsproduktene kan i forskjellig grad ta opp vann og derved sprengne betongen gjennom trykkøkning.

Hvordan sprengningsprosessen rent fysisk foregår er beskrevet av flere [26, 27, 28]. Reaksjonsproduktene tar opp vann slik at volumet øker. Tidlig i prosessen er reaksjonsproduktene fremdeles å betrakte som ikke deformerbart fast stoff. Etterhvert som vann tas opp, omdannes reaksjonsproduktene til deformerbar alkalisilikagel. Sprengningsprosessen starter ved at den viskøse gelen fyller ut tilgrensende hulrom/luftporer. Etter at alle hulrom er fylt oppstår et trykk og flere små sprekker dannes i den omkringliggende betongen. Sprekkene fylles med reaksjonsprodukter. Når tilstrekkelig vann er tatt opp, omdannes gelen til væskeaktig sol. Som væske antas reaksjonsproduktet ikke lenger å være sprengende. Prosessen er enkelt illustrert i figur 5 på neste side.

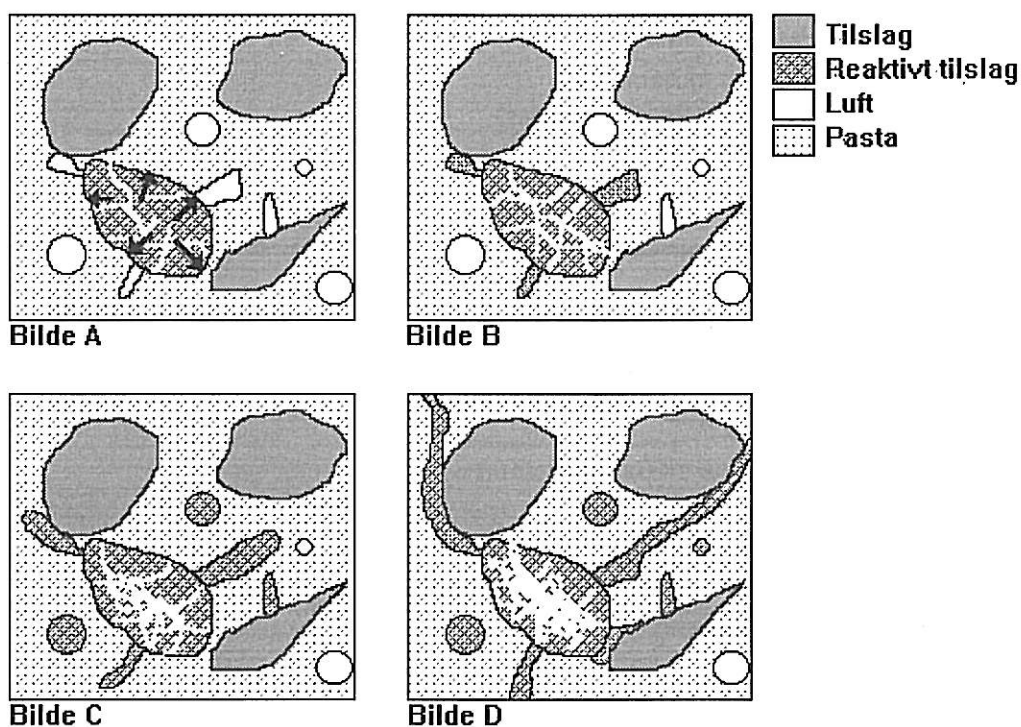


Fig. 5 Tegningen viser hvordan en alkalitilslagsreaksjon utvikler seg i betong.
 Bilde A: Tilslagskornet tilføres alkalier og vann og reaksjonsprodukter dannes. Et indre trykk bygges opp.
 Bilde B: Reaksjonsproduktene utvider seg videre og hulrom/luftporer i betongen fylles.
 Bilde C: Betongen gir etter og viser begynnende oppsprekking.
 Bilde D: Gjennomgående sprekker har dannet seg i betongen. Samtidig har det reaktive tilslagskornet delvis gått i oppløsning innvendig på grunn av at deler av tilslagsmaterialet er forbrukt i reaksjonen.

Vi går nå kort igjennom to av de viktigste teoriene som er foreslått for alkalitilslagsreaksjoner, for dernest å ta frem to senere arbeider der kjemien er beskrevet mer i detalj.

Powers og Steinour's modell [27] som ble framsatt i 1955 har som forutsetning at alkali-silikakomplekser er sprengende, mens kalk-alkali-silikakomplekser er ikkesprengende. Prosessen er ellers foreslått som følger:

1. En sone av ikkesprengende kalk-alkali-silikakompleks bygges opp rundt ureagert silikakorn (i tilslaget) ved angrep av natrium og kalsiumhydroksider. På den måten skilles ureagert silika fra porevannet.
2. Ved videre angrep på silika diffunderer kalsium og/eller alkali gjennom den ikkesprengende sonen og reagerer med mer silika. Det relative forholdet mellom mengde kalsium og alkali i porevannet bestemmer hva slags kompleks som dannes i silikakornet.

3. Hvis kalsium-alkaliforholdet i porevannet er høyt nok, vil kalsium transporteres til reaksjonsområdet raskt nok til å produsere et ikkesprengende kompleks.
4. Hvis kalsium-alkaliforholdet i porevannet ikke er høyt nok, vil et alkali-silika-kompleks dannes som kan ta opp vann og sprengne betongen.

Kalsiumionkonsentrasjonen i porevannet styrer dermed hvorvidt sprengende kompleks dannes eller ikke.

Chatterji [28] aksepterte ikke at kalsium-alkali-silikakomplekset ble karakterisert som ikkesprengende. Han presenterte en teori der netto transport av materiale inn i silikakornet forårsaker sprengning:

1. Hydroksylionenes angrep på silikakornets overflate ledsages av at kationer (K^+ , Na^+ og Ca^{2+}) trenger inn til reaksjonsområdene. Siden Na^+ - og K^+ -ionene er mindre enn Ca^{2+} -ionet, følger flere Na^+ - og K^+ -ioner med inn.
2. Noen silikamolekyler transporteres vekk.
3. Ca^{2+} -ionkonsentrasjonen i porevannet bestemmer hvor raskt silikamolekylene transporteres ut av silikakornene. Ved høy Ca^{2+} -ionkonsentrasjon reduseres silikattransporten, mens kationtransporten øker.
4. Sprengning inntreffer når kationtransporten inn i silikakornet er større enn transporten av silika ut av kornet.

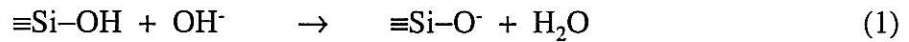
Ca^{2+} -ionkonsentrasjonen i porevannet bestemmer altså også her hvorvidt en sprengende virkning skal oppstå eller ikke.

For å komme nærmere en grunnleggende forståelse av reaksjonsmekanismen for alkalitilasagsreaksjoner, er det imidlertid nødvendig å se mer i detalj på hvordan molekyl/gitterstrukturen i det reaktive tilslaget brytes opp. Det man anser som grunnleggende i reaksjonsmekanismen er at silikastrukturen brytes opp av hydroksylionene (OH^-) som er til stede i store mengder i det meget basiske/alkaliske porevannet. Som nevnt kommer hydroksylionene i første rekke fra de lett løselige hydroksidene KOH og NaOH. Silikastrukturen har i tillegg enkelte fellestrekk med strukturen vi finner i vanlig is. Dette bidrar også til at H_2O og OH^- -ioner lettere kan bygges inn i strukturen. Når fremmede molekyler og atomer kommer inn, fjernes flere av de tverrbindingene som bidrar til å gi strukturen styrke, og strukturen går i oppløsning.

For å få bedre innsikt i reaksjonsmekanismen studerte L.S. Dent-Glasser og N. Kataoka i 1981 [29] et forenklet modellsystem der silikagel reagerte med NaOH. De så for seg en struktur med OH (også kalt OH-grupper eller silanolgrupper) festet til Si-atomer på overflaten av strukturen. De delte reaksjonen opp i tre trinn.

Første trinn der bindinger mellom Si og O brytes og silanolgrupper dannes.

Andre trinn der silikagelen plasseres i NaOH-løsningen kan ses på som en syre-base reaksjon der de basiske hydroksylionene i løsningen reagerer med de sure silanolgruppene. Ligning 1.



Betegnelsen $\equiv\text{Si}-$ angir at Si binder til oksygenet i en silanolgruppe samt til tre oksygenatomer i strukturen. Den negative ladningen på oksygenet (O^-) til venstre i ligningen balanseres ved at Na^+ -ioner samtidig diffunderer inn i strukturen. Totalt sett kan trinnet ses på som en utskiftning av H^+ med Na^+ uten at noen av bindingene (kalles siloxanbroer, $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$) i strukturen brytes.

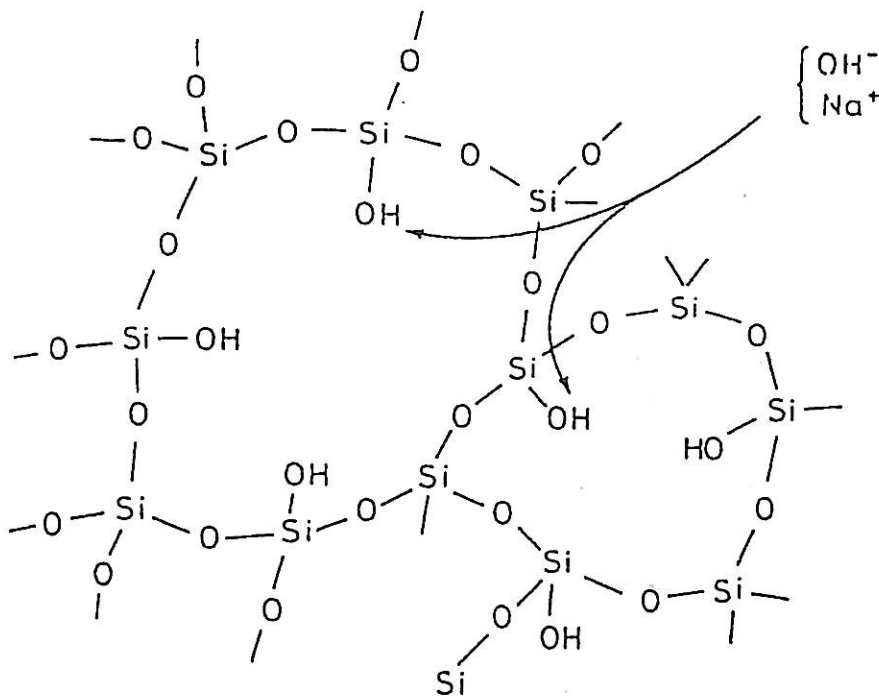


Fig. 6 a Tegningen viser en dårlig krystallisert silikastruktur der silanolgruppene nøytraliseres av Na^+ . Dent-Glasser og Kataoka, 1981 [29].

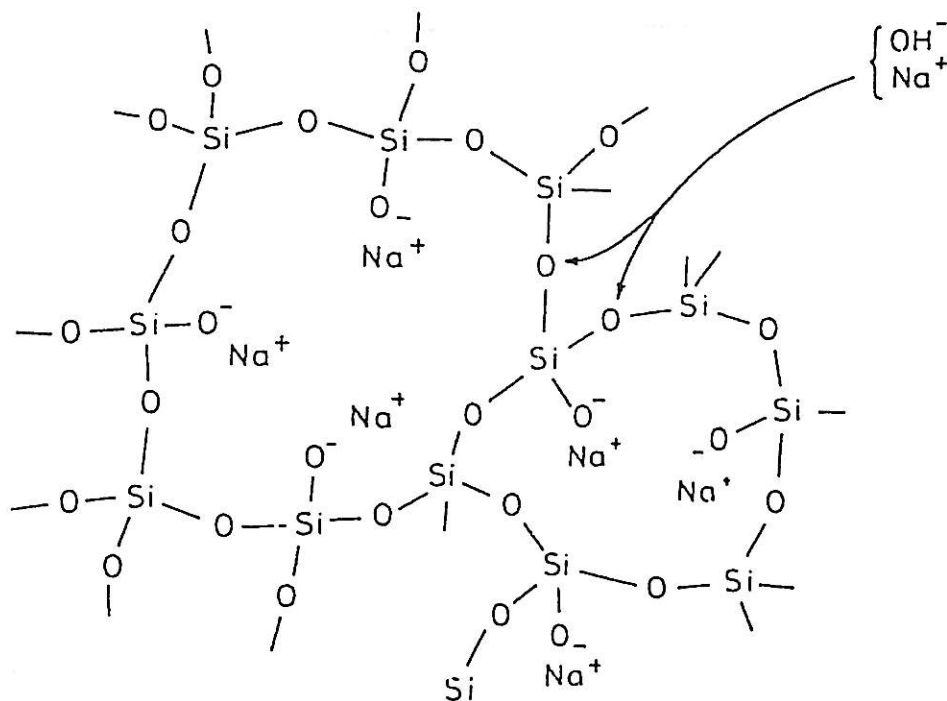
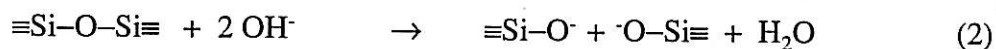


Fig. 6 b Videre tilførsel av alkali og vann (her utelatt) angriper siloxanbroene.

Tredje trinn i reaksjonen skjer ved at hydroksylionene diffunderer inn i strukturen og et angrep på siloxanbroene begynner. Ligning 2. Dette løser samtidig opp strukturen slik at Na^+ og vann kan absorberes.



Tilslutt faller strukturen helt fra hverandre og går i løsning i porevannet som silikationer, H_2SiO_2^- . Ved slutten av andre trinn er strukturen som vist i figur 6 a. Ved slutten av tredje trinn er strukturen som vist i figur 6 b.

Poole, 1992 [30], utdypet teorien til Dent-Glasser og Kataoka. Han påviste bl.a. at Ca^{2+} -ionene holdt seg nær overflaten av silikastrukturen i form av CSH-gel. Han understreket også reaksjonens dynamiske karakter ved at siloxanbruer hele tiden brytes opp og dannes på nytt mens K^+ - og Na^+ -ioner trenger inn i strukturen.

H. Wang og J.E. Gillott 1991 [31] undersøkte hvordan kalsiumhydroksid tilsetning virket inn på ekspansjonen i mørtelprismer støpt med NaOH og både med og uten mikrosilika. Opal ble brukt som tilslag. Det viste seg at $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -tilsetning ga ekspansjon i samtlige prøver. Prøvene med mikrosilika viste ikke ekspansjon uten tilsetning av $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Disse observasjonene ble brukt til støtte for deres teori for reaksjonsmekanismen som beskrives i fem trinn.

Første trinn: Før reaksjonene starter er silanolgrupper festet til overflaten på opalkornene. Jmfør Dent-Glasser og Kataoka. Dette er vist i figur 7 a.

Annet trinn: Hydrogenatomene i silanolgruppene på overflaten erstattes med både Na⁺, K⁺- og Ca²⁺-ioner. I den tidlige fasen av reaksjonen skjer utskiftningen hovedsakelig på overflaten. Et kalsium-alkali-silikakompleks dannes. Se figur 7 b. Det skjer foreløpig ingen ekspansjon.

Tredje trinn: Hydroksylioner bryter ned siloxanbroer internt i strukturen. Indre silanolgrupper dannes. Se figur 7 c.

Fjerde trinn: Hydrogenatomene i de nydannede silanolgruppene skiftes ut med K⁺- og Na⁺-ioner. Figur 7 d. Et alkali-silikakompleks dannes. Komplekset har en høy affinitet til vann; det sveller og forårsaker ekspansjon i betongen.

Femte trinn: K⁺ og Na⁺ skiftes ut med Ca²⁺ og alkaliene trenger videre inn i strukturen. Se figur 7 e.

At alkaliionene diffunderer raskere til reaksjonsområdene enn kalsiumionene forklares med at konsentrasjonen av alkaliioner er høyest, og at kalsiumionet er større enn alkaliionene. Etterhvert vil kalsiumioner diffundere inn i strukturen og overta plassen til alkaliioner som igjen frigjøres slik at de kan trenge videre inn. Noe alkali vil forbli bundet. Utfra dette slutter forfatterne at der vil danne seg en fordeling av ioner i det ytterste reaksjonslaget slik at kalsiumionene er konsentrert nær overflaten, mens konsentrasjonen av alkali vil nå et maksimum et stykke inn for så å avta til null. Dette er i tråd med observasjoner som er gjort ellers [32, 33].

At K⁺ og Na⁺ har et forsprang på Ca²⁺ ved inntrengning i silikastrukturen er også observert av Kawamura, Takemoto og Hasara, 1982, [34]. Med elektronmikroskop og energidispersiv røntgenanalyse bekreftet de den raske inntrengningen til alkaliene og mer langsomme inntrengningen til Ca²⁺ i reagerende opalkorn.

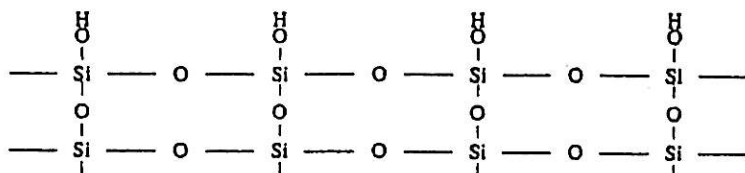


Fig. 7 a Opprinnelig opal, etter Wang og Gillott [31].

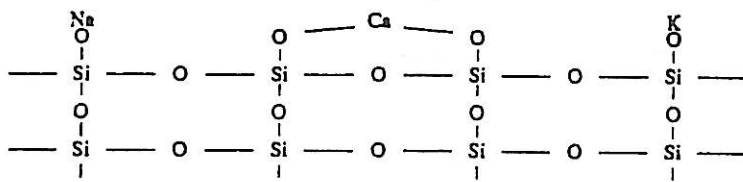


Fig. 7 b Silanolgruppenes hydrogenatomer skiftes ut med K^+ , Na^+ og Ca^{2+} .

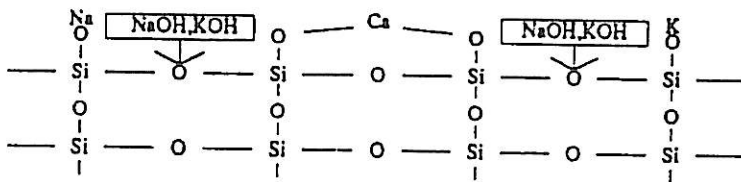


Fig. 7 c Alkaliangrep på siloxanbruer inne i strukturen.

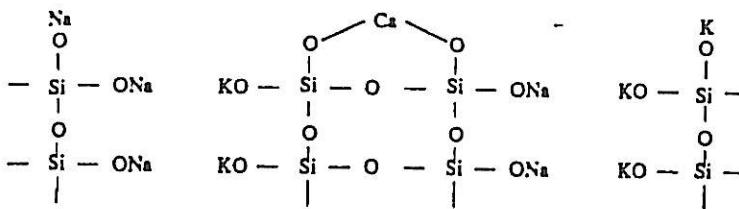


Fig. 7 d Hydrogen på nydannede indre silanolgrupper skiftes ut med K^+ og Na^+ .

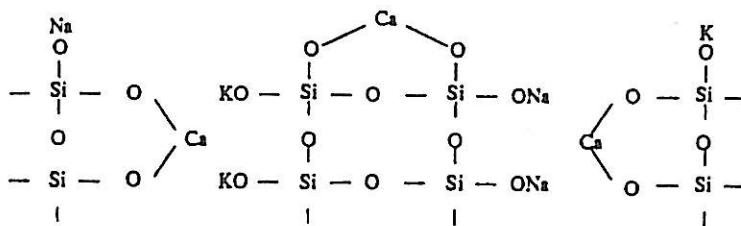


Fig. 7 e Ca^{2+} -ioner skifter ut K^+ - og Na^+ -ioner.

Wang og Gillott konkluderer med at $\text{Ca}(\text{OH})_2$ har to hovedfunksjoner i alkalisilika-reaksjonen. 1. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ er en kilde til OH^- -ioner etterhvert som de opprinnelige OH^- -ionene går inn i silikastrukturen. 2. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ er en kilde til Ca^{2+} -ioner etterhvert som Ca^{2+} -ionene erstatter alkaliionene og hydrogen på silanolgrupper. Tilstedeværelse av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bidrar derfor til ekspansjon og nedbrytning av betong.

Betydningen av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ for alkalisilikareaksjonen ble også diskutert av Chatterji, Fördös og Thaulow (1992) [35]. De lagret mørtelprismer støpt med sementer med forskjellige SiO_2 -innhold i NaCl -løsning. SiO_2 -innholdet styrte innholdet av krystallinsk $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i det hydratiserte bindemiddelet. Det viste seg at lavt krystallinsk $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -innhold i pastaen sammenfalt med redusert inntrengning av kalsium- og natriumioner i tilslaget i tillegg til redusert alkalisilikareaksjon og redusert ekspansjon i prøvene. Deres resultater indikerte en reaksjon som illustrert i figur 8. De konkluderte med at $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aksellererer inntrengningen av Ca^{2+} , K^+ , Na^+ og OH^- i reaktive tilslagskorn, understøtter reaksjonen i figur 8, reduserer diffusjonen av SiO_2 ut av reaktive korn og har rollen som en buffer for å opprettholde en høy konsentrasjon av OH^- -ioner.

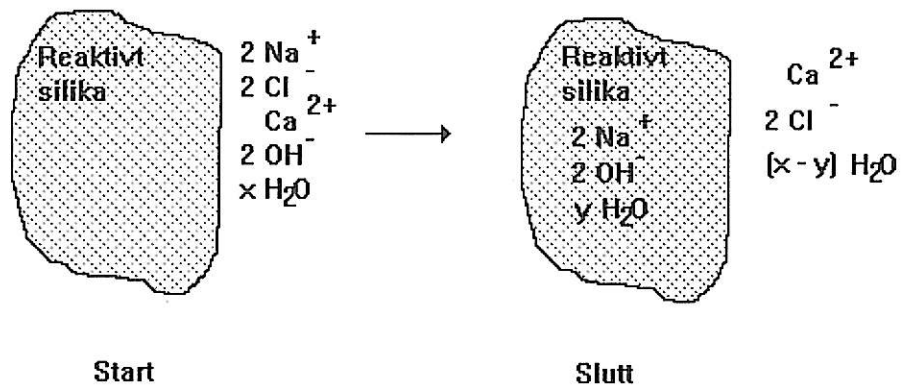


Fig. 8 Hypotetisk reaksjon ved tilstedeværelse av tilstrekkelig krystallinsk $\text{Ca}(\text{OH})_2$ etter Chatterji, Fördös og Thaulow (1992) [35].

4. Alkalikiselgel

4.1 Sammensetning

Sammensetningen av reaksjonsproduktene fra alkalitilslagsreaksjoner er vanligvis undersøkt med mikrosonde eller elektronmikroskop. Forskjellen mellom de to instrumentene er at mikrosonden har en mer utviklet analysedel. Begge instrumentene benytter såkalt energidispersiv røntgenteknikk. Årsaken til at andre analysemetoder er vanskelige å anvende ligger i at reaksjonsproduktene som oftest er innelukket i meget små porer i betongen. Det er vanskelig rent fysisk å skille produktene fra resten av materialet.

Analyser av alkalisilikagel viser at sammensetningen kan variere sterkt. Tabell 3 viser kjemiske analyser av alkalikiselgel utført av en rekke forskere og laboratorier [19].

Observasjoner viser at reaksjonsproduktet fra alkalisilikareaksjon får et høyere innhold av Ca^{2+} når det trenger ut i området utenfor det reaktive tilslagskornet [33, 36]. Regourd, Hornain og Poitvin [36] fant med mikrosonde at reaksjonsproduktet nær reaksjonsområdet hadde et Ca^{2+} -innhold (som CaO) på 15 til 20 %. Utenfor tilslagskornet ble innholdet målt til 35 til 40 %. Det antas at alkalisilkakomplekset løser Ca^{2+} ut fra bindemiddelet.

Tabell 3

Noen forskjellige kjemiske analyser av alkalisilikagel. Sammensetningen viser store relative variasjoner mellom de ulike kjemiske forbindelsene. Tabellen er gjengitt etter Poole, 1992 [19].

Na_2O	K_2O	SiO_2	CaO	MgO	Difference from 100 %	Reference
12.9	—	53.9	2.9	0.6	29.8	Stanton (1942)
12.9	—	53.4	2.6	0.8	30.2	
14.9	5.2	61.7	0.6	—	17.6	Idorn (1961)
13.4	5.1	65.5	0.5	0.2	15.3	
12.4	4.9	69.9	0.3	0.5	12.0	
17.9	8.2	73.7	1.1	0.1	0.0	
9.4	4.1	72.8	1.3	0.2	11.2	
14.6	6.2	61.9	—	0.1	17.2	
16.2	5.7	56.8	—	—	21.3	
8.2	4.1	56.1	17.4	0.2	14.0	
8.3	5.0	28.5	22.4	0.2	35.6	
1.2	0.4	51.4	29.9	10.0	17.1	Poole (1975)
7.4	0.7	53.0	22.1	10.0	16.7	
1.5	13.9	38.9	27.3	—	17.4	Gutteridge and Hobbs (1980)
0.4	4.7	51.1	21.5	—	22.3	Regourd (1983)
—	0.6	27.9	35.2	—	36.2	
1.0	6.9	61.5	9.2	—	21.3	Oberholster (1983)
1.0	6.2	53.8	8.2	—	30.7	
1.8	5.5	49.9	12.8	—	29.9	
1.0	5.2	50.4	12.0	—	30.7	
1.4	9.0	62.9	12.5	—	13.8	
0.8	7.4	53.2	10.0	—	28.4	
1.2	4.1	66.5	6.5	—	21.7	Baronio (1983)
3.7	12.9	43.3	21.8	0.8	14.0 *	Mullick and Samuel (1986)
3.9	11.7	49.4	15.9	0.5	16.7 **	

* Loss on ignition: Al_2O_3 2.8%, Fe_2O_3 0.7%

** Loss on ignition: Al_2O_3 1.8%, Fe_2O_3 0.5%

4.2 Ekspansjon/svelling

Utvidelse av reaksjonsproduktene ved alkalitilslagsreaksjon faller inn under betegnelsen svelling. Svelling er utvidelse/ekspansjon i et materiale som følge av ekstern tilførsel av materiale, i dette tilfelle hovedsakelig vann. Man skiller mellom en-, to- og tredimensjonal svelling. Endimensjonal svelling er best illustrert ved at f.eks. vann trenger inn mellom de parallelle lagene i en lagdelt struktur som for eksempel grafitt. To-dimensjonal svelling eller svelling i to retninger finner man i tremateriale med svelling perpendikulært på fiberretningen. Tredimensjonal svelling finner man bl.a. ved hevelse i organiske vevsstrukturer. Svelling i tre retninger er representativt for den type svelling som skjer i reaksjonsproduktene fra alkalitilslagsreaksjoner. For at et materiale skal svulle under dannelse av trykk, må det ha tilstrekkelig åpen struktur til at et annet materiale, f.eks. vann kan trenge inn. Strukturen må i tillegg ha tilstrekkelig affinitet til vannet til å holde det på plass. Til slutt må strukturen ikke være så stiv at den forhindrer svelling, men likevel "henge sammen" og ikke gå i løsning. Størst svelleeffekt i betong har alkalisilikagel som har relativt høy viskositet.

Årsaken til dannelsen av et sprengende svelletrykk er diskutert av flere [38, 39, 40]. Powers, 1961 [38] og Jennings og Pratt, 1978 [39] forklarer trykkdannelsen med osmose. Osmose er en transportprosess som foregår for å utjevne forskjeller i kjemiske potensialer. Forskjeller i kjemiske potensialer kan for eksempel være forårsaket av konsentrasjonsforskjeller mellom to områder i en vandig saltløsning. Ved osmose er områdene adskilt av en halvtgjennomtrengelig membran. Vanligvis er membranen gjennomtrengelig for vann og ikke det oppløste saltet. Osmose er viktig bl.a. for kjemiske prosesser i menneskekroppen. Både i teori og praksis kan osmose gi opphav til betydelige trykkforskjeller. Osmose som trykkdannende prosess i tilknytning til alkalisilika-reaksjoner kan skje ved en netto transport av vann inn i silikastrukturen. Prosessen krever tilstedeværelse av en halvtgjennomtrengelig membran et sted mellom silikastrukturen og den utenforliggende bindemiddelfasen.

Dent Glasser, 1979 [40] forklarer trykkdannelse med innbygging av vann i silikastrukturen. Innbyggingen forutsetter ikke tilstedeværelsen av en halvtgjennomtrengelig membran som i tillegg kan være vanskelig å forklare. Når vann bygges inn, senkes silikastrukturens kjemiske potensialer. Lavt kjemisk potensial er energetisk foretrukket framfor et høyt potensial. Drivkraften for å redusere potensialet kan være stor og tilstrekkelig til å gi trykkdannelse.

Det har generelt vært antatt at sammensetningen av reaksjonsproduktene har innvirkning på viskositet, omfanget av svelling og trykkdannelse. Jfr. bl.a. Powers og Steinour [27] og Chatterji [28]. Sammenhengene er imidlertid kompliserte og ennå ikke fullt ut forstått. Dette er godt illustrert gjennom Moore's studier av viskositet og gelsammensetning i et system bestående av natriumoksid, silisiumoksid og vann ($\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$). Figur 9.

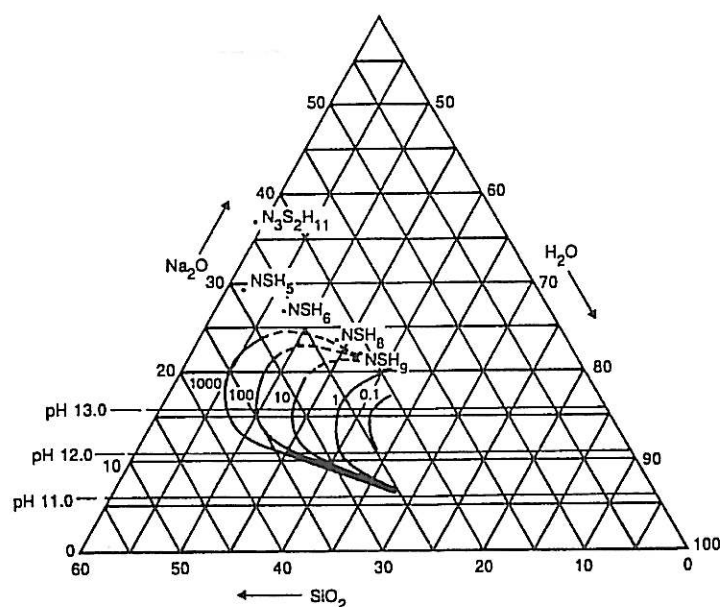


Fig. 9 Beregnet sammenheng mellom viskositet (0,1 til 1000 poise) plottet i et ternært diagram, Moore, 1978 [37]. Innholdet av de forskjellige komponentene er angitt på sidene i trekanten. Ternære diagrammer kan være vanskelige å lese. Konsentrasjonene av de enkelte komponentene kan imidlertid enkelt avleses ved å trekke rette parallelle linjer fra de angitte prosentverdiene. Maksimalt innhold av Na_2O er eksempelvis angitt ved toppunktet i trekanten, mens den nederste sidekanten i trekanten angir 0 % Na_2O . Langs hver av de rette linjene er konsentrasjonen angitt ved prosentverdien. Tilsvarende rette linjer kan trekkes for de andre komponentene. Et hvert punkt i diagrammet angir dermed en sammensetning av de tre komponentene.

At bildet av sammenhengen mellom gelsammensetning og svelling er komplisert viser også et relativt omfattende arbeid som ble gjennomført av Diamond, Barneyback og Struble [24]. Syntetiske geler med forskjellige sammensetninger av Na_2O og SiO_2 ble testet for vannopptak og svelling med og uten mottrykk.

Totalt vanninnhold i likevekt målt ved forskjellige relativ fuktigheter viste en klar sammenheng mellom sammensetning (forholdet mellom Na_2O og SiO_2) og vannopptak. Vannopptaket økte med økende mengde Na_2O i gelen. Tilsvarende entydighet kunne ikke observeres for svelling hverken med eller uten mottrykk. Dette er vist i figur 10 og figur 11, begge hentet fra Diamond, Barneyback og Struble [24]. Høyeste målte svelletrykk ble funnet til å ligge på 11 MPa. Dette er høyere enn betongens strekkfasthet og vil få betongen til å sprekke opp.

Uventet viste det seg også at aldri hadde betydning for svellingen. En gel som svellet kraftig i utgangspunktet, svellet nesten ikke når samme test ble utført etter fire måneder.

Forskning [41, 42] på syntetisk gel viser også at Ca^{2+} -rike geler, i motsetning til antagelsen til Powers og Steinour, kan ha stort svellepotensiale, mens Ca^{2+} -fattige geler viser lav svelling.

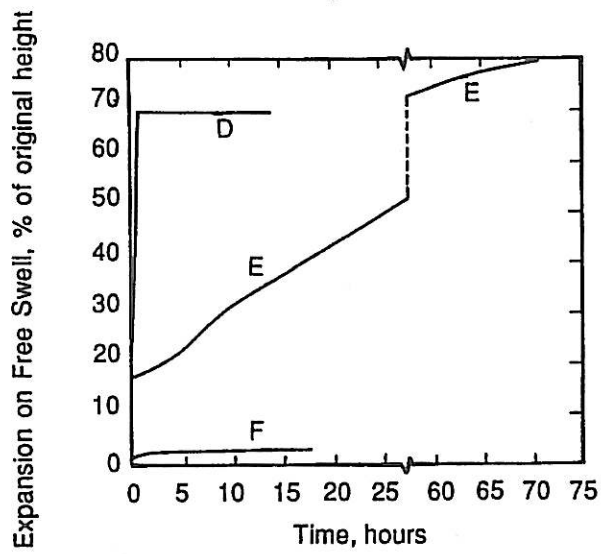


Fig. 10 Ekspansjon i syntetisk gel som funksjon av tid for silikageler med forskjellig sammensetning. D: $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,53$; E: $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,27$; F: $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,30$. Diamond, Barneyback, Struble, 1981 [24].

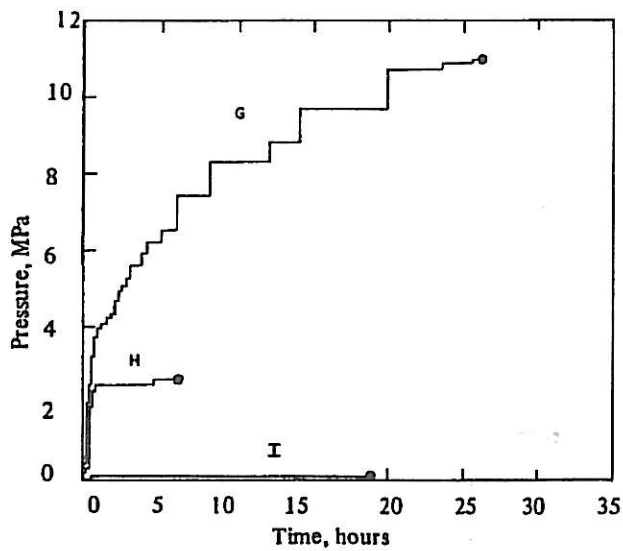


Fig. 11 Svettestrykk som funksjon av tid for syntetiske silikageler med forskjellig sammensetning. G: $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,34$; H: $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,30$; I: $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,42$. Diamond, Barneyback, Struble, 1981 [24].

5. Fukt- og temperaturavhengighet

5.1 Fukt

Vannets betydning som medium for alkalitilslagsreaksjoner er tidligere nevnt. Vannet sørger for transport av reagerende stoffer til og fra reaksjonsstedet og er årsak til ekspansjon gjennom opptak i alkalisilikagel. Vann kan tilføres gjennom luften med høy relativ fuktighet og regn, eller gjennom eksternt vanntrykk.

Vannopptak i syntetiske alkalisilikageler viser klar sammenheng med relativ fuktighet i luften, Krogh 1975 [43]. Flere forskere, blant dem Nilsson [44] og Poole [19], har sett ekspansjon i sammenheng med relativ fuktighet. Ekspansjonen øker kraftig når relativ fuktighet kommer over ca. 80 %. Nilsson [45] mener imidlertid at man har en maksimal ekspansjon rundt 90 % slik at ekspansjonen avtar igjen ved høyere relative fuktigheter. Han forklarer dette med at alkalisilikagelen her blir mer flytende – mer som den før nevnte alkalisilikasol – og transporteres ut gjennom sementpastaen uten å svelle. Stark 1991 [46] målte imidlertid større ekspansjon ved 100 % relativ fuktighet enn ved 92 %, 75 %, 54 % og 33 %. Han fant også en terskelverdi for begynnende alkalitilslagsreaksjoner ved relativ fuktighet på 80 % i temperaturområdet 21 °C til 24 °C.

5.2 Temperatur

Også temperatur har vist seg å ha innvirkning på alkalitilslagsreaksjonen. Diamond, Barneyback og Struble [24] målte reduksjonen i alkaliinnhold i porevannet og ekspansjon i mørtelprøver som ble lagret ved 20 °C og 40 °C. Reduksjonen i alkaliinnhold ble brukt som mål på hvor langt den kjemiske reaksjonen var nådd og ekspansjonen som mål på den mekaniske/fysiske delen av reaksjonen. Det viste seg at både den kjemiske reaksjonen og ekspansjonen ble framskyndet av høyere temperatur. Både reaksjon og ekspansjon gikk imidlertid lengst ved den laveste temperaturen. Ved begge temperaturer startet ekspansjonen en stund etter den kjemiske reaksjonen. Resultatene er vist i figur 12.

I hvilken grad temperaturen har innvirkning på ekspansjon er også avhengig av tilslags-type. Tang Ming-Shu og Han Su-fen, 1983, [47] målte ekspansjon i mørtelprismer støpt med forskjellig tilslag lagret i 10 % KOH-løsning ved ulike temperaturer fra værelsestemperatur til 300°C (med autoklaving). Resultatene er vist i figur 13.

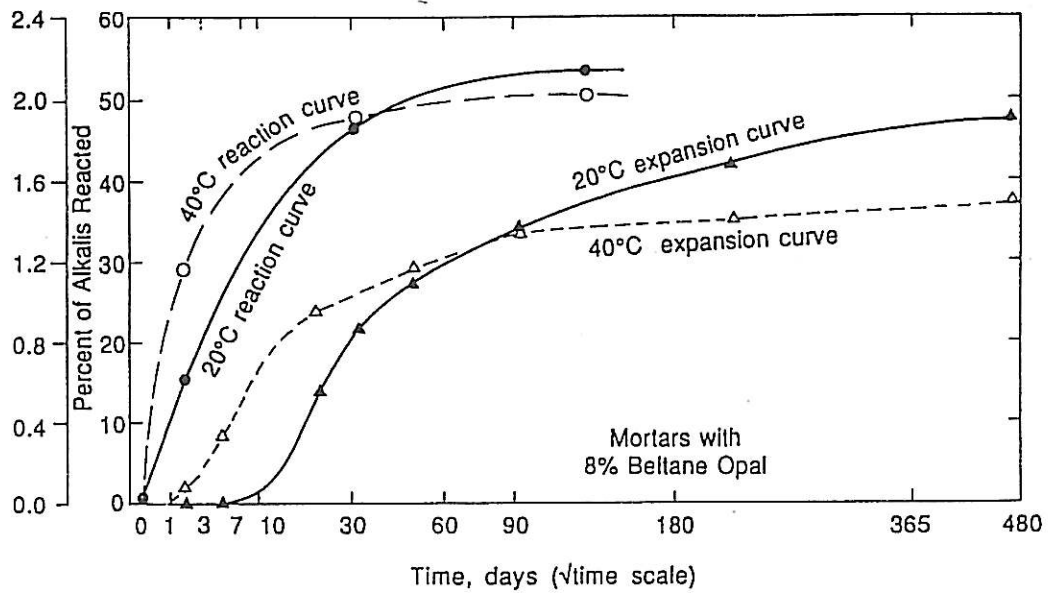


Fig. 12 Sammenligning av reaksjonsparametre (prosent reagert alkali og ekspansjon) for mørtelprismer ved 20 °C og 40 °C. Diamond, Barneyback og Struble, 1981 [24].

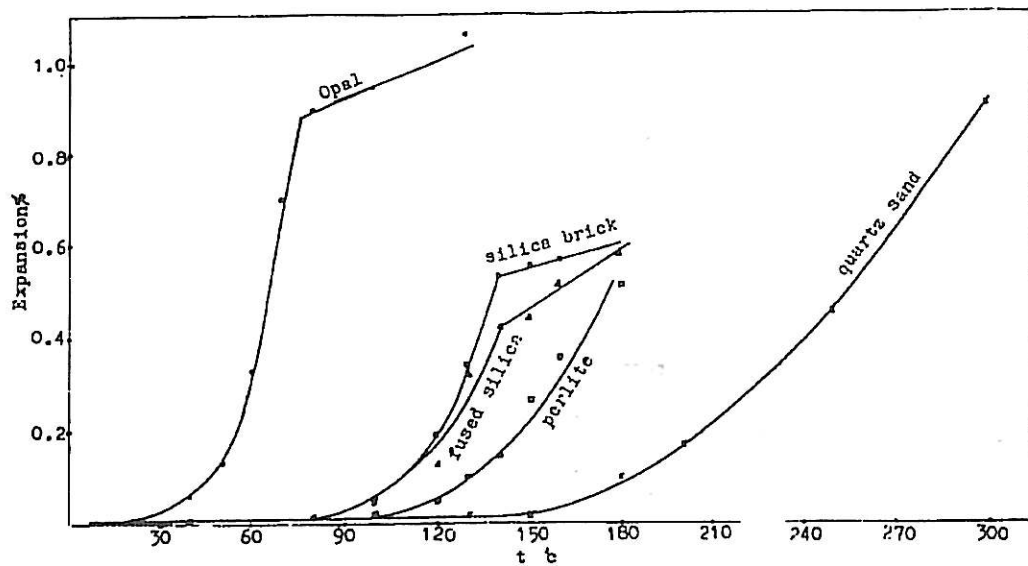


Fig. 13 Ekspansjon målt i mørtelprismer lagret i KOH-løsning i 6 timer ved forskjellige temperaturer. Tang Ming-Shu og Han Su-fen, 1983, [47].

6. Tilsetning av pozzolaner

I vanlig Portlandsement er forholdet mellom Ca og Si ca. 1,8. Pozzolaner har varierende Ca/Si-forhold, men ligger normalt mye lavere enn sement. Tilsetning av pozzolaner vil derfor redusere forholdet mellom Ca og Si i den hydratiserte sementen. Det har vist seg at reduksjon av Ca/Si-forholdet reduserer faren for alkalitilslagsreaksjoner. For eksempel har man gode erfaringer med tilsetning av pozzolaner i Island der alkalitilslagsreaksjoner utviklet seg til å bli et alvorlig problem i bolighus av betong frem til siste del av syttitallet. Siden 1983 har innblanding av silikastøv i islandsk sement ligget på 7,5 %.

Flere teorier har vært foreslått for å forklare pozzolaners positive effekt når det gjelder alkalitilslagsreaksjoner. Den teorien som har mest tilslutning er beskrevet av Bhatti, Portland Cement Association, USA, 1985 [48]. Den positive effekten forklares med at pozzolanene reagerer med Ca(OH)_2 som produseres ved sementhydratisering og danner kalsiumsilikathydrat (C-S-H-gel som er sluttproduktet i sementhydratiseringen). Totalt sett har kalsiumsilikathydratene som dannes dermed lavere Ca/Si-forhold. Når Ca/Si-forholdet i C-S-H-gelen senkes, reduseres også C-S-H-gelens overflateladning. Når overflateladningen blir negativ øker C-S-H-gelens evne til å ta opp kationer, spesielt alkalier. Når alkaliene fjernes reduseres pH i poreløsningen og dermed muligheten for at strukturen i eventuelt reaktivt silika eller silikat skal brytes ned. I henhold til Bhatti bør tilsatt mengde pozzolan være slik at Ca/Si-forholdet er under ca. 1,5 (tilsvarende ca 20 % silikastøv). Det anbefalte Ca/Si-forholdet varierer i litteraturen, Glasser [15] oppgir for eksempel 1,2 til 1,3.

Det mest effektive pozzolanet er silikastøv. Med silikastøv kan Ca/Si-forholdet senkes til 1,0. Silikastøvet er meget fint. Når det er skikkelig dispergert vil det derfor ha en meget rask virkning på pH i porevannet. Dette er grundigere behandlet av Sellevold, 1988 [49].

Tilsetning av plastiserende stoffer ved bruk av silikastøv har vært undersøkt. Resultatene spriker i begge retninger, jfr. Perry og Gillott, 1985 [50] (negativ effekt) og Okada, Yoshikawa og Himeno, 1988 [51] (positiv effekt).

7. Kjemiske testmetoder

Kjemiske testmetoder er lite brukt i Norge. Flere forskjellige metoder finnes. Her kan nevnes:

- ASTM C289
- Tysk vekttapsmetode
- Engelsk "Gel pat test"
- Amerikansk "Osmotic cell test"
- Dansk kjemisk svinn metode

ASTM C289 er den metoden som har langt den største utbredelsen ute i verden. Kun denne beskrives derfor her. De andre metodene er nærmere beskrevet av Grattan-Bellew, 1989 [52].

Med standard testmetode ASTM C289 bestemmes potensiell reaktivitet av tilslag. Testen gjennomføres ved at det aktuelle tilslaget males opp til en bestemt finhet, tilsettes NaOH-løsning og lagres i ett døgn ved 80 °C. Tilslaget filtreres vekk og NaOH-løsningen (filtratet) benyttes til bestemmelse av reduksjon i alkalinitet og silika som er løst ut ved NaOH-behandlingen. Reaktivt tilslag gir lav alkalinitet og mye løst silika i løsningen (filtratet). De to parametrene benyttes til å bestemme tilslagets potensielle reaktivitet. Metoden passer imidlertid ikke til alle typer tilslag, herunder endel norske tilslagstyper. Metoden kan heller ikke benyttes til å forutsi potensialet for eventuell ekspansjon i en betong.

Generelt kan man si at det idag ikke eksisterer tilfredsstillende kjemiske testmetoder for bestemmelse av potensiell alkalireaktivitet i norsk tilslag.

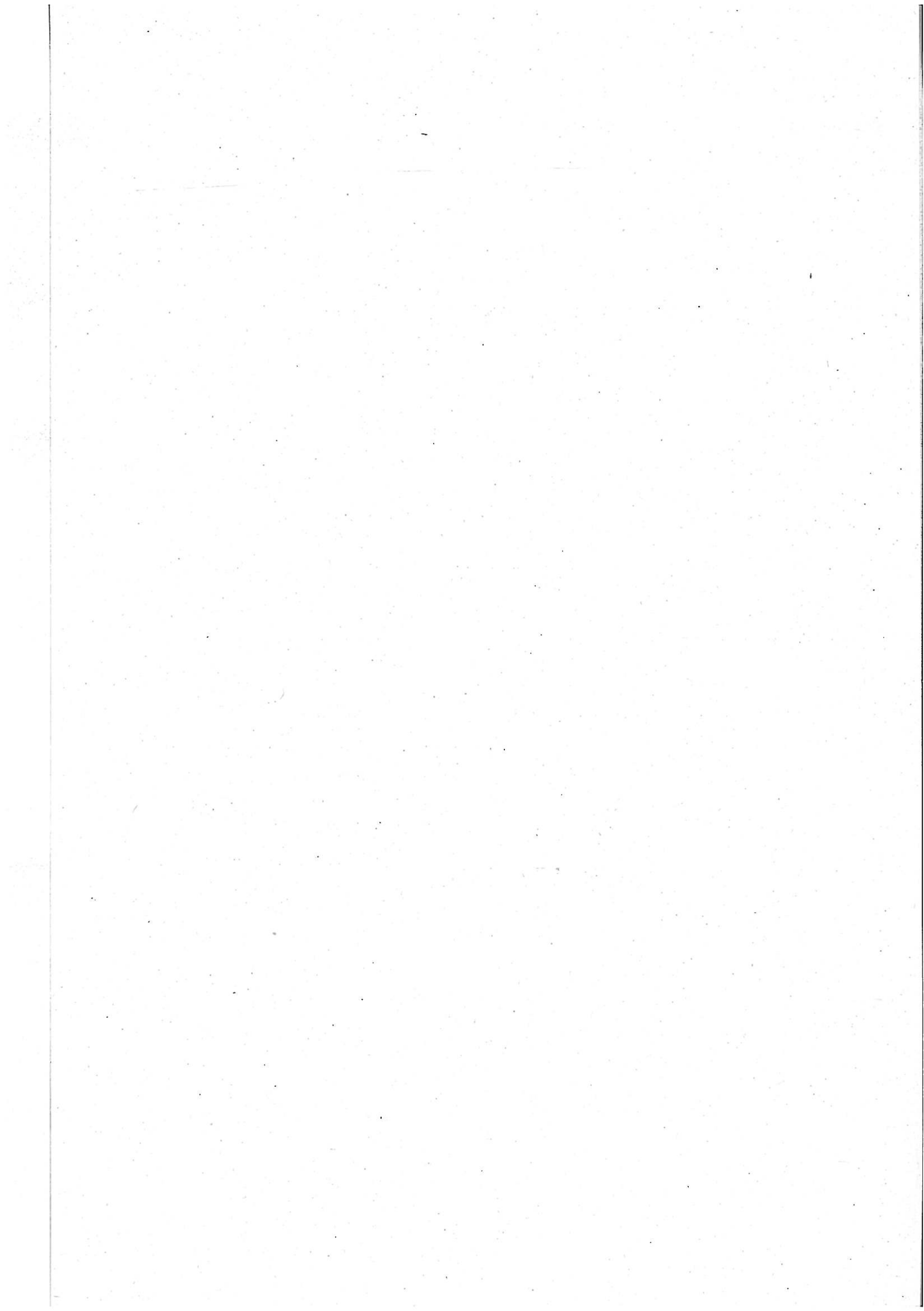
8. Referanser

- 1 T.E. Stanton "Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate.", Proc. ASCE, 66, pp. 1781-1811, 1940
- 2 R.F. Blanks, "Concrete deterioration in Parker Dam", Eng. News. Rec., 126, pp. 462-465, 1941
- 3 H.S. Meissner, "Cracking in concrete due to expansion reaction between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker Dam.", Proc. Am. Concr. Inst., 37, pp 549-568, 1941
- 4 A. Kjennerud, Plan og Bygg, Bd 26, Nr 1, 1. februar, 1978
- 5 J.E. Gillott, Proceedings 3rd Int. Conf on Alkali-Aggregate Reaction, Preventive Measures, Reykjavik, 1975
- 6 Mielenz et al., Journal of the Am. Concr. Inst., Detroit, vol 19, No 2, pp. 93-129, 1947
- 7 Canadian Standard Association, (Supplement No. 2-1986 to CSA Standards CAN3-A23.2-M77, Appendix B), 1986
- 8 G.S. Choi, F.P. Glasser, The sulphur cycle in cement kilns..., Cem. Concr. Res., 18, pp. 367-384
- 9 J.E. Gillott, C.A. Rogers, Mag. Concr. Res., 46, No. 167, pp. 99-112, 1994
- 10 P.E. Grattan-Bellew, J.J. Beaudoin, Cem. Concr. Res, 10, pp. 789-797, 1980
- 11 D. Stark, M.S.Y. Bhatti, Alkalis in concrete, STP 930, ASTM, Philadelphia, pp. 16-30, 1986
- 12 Chau Lee, Third CANMET/ACI International conference on flyash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Trondheim, pp.129-138, 1989
- 13 S. Chatterji, Proceedings of the sixth International Conference on Alkalis in Concrete, Research and Practice, Copenhagen, Vol. 9, pp. 185-188, 1979
- 14 V.M. Malhotra, Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Proceedings of the Second International Conference, Madrid, 1986
- 15 F.P. Glasser, Chemistry of the alkali-aggregate reaction, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, ISBN 0-216-92691-2, pp.30-54, 1992
- 16 Mielenz, Journal of the American Concrete Institute, Detroit, vol. 19, No. 2, pp. 93-129, 1947
- 17 L. Dolar-Mantuani, "Handbook of concrete aggregates - A petrographic and technological evaluation", pp. 345, Noyes Publication, USA, 1983
- 18 W. Jensen, "Alkali Aggregate Reaction in Southern Norway", Dr. avhandling, NTH, Trondheim, 1993
- 19 A.B. Poole, Chemistry of the alkali-aggregate reaction, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, ISBN 0-216-92691-2, pp.1-30, 1992
- 20 R.S. Barneyback Jr, S. Diamond, Cem. Concr. Res., 11, pp. 279-285, 1981
- 21 J. Marr, F.P. Glasser, Proceedings 6th Int. Conf. on Alkalis in Concrete, pp. 239-242, 1983
- 22 S. Diamond, "Alkali Reactions in Concrete - Pore Solution Effects", Proceedings 8th Int. Conf on Alkali-Aggregate Reac., København, pp. 155-166, 1983
- 23 C.L. Page, Ø. Vennesland, Matériaux et Construction, 16, No. 919, pp. 19-25, 1983

- 24 S. Diamond, R.S, Barneybäck, L.J, Struble, On the physics and chemistry of alkali-silica reactions, Proceedings 5th Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 1981
- 25 H.F.W, Taylor, A method for predicting alkali ion concentrations in cement pore solutions, Advances in Cement Research Vol. 1, No. 1, Oct. 1987
- 26 H.E. Vivian, The mechanism of alkali-aggregate reaction in concrete, Proceedings 9th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concr., pp. 1085-1089, 1992
- 27 T.C. Powers og H.H. Steinour, J. Amer. Concr. Inst., 26, 785, 1955
- 28 S. Chatterji, Proceedings 8th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reactions, Japan, 101, 1989
- 29 L.S. Dent-Glasser, N. Kataoka, The chemistry of alkali-aggregate reactions, Proceedings 5th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reactions, 1981
- 30 A.B. Poole, The 9th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction i Concr., pp. 782-789, 1992
- 31 H. Wang og J.E. Gillott, Cem. Concr. Res., 21, pp. 647-654, 1991
- 32 A.B. Poole, Effect of Alkalies on Properties of Concrete, Proc. Symp. London, Cement and Concrete Assoc., 163, 1976
- 33 T. Knudsen og N. Thaulow, Cem. Concr. Res., 5, 443, 1975
- 34 B.D. Kawamura, K. Takemoto, S. Hasaba, Transactions Japan Concr. Inst., Vol 4, pp. 1-8, 1982
- 35 S. Chatterji, Z. Fördös og N. Thaulow, Chemistry of the alkali-aggregate reaction, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, ISBN 0-216-92691-2, pp.1-30, 1992
- 36 M. Regourd, H. Hornain, P. Poitevin, Proceedings 5th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Cape town, 1981
- 37 A.E. Moore, Proceedings 4th Int. Conf. on the Effects Of alkalis in Cement and Concrete, pp 363-365, 1978
- 38 T.C. Powers, J. Portland Cem. Ass. Res. Dev. Labs., 3, pp. 47-56, 1961
- 39 H.M. Jennings og P.L. Pratt, British Ceram. Soc. Transactions and Journal, 1978
- 40 L.S. Dent Glasser, Cem. Concr. Res., Vol 9, pp. 515-517, 1979
- 41 L. Struble, S. Diamond, Cem. Concr. Res., Vol. 11, pp. 611-617, 1981
- 42 L. Struble, S. Diamond, J. Am. Cer. Soc., Vol. 64, pp. 652-656, 1981
- 43 H. Krogh, Danmarks Ingeniørakademi, Kjemifdelingen, pp. 30, 1975
- 44 L.O. Nilsson, Proceedings 5th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concr., South-Africa, S252/27, 1981
- 45 L.O. Nilsson, Proceedings 6th Int. Cong. on Alkali-Silica Reactions, Copenhagen, pp. 201-208, 1983
- 46 D. Stark, 2nd Int. Conf. on Durability of Concr., Canada, 1991
- 47 Tang Ming-Shu og Han Su-fen, Proceedings 8th Int. Conf on Alkali-Aggregate Reac., København, pp. 261-267, 1983
- 48 S.Y. Bhatt, Mechanism of Pozzolanic Reactions and Control of Alkali-Aggregate Expansion, American Society for Testing and Materials, pp. 69-77, 1985
- 49 E.J. Sellevold, Condensed Silica Fume in Concrete, Thomas Telford, London, 1988

- 50 C. Perry og J.E. Gillott, Durability of Building Materials, 3, pp. 133-146, 1985
- 51 K. Okada, T, Yoshikawa og M, Himeno, The Int. Journ. of Cem. Composites an Lightweight Concr., Volume 10, Number 4, pp. 205-208, 1988
- 52 P.E. Grattan-Bellew Proceedings 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, Japan, pp. 279-294, 1989





Usee 9