

19.1 Alkalireaktioner

Af Bent Grelk, Grelk Consult



Figur 1. Skader fra alkalikiselreaktioner kan se voldsomme ud med udbredt revnedannelse. Ofte er bygværkets funktion ikke reduceret mærkbart på trods af revnerne.

19.1.1 Alkalikiselreaktioner

Alkalikiselreaktioner opstår, når sand og sten ikke er stabile i det basiske miljø i betonen.

Disse reaktioner sker under ekspansion og kan skabe en kraftig og ødelæggende revnedannelse i betonen.

Alkalikiselreaktioner har kostet bygværksejere store summer i reparationsomkostninger og har derfor i dagspressen haft øgenavne som "betonpest" og "bomben i beton".

Reaktionerne kan forebygges gennem valg af egnede sand- og stenmaterialer og en betonsammensætning, hvor især cementen skal vælges rigtigt.

19.1.1.1 Historisk oversigt

Selvom alkalikiselreaktioner antageligt altid har forekommet i beton, var det først i 1940, at det lykkedes at fastslå, at årsagen til en række beskadigede betonbygværker var reaktioner mellem alkalier (natrium- og kaliumioner) og tilslag (sand og sten).

En artikel skrevet af Thomas Stanton om skadede betonbygværker i Californien, gav startsignalet til et større forskningsarbejde i USA. Det er værd at bemærke, at det netop var i Californien, at de første iagttagelser blev gjort på steder, hvor man ikke kunne give frost-tø påvirkninger skylden for skaderne.

I Danmark har der været rapporter om tilsyneladende lignende betonskader langt tidligere. I Ingeniøren nr. 31 fra 1914 skriver bl.a. ingeniør A. Poulsen: "at den (Esbjergs sønder mole) er atter nu saa medtaget, at den – efter den næste snes aars forløb – maa ombygges igen, idet betonen slaar revner, som viser hvide udsvedninger, og senere falder der stykker af, da mørtelen er ganske mør".

Det var dog først i 1951 i forbindelse med Poul Nerensts studiebesøg i USA, at man i Danmark blev opmærksom på, at alkalikiselreaktioner kunne være en medvirkende årsag til betons manglende holdbarhed.

Egentlig var det primære formål med Nerensts studietur at studere de metoder, der var taget i anvendelse i USA for at gennemføre byggeri om vinteren. Han skulle dog også studere prøvningsmetoder for beton i al almindelighed. Efter sin hjemkomst foretog Poul Nerenst besigtigelser af en række store betonbygværker, som var i en meget dårlig tilstand, og han kom til den konklusion, at der i enkelte tilfælde var *"en til visshed grænsende sandsynlighed for, at der er tale om en alkali-grus reaktion, som ikke tidligere er påvist i Europa, men kendes i USA, Australien og visse steder i Asien"*.

Dette gav i 1951 startskuddet til, at Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) iværksatte en større undersøgelse af betonbygværker i Danmark. Undersøgelsen ledte til en erkendelse af, at alkalikiselreaktioner forekom i Danmark. I 1954 nedsatte SBI og Akademiet for de Tekniske Videnskaber (ATV) et udvalg til undersøgelse af alkalireaktioner i beton, det såkaldte "Alkaliudvalg". Udvalget stod derefter i spidsen for en række omfattende undersøgelser i form af såvel store forsøgsserier i laboratorier som mange undersøgelser i marken af beskadigede betonbygværker.



Figur 2. Foto af søjle på Sebbesundbroen fra en af SBI/ATV gennemførte undersøgelser i 1959.

Alkaliudvalgets arbejde ledte i de følgende år til en større samling af rapporter. I 1961 udgav Alkaliudvalget vejledning 1 "Foreløbig vejledning i forebyggelse af skadelige alkaliskelreaktioner i beton". I denne fastslås det bl.a. for sand til beton, at "og kommer flintindholdet ned under gennemsnitligt ca. 2 %, vil reaktionerne som regel være uskadelige". For sten var man kommet frem til, at "Undersøgelse af udborede betonprøver af konstruktioner tyder imidlertid på, at stenene under alle omstændigheder bør være helt frie for indhold af porøs flint, også som belægninger på tæt flint".

Når resultaterne af dette enorme forskningsarbejde ikke kom til et konkret udtryk i datidens beton- og grusnormer, så skyldes det tilsyneladende en manglende støtte fra nogle af de førende eksperter bag Alkaliudvalget. I forbindelse med en kommende normrevisionen i 60'erne, skriver bl.a. Niels Munk Plum til normudvalget "Vi beklager at måtte meddele, således som det allerede detaljeret fremgår af Alkaliudvalgets vejledning nr. 1, at der, så vidt vi kan se, ikke endnu er tilvejebragt det nødvendige eksperimentelle grundlag for fastsættelse af sådanne talværdier". Ydermere skriver G.M. Idorn bl.a. til udvalget, at "Anførelsen af en talværdi som efterspurgt må også af principielle grunde, dvs. ud fra samfundsøkonomiske betragtninger frarådes".



Figur 3: Foto af søjle med revnedannelser forårsaget af AKR på en bro opført i 1970.

Konsekvensen af, at der ikke blev tilvejebragt de nødvendige talmæssige krav til tilslagetets indhold af potentielt reaktive bestanddele, var, at der i den følgende periode blev bygget et meget stort antal betonkonstruktioner med tilslagsmaterialer, som var mere eller mindre potentielt stærkt alkalikiselreaktive.

Man kan af denne historiske fremstilling lære, at hvis forskere, eksperter og andre lærde ikke tør påtage sig det ansvar, at opstille operationelle retningslinjer – fx i form af kravtekster til standarder – så vil markedet i form af de almindelige ingeniører (selvfølgelig) heller ikke selv gøre dette, og resultatet bliver en dårlig udnyttelse af teknologisk viden til stor skade for samfundsøkonomien. Ingen forsker eller ekspert må derfor være for fin til at konkretisere sin ekspertise til brug i dagligdagen.

I 1982 nedsatte ATV et udvalg vedrørende betonbygværkers holdbarhed. Dette udvalgs arbejde resulterede efter en heftig debat i maj 1986 med den såkaldte Basisbetonbeskrivelse (BBB), som indeholdt talbaserede krav til holdbar beton, i modsætning til tidligere normer for husbygning, som var baseret på funktionsbaserede krav. Byggestyrelsen udgav derefter BBB i marts 1987 gældende for alt statsligt og statsstøttet byggeri.

Anlægsbranchen havde allerede fra 1979 – som et delresultat af Statsbroen Storebælts arbejde – haft tilsvarende talkrav til sand og sten for at undgå alkalikiselreaktioner.

Det er værd at notere sig, at BBB's krav til indholdet af reaktive korn i sandfraktionen til beton i moderat og aggressiv miljøklasse (max. 2 vol. %) faktisk er det samme, som Alkaliudvalget kom frem til allerede i 1961. I de mellemliggende 25 år var der sket skader for milliarder!

19.1.1.2 Udbredelsen

Eksempler på skadelige alkalikiselreaktioner kan findes næsten overalt i Danmark. Det hænger sammen med de grusforekomster, som vi har brugt ved fremstillingen af beton gennem tiderne. Der findes kun relativt få danske grusgrave eller sømaterialer, som ikke indeholder en vis mængde potentielt alkalireaktive bjergarter – heraf også mange med en skadelig mængde.

At problemet ikke blot er et dansk problem kan ses i den meget omfattende litteratur, som er skrevet og stadig skrives om emnet. Der er tale om et verdensomspændende problem, og kun meget få lande eller områder i Verden kan sige sig fri for alkalikiselreaktioner – samtidigt med at der stadig er nye lande, som melder om dette problem.

Mens alkalikiselreaktionerne blev erkendt i Danmark i starten af 50'erne, så "opdagede" normændene og svenskerne først problemet i 1980'erne, og det dukkede først op i Finland i slutningen af 1990'erne. Dette hænger sammen med, at man i lang tid troede, der var tale om andre nedbrydningsmekanismer - som regel frostskaader. Det hænger imidlertid også sammen med, at man var blevet bedre til at kunne stille den rigtige diagnose for et bygværk skadet af alkalikiselreaktioner, ikke mindst da nye "værktøjer" såsom brugen af strukturanalyse til undersøgelse af betonprøver blev udbredt.

19.1.1.3 Mekanismen

Alkalikiselreaktioner er som navnet indikerer en fysisk-kemisk reaktion, der foregår mellem kiselholdige bjergarter og mineraler i tilslaget og alkaliforbindelser i betonens porevæske.

En alkalireaktion kan kun ske, når 4 forudsætninger på samme tid er opfyldt:

- Reaktive partikler i tilslaget (kisel)
- Alkalier (Na⁺, K⁺-ioner)
- Vand
- Høj pH-værdi

Hvis blot én af disse forudsætninger ikke er opfyldt, kan alkalikiselreaktionen ikke forløbe eller indtræffe.

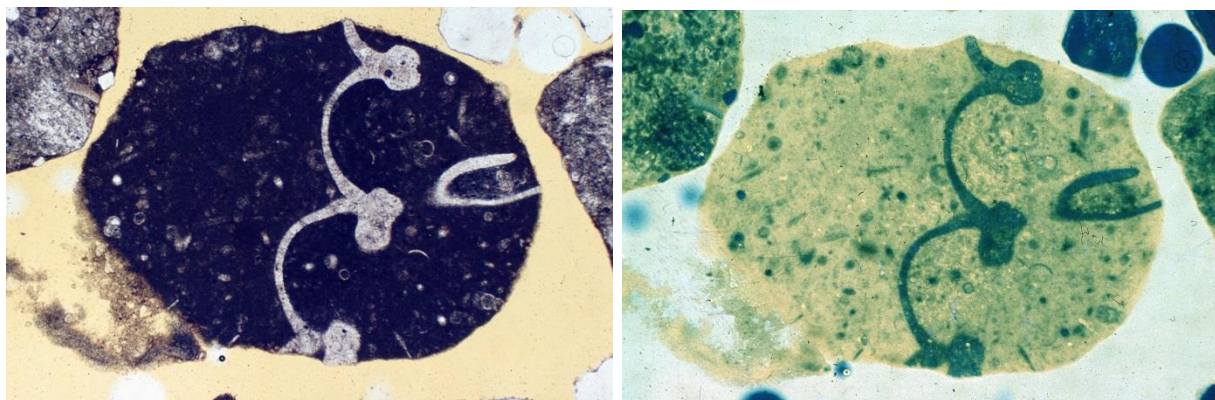
Men selvom alle 4 forudsætninger er opfyldt på samme tid, så er dette ikke ensbetydende med, at der vil opstå skader som følge af alkalikiselreaktioner. Skader (revner og geldannelser) opstår nemlig først, når de 4 nævnte forudsætninger er til stede samtidigt i en vis (kritisk) mængde eller forhold. Reaktionen kan godt forløbe uden, at der opstår skadelige revnedannelser eller nogen form for svækkelse af konstruktionen.

Uanset mængden af reaktive partikler i tilslaget, så vil de i større eller mindre grad reagere med betonens porevæske. Men kun når reaktionen medfører en egentlig ekspansion og revnedannelser, taler man om skadelige alkalikiselreaktioner – eller blot alkalikiselreaktioner.

Det er porevæskens høje pH, som bevirker, at kiselnen kan opløses, hvorefter den reagerer med Na^+ , K^+ , Ca^{++} og OH^- ioner, og reaktionsprodukter, der har - eller får større - volumen end de reagerende stoffer dannes. Dette opbygger indre spændinger i betonen, og når disse overstiger betons trækstyrke, dannes der revner.

Alkalireaktive bjergarter

Den altovervejende, skadelige alkalireaktive bjergart i danske tilslag (grus) er den såkaldte porøse opalflint. Porøs opalflint er en stærk opalholdig (primær amorf eller mikrokrySTALLINSK $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) bjergart. Ud over opal indeholder bjergarten typisk også en vis mængde kalk og tæt flint. Kalkindholdet varierer typisk fra 0 % og op til 45 %, idet de kalkholdige varianter normalt findes i grusforekomster (istidsaflejringer) fra den sidste istid, dvs. på fx Sjælland, Lolland, Falster, Møn, Fyn og i det østlige og nordlige Jylland, mens de kalkfrie typer ofte kan findes i aflejringer fra den næstsidsite istid, som især findes i Vestjylland.



Figur 4. Foto af reaktivt sandkorn som består af kalkopalflint. Billederne er taget i alm lys og fluorescensbelysning. Størrelse ca. 1,5 x 1,0 mm.

Opalflinten har en høj porøsitet, som udtrykt ved vandabsorptionen typisk er et sted mellem 5 og 40 %. Den høje porøsitet er samtidigt kendetegnet ved, at bestå af meget små porer i materialet, typisk i størrelsesorden fra 10 til 100 Ångstrøm. Opalflint er som regel helt hvid, hvorfor den ofte af ikke-kyndige betegnes som en "kalksten".

De mange frostspringere, som ses i beton fremstillet med danske bakkeforekomster, bliver således ofte fejlagtigt benævnt kalkspringere, mens det næsten altid er porøs opalflint, som er årsagen. Forklaringen på dette skal findes i bjergartens ultrafine porer som bevirker, at den er stærkt kapillar-vandsugende og derfor let vandmættes til et niveau, som bevirker, at der er risiko for frostskaader, hvis den i våd tilstand udsættes for frost.

Opal er en amorf bjergart, dvs. uden krystalgitter, hvilket medfører, at den er meget lettere opløselig og nedbrydelig end f.eks. tæt flint, som består af mikrokrySTALLIN kvarts. Selvom begge bjergarter i teorien er ustabile ved pH omkring 13-14, så betyder det i praksis, at opal er meget hurtigt reagerende, mens tæt flint i praksis ikke vil reagere - eller i hvert fald kun over mange år (>100 år), hvis overhovedet.

De mange hvide porøse skorper, som typisk sidder på tætte sorte eller mørke flintesten, består som oftest af porøs opalflint (kalkholdig eller kalkfrit). Derfor må sådanne sammensatte bjergarter på grund af det høje opalindhold også regnes for stærkt alkalireaktive.

Derudover findes også en bjergart, som betegnes som porøs kalcedonflint. Den har en porøs struktur og minder om en mellemting mellem opalflint og tæt flint. Den findes erfaringsmæssigt oftest i sømaterialer, og den har en noget mindre eller langsommere reaktivitet end f.eks. opalflinten.

Udover porøs opalflint kan der i Danmark også findes enkelte andre potentielt reaktive bjergarter, såsom opalsandsten og vulkansk glas. Opalsandsten indeholder som navnet indikerer også opal. Denne bjergart findes primært i den sydlige del af Danmark (Lolland, Falster, Sønderjylland, Als).

I vores nabolande, Sverige, Norge og Tyskland, er det typisk helt andre bjergarter, som er potentielt alkalireaktive. Bjergarter som gråvakke, mylonit, sandsten og rhyolit er årsag til mange skadede betonbygværkter i fx Norge, hvorimod denne type bjergarter kun findes i meget beskedne mængder i danske grusforekomster.

Alkaliindhold

Ved en alkaliforbindelse menes et salt, der består af ioner fra et alkalimetall. I det periodiske system er der flere alkalimetaller, men i beton er der kun tale om natrium (Na) og kalium (K).

Alkaliforbindelser i betonen stammer i stor udstrækning fra cementen, men også delmaterialer som tilslag, støbevand og eventuelle tilsætningsstoffer kan bidrage til betonens samlede alkaliindhold. Herudover kan betonen tilføres endog store mængder alkalier udefra, typisk i form af natriumklorid (NaCl) fra tørsalte, havvand eller svømmebadsvand.

Den primære alkalikilde er dog oftest cementen. Alkalierne stammer fra de råmaterialer, som bruges til cementfremstillingen, såsom ler og kalk. Men også det brændsel, som bruges til produktionen, kan bidrage til de færdige cementklinkers indhold af alkalier.

Når indholdet af alkalier i cement skal angives, anvender man begrebet "ækvivalent alkaliindhold". Dette udtrykkes ved: $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$, angivet i vægtprocent, og hvor tallet 0,658 er omregningsforholdet fra K_2O til Na_2O -ækv på basis af forholdet i deres molvægte. Når alkaliindholdet i en beton skal angives, bruger man som regel enheden kg/m^3 (beton).

Vand

Som for næsten alle former for nedbrydningsmekanismer er vand også en nødvendig forudsætning for alkalikiselreaktioner. Men da der kun skal være en relativ begrænset fugtighed til stede i betonen, er næsten al udendørs beton potentielt i risikogruppen

for at kunne udvikle reaktioner, hvis de øvrige forudsætninger for alkalireaktion er til stede.

19.1.1.4 Kritiske forudsætninger

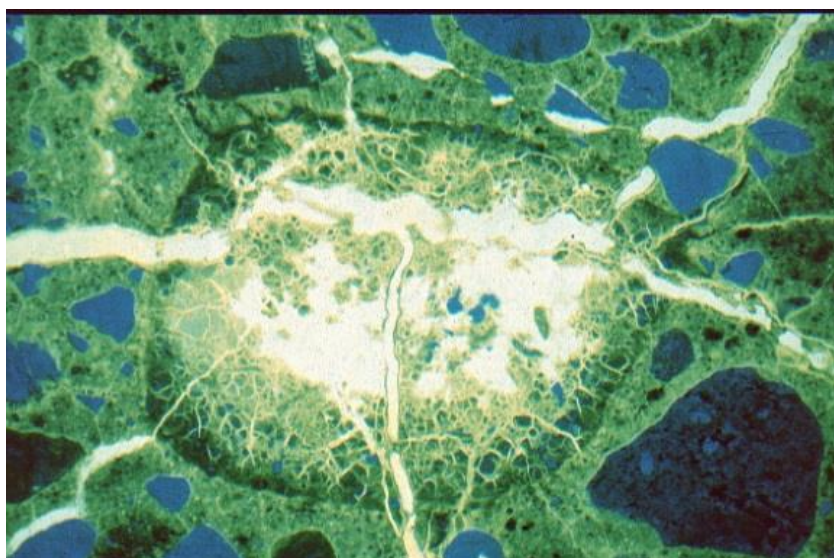
De nødvendige forudsætninger for alkalikiselreaktioner i beton er tilstedeværelsen af reaktive partikler i tilslaget (kisel), alkalier (Na^+ , K^+ -ioner) i porevæsken, vand og et høj pH-niveau i betonen.

Hvis blot én af disse forudsætninger ikke er opfyldt, kan alkalikiselreaktionen ikke forløbe eller indtræffe. Men for at der skal kunne forekomme skadelige reaktioner, dvs. at reaktionerne skal føre til egentlige revnedannelser i betonen, så skal de førømtalte betingelser også være til stede i en vis "kritisk" mængde.

Indhold af reaktive partikler

Omfattende forsøg i forbindelse med Alkaliudvalgets arbejde og senere undersøgelser på bl.a. Teknologisk Institut har - suppleret med viden om betonbygværker i praksis - vist, at de nuværende krav (DS 2426) til indholdet af potentielt alkalireaktive bjergarter i danske grusmaterialer med stor sikkerhed sikrer mod fremtidige alkalikiselreaktioner. For danske sandforekomster er fx kravet til sandet et maksimalt indhold af porøs opalflint på 2 % i aggressivt miljø (klasse A) og max. 1 % i ekstra aggressivt miljø (Klasse E). Sandets reaktivitet kan også bestemmes ved måling af mørtelprismeeekspansion (TI B 51).

De alkalireaktive korn (porøs opalflint), som findes i de danske grusforekomster, regnes for nogle af de mest reaktive bjergartstyper i Verden. Bjergarten består som tidligere nævnt primært af opal ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), som regnes for den måske lettest opløselige og nedbrydelige kisel forbindelse. Det betyder også, at denne bjergart kan give anledning til meget voldsomme og meget hurtigt udviklende reaktioner og omfattende revnedannelser, hvis denne findes i skadelige mængder i betonen.



Figur 5. Foto af porøs kalkopalkorn med skadelige revne- og geldannelser i betonen. Billedet er taget i fluorescensbelysning. Størrelse ca. 3,5 x 3,0 mm

I Norge er de alkalireaktive bjergarter af en helt anden type og sammensætning, mindre reaktive og langsommere udviklende, hvorfor de norske krav til sådanne norske grusmaterialer er helt anderledes idet man tillader et væsentlig højere indhold af sådanne potentielle reaktive materialer end man ville gøre i Danmark, ligesom man også bruger andre prøvningsmetoder. Noget tilsvarende gælder for andre lande og regioner i Europa.

Det er derfor vigtigt at pointere, at man ikke uden videre kan overføre udenlandske krav til grusmaterialer på danske grusmaterialer - eller omvendt. Kravene til betonens tilslag bør derfor baseres på den aktuelle viden om materialernes reaktive bestanddele og sammensætning. Dette er indarbejdet i DS 2426, som er det danske annekst til den europæiske betonstandard EN 206-1.

Betonens alkaliindhold

I forbindelse med Alkaliudvalgets omfattende arbejder kunne man registrere, at der åbenbart findes en nedre grænse for alkaliindholdet i betonen, under hvilken alkalikiselreaktioner er uskadelige.

I 60'erne og 70'erne var det meget almindeligt blot at stille krav om at bruge en lavalkali cement (omkring max. 0,6 % ækv Na_2O) for at sikre sig mod skadelige alkalikiselreaktioner. Men da cementindholdet kan variere betydeligt – og især hvis der var tale om rene mørtler, så kunne det faktiske alkaliindhold i betonen/mørtelen let blive meget stort, også selvom man brugte en lavalkali cement.

Dette krav er senere blevet afløst af et krav om et maksimalt indhold af alkalier i betonen på 3,0 kg/m³ beton, hvilket tager højde for den aktuelle betonrecept og sammensætning.

Erfaringer fra praksis har vist, at dette krav i langt de fleste tilfælde kan sikre mod skadelige alkalikiselreaktioner, dersom der ikke tilføres alkalier udefra.

Imidlertid er mange betonbygværker udsat for udefra kommende alkalier, primært i form af NaCl fra tørsalte, havvand og svømmebadsvand. Selv relativt beskedne mængder indtrængende tørsalt kan hæve betonens alkaliindhold langt over den kritiske grænse på 3,0 kg/m³ beton.

Denne grænse er derfor kun relevant og et sikkert værn mod skadelige alkalikiselreaktioner, når betonen ikke kan tilføres nogen former for alkalier udefra.

Fugtindhold

Fugt (vand) er som nævnt en nødvendig betingelse for, at alkalikiselreaktioner kan finde sted. Udenlandske forskningsresultater har vist, at alkalireaktive beton- og mørtelprøver har kunnet reagere ved et så lavt fugtniveau som ca. 80 % RF. Man kan dog selvfølgelig ikke uden videre overføre den slags resultater til udendørs beton.

Tidligere undersøgelser - bl.a. foretaget på Teknologisk Institut - har vist, at størstedelen af udendørs betonkonstruktioner opført i 1960'erne og 70'erne, som har været

mere eller mindre beskyttet mod slagregn, havde et fugtniveau på over 90 % RF. Imidlertid peger mange eftersyn og tilstandsundersøgelser af betonbygværker på, at væsentlige revneskader forårsaget af alkalikiselreaktioner næsten udelukkende opstår for beton, som bliver udsat for konstant eller periodevis fugtighed fra omgivelserne såsom slagregn, eller som på anden måde kommer i kontakt med frit vand.

Der er eksempler på broer, der har stået uden skadelige alkalikiselreaktioner i 25 år, og først når fugtisoleringen efter disse 25 år bliver utæt - kommer skaderne. Tilsvarende kan det forventes, at hvis almindelig beton, der ikke viser skader ved indendørs brug, udsættes for vand fx fra en utæt tagkonstruktion, kan skadelige alkalikiselreaktioner hurtigt udvikle sig.

Porevæskens pH

Porevæskens pH har stor betydning for de reaktive partiklers villighed til at reagere, hvilket måske er et overset forhold. Uforvitret beton har typisk en pH-værdi på mellem 12 og 14, hvilket skyldes porevæskens indhold af calcium- og alkalihydroxider. Alkalierne fra cementen går under hydratiseringen i opløsning og omdannes til alkalihydroxider i porevæsken (NaOH og KOH). Jo højere alkaliindhold i cementen, desto højere hydroxid indhold i porevæsken, og derved også en højere pH-værdi af denne.

Kisel, især amorf kisel (opal), er ustabil i væsker med høje pH-værdier. Da pH-værdien bliver beregnet som logaritmen til hydroxid-ion-koncentrationen, svarer forskellen mellem pH 12 og 13 til en faktor 10 i hydroxidion-koncentration. Derfor vil selv en forholdsvis beskedne nedsættelse af pH kunne medføre en betydelig reduktion af risikoen for en skadelig udvikling af alkalikiselreaktioner. Der vil slet ikke kunne opstå skadelige alkalikiselreaktioner i en karbonatiseret beton, da pH her er reduceret til omkring 7-9.

Nødvendige forudsætninger for skadelige alkalikiselreaktioner for beton i Aggressiv miljøklasse fremstillet med danske tilslagsmaterialer og almindelig Portland cement (alle forhold skal være opfyldt samtidigt):

- Indhold af potentielt skadelige korn i sandfraktionen af tilslaget er højt - målt med en af de tre nedenfor anførte prøvningsmetoder:

Indhold af reaktive korn iht. TI-B52:

> 2 vol %

Mørtelprismeeekspansion iht. TI-B51:

> 1 ‰ ekspansion efter 8 uger

Kemisk svind iht. TK84:

> 0,3 ml/kg

- Alkaliindhold > 3,0 kg/m³ beton
- Fugtindhold > 90 % RF (i praksis)
- pH værdi > 12 (i praksis)

Der gælder andre krav for stenfraktionen.

I miljøklasse M kan noget højere værdier accepteres og i miljøklasse E noget lavere værdier. I miljøklasse P, kan Alkalikiselreaktioner ikke forekomme, da denne miljøklasse er karakteriseret ved et tørt miljø svarende til lavt fugtindhold.

Effekt af puzzolaner

Det har været generelt anerkendt at tilsætning af puzzolaner såsom flyveaske, mikro silica og/eller slagge til betonen kan bidrage til at reducere risikoen for skadelige alkalikiselreaktioner eller helt undertrykke sådanne.

Der findes imidlertid ikke nogle faste retningslinjer for, hvilke og hvor meget, der skal tilsættes af sådanne for helt at eliminere risikoen for AKR. Med tanke på, at kravene til betonbygværkers holdbarhed til stadighed øges, så er udgangspunktet for valg af tilslagsmaterialer normalt stadig sådan, at der kun må anvendes tilslagsmaterialer med et minimalt indhold af reaktive bjergarter i moderat, aggressiv og særlig aggressiv miljøklasse, jf. DS 2426.

19.1.1.5 Skadesbillede

Revner forårsaget af alkalikiselreaktioner er i mange tilfælde meget karakteristiske. Revnerne optræder ofte som fin- til grovmaskede netrevner med mørke fugtlignende rande, der primært skyldes udsivende alkalikiselgel.



Figur 6. Kantbjælke/facade på en bro fra 1970 med et typisk AKR-revnebillede.

Imidlertid er revnebilledet influeret af 1) armeringsudformning, (især når det gælder for- eller efterspændte konstruktioner), 2) geometri samt 3) spændingsretninger i belastede konstruktionsdele. Det medfører, at revnebilledet så at sige afpasser sig efter de gældende forhold således, at revner ikke opstår på tværs af trykspændinger i konstruktionen.



Figur 7. Langsgående orienterede revnedannelser forårsaget af alkalikiselreaktioner i undersiden af et (forspændt) brodæk. Revneorienteringen følger de herskende trykspændinger (for-spændingskræfterne) i betonen.

Denne revneorientering skyldes, at alkalikiselreaktioner er ekspansive processer, som forsøger at overvinde betonens trækstyrke og øvrige indre/ydre spændinger – og skabe revner, hvor dette er lettest muligt. Derfor følger revnebilledet og -orienteringerne typisk også de herskende spændinger i konstruktionsdelen. I forspændte brodæk betyder det, at de indre revnedannelser i overvejende grad tager form af overfladeparallele revnedannelser (delaminering af brodækket), mens de ydre revner i hovedtræk følger forspændingskræfternes retning. Typisk er revnerne derfor langsgående i brodækkets længderetning svarende til at broen udvides på tværs.

19.1.1.6 AKR's indvirkning på betonbygværkers bæreevne

AKR skadede kan have et meget "skadet" udseende i form af omfattende revneskader og alligevel have en tilstrækkelig bæreevne. Dette er særlig relevant i relation til danske betonbroer, idet det skønnes at alene Vejdirektoratet og Banedanmark tilsammen har ca. 600 betonbroer, som enten har udviklet AKR skader, eller som vil kunne udvikle AKR skader.

Der har i mange år været et stort ønske at finde en metode til at kunne afgøre, hvorvidt en aktuell AKR-skadet betonbro har tilstrækkelig bæreevne til at opfylde sit formål

(broklasse), eller om den skal nedklassificeres og i givet fald til hvad – eller måske helt udskiftes.

Inden for de sidste 3-5 år har bl.a. Vejdirektoratet i samarbejde med DTU og en række rådgivende firmaer (Cowi, Rambøll og Niras) gennemført en række projekter med fokus på AKR skadede betonbygværkers bæreevne. Projekterne har omfattet såvel omfattende laboratorieforsøg samt prøvebelastninger af bjælker taget ud af broer samt prøvebelastninger på stedet af stærkt AKR-skadede betonbroer.

Typisk er det væsentligste problem omkring AKR skadede broers bæreevne normalt knyttet til risikoen for forskydningsbrud og/eller gennemløkningsbrud, da betonens forskydningsstyrke ofte er mere udnyttet end bøjningstrykstyrken.

Undersøgelser af de skadede brodæk viste, at store dele dækkene var kraftigt AKR skadet med delamineringer/revner i hele brotværsnittets højde. Laboratorieanalyser af betonkerner udboret parallelt og vinkelret på de overvejende revneorienteringer, at betonens trykstyrke var reduceret som følge af de mange AKR relaterede revner. De karakteristiske styrker var typisk reduceret til omkring 60-70 % af de oprindelige karakteristiske styrker. Men samtidigt viste de samme undersøgelser, at den reduktion, som AKR skaderne gav anledning til på betonens tryk- og trækstyrker og dermed på forskydningskapaciteten, blev opvejet af et tilsvarende positivt bidrag som formentlig stammer fra en forspænding af længdearmeringen som følge af AKR ekspansion i brodækkets længderetning.

De omtalte undersøgelser viser, at AKR-skadet beton har en mindre forskydningsbæreevne end en intakt uskadet beton, men samtidigt viser resultaterne også, at bæreevnen af de undersøgte broer var tilstrækkelig, således at det ikke var nødvendigt at gennemføre en gennemgribende reparation af broerne – eller en egentlig udskiftning af samme.

Det igangværende (2014) forskningsarbejde som gennemføres på DTU, bl.a. i samarbejde med Vejdirektoratet forventes at bidrage til at give et væsentlig forbedret grundlag for vurdering af bæreevnen af stærkt AKR-skadede betontværsnit, herunder etablere en sammenhæng mellem den aktuelle AKR skadesgrad og betonens styrkeparametre (tryk, træk og forskydning), således at en aktuel bros restbæreevne/broklasse kan bestemmes.

I mange tilfælde er revner fra AKR derfor mere et kosmetisk end et konstruktivt problem.

19.1.1.7 Udbedring af alkalikiselskadede betonbygværker

I praksis kan igangværende alkalikiselreaktioner kun stoppes ved at ændre reaktionsmiljøet sådan, at der ikke længere tilføres fugt og/eller alkalier til betonen. Det kunne typisk ske gennem en passende udtørring og efterfølgende beskyttelse af betonen.

Desværre sker det tit, at reaktionerne og de tilhørende revneskader har bredt sig så meget og/eller svækket konstruktionen i væsentlig grad, at større eller mindre dele af det revneskadede bygværk må fjernes og retableres med ny beton.

Det er derfor vigtigt, at man griber ind i tide, inden skaderne har nået et niveau, hvor en reparation ikke længere er mulig. Derfor forestår der bl.a. et større vedligehold- og forebyggelsesarbejde for de danske broer opført i 1950-, 60- og 70erne med potentielt reaktivt tilslag i form af løbende vedligehold af fx fugtisoleringer/membraner på brodækkene og evt. malingsbehandlingen på søjler og kantbjælker.

19.1.2 Alkalikarbonatreaktioner

19.1.2.1 Alment

Dolomitreaktioner eller alkalikarbonatreaktioner er reaktioner mellem betonens alkali-ioner og visse typer karbonatbjergarter i tilslagsmaterialerne. Selvom der igennem årene er foretaget en del undersøgelser af skadede bygværker og omfattende laboratorieundersøgelser, har man stadig ikke kunnet fastslå hvilken mekanisme, der ligger bag reaktionerne.

Alkalikarbonatreaktioner er observeret i forbindelse med brug af vise typer dolomitiske bjergarter som tilslag til beton. Der er som regel tale om en lerholdig dolomitisk kalksten ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Dolomit kan forekomme i danske istidsaflejringer, men alkalikarbonatreaktioner er så vidt vides aldrig blevet observeret i danske betonbygværker.

19.1.2.2 Reaktion

Fugt er ligesom for alkalikiselreaktioner nødvendig for, at reaktionen kan foregå. Det er kun få dolomitiske kalksten, der kan reagere. De reaktive dolomitbjergarter skal tilsyneladende have en ret specifik sammensætning og mikrostruktur (krystaller af dolomit i en grundmasse af calcit og fint fordelt ler).

På basis af erfaringer suppleret med laboratorieforsøg har man fastslået, at følgende har betydning for reaktionsforløbet og skadesbilledet:

- Mængden og størrelsen af de reaktive karbonatkorn
- Betonens alkaliindhold
- Betonens vandindhold

Studier af sådanne ekspansive bjergarter, der har reageret med opløsninger af alkali-hydroxider, har bl.a. vist en omdannelse af dolomitten, en såkaldt "de-dolomitisering", og dannelsen af brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$).

19.1.2.3 Forholdsregler

Skader efter alkalikarbonatreaktioner minder i store træk om dem, der er forårsaget af alkalikiselreaktioner. Imidlertid er potentielt alkalikarbonatreaktive bjergarter relativt sjældne, ligesom de af andre grunde normalt ikke er velegnede til betonfremstilling.

Desuden synes sådanne bjergarter at have en særlig tekstur og mikrostruktur, som normalt gør det muligt at identificere dem af en kyndig petrograf. Der findes ASTM-metoder til at vurdere risikoen og størrelsen af eventuelle ekspansive reaktioner i forbindelse med alkalikarbonatreaktioner.

19.1.3 Litteratur

19.1.3.1 Alkalikiselreaktioner

- [1] Nerenst, Paul (1952): "Betonteknologiske studier i U.S.A". Statens Byggeforskningsinstitut, studie nr. 7. København 1952.
- [2] Nerenst, Paul (1957): "Alment om alkali reaktioner i beton". ATV/SBI, Progress report A1. København 1957.
- [3] Plum, Niels Munk (1961): " Foreløbig vejledning i forebyggelse af skadelige alkalikiselreaktioner i beton". Alkaliudvalgets vejledning 1. SBI, 1961.
- [4] "13 betonsygdomme – hvordan de opstår, forløber og forebygges". Beton 4, Statens Byggeforskningsinstitut, 1985.
- [5] "Basisbetonbeskrivelsen for bygningskonstruktioner" (BBB). Byggestyrelsen, 1986.
- [6] DS 481, Beton, materialer.
- [7] DS/EN 206-1, Beton – Del 1: Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse.
- [8] DS 2426, Beton – Materialer – Regler for anvendelse af EN 206-1 i Danmark.
- [9] DS/INF 154, Vejledning i brug af DS/EN 206-1 og DS 2426 – Beton – Materialer.

19.1.3.2 Alkalicarbonatreaktioner

- [1] "13 betonsygdomme – hvordan de opstår, forløber og forebygges". Beton 4, Statens Byggeforskningsinstitut, 1985.
- [2] STP 169D Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials", ASTM, 2006.
- [2] ASTM C1105 "Standard Test Method for Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Rock Reaction".
- [3] ASTM C586 "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks as Concrete Aggregates (Rock-Cylinder Method)".

19.1.4 Links

www.danskbyggeskik.dk