



Alkalikiselreaktioners tidsforløb

Nielsen, Anders

Publication date:
1986

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

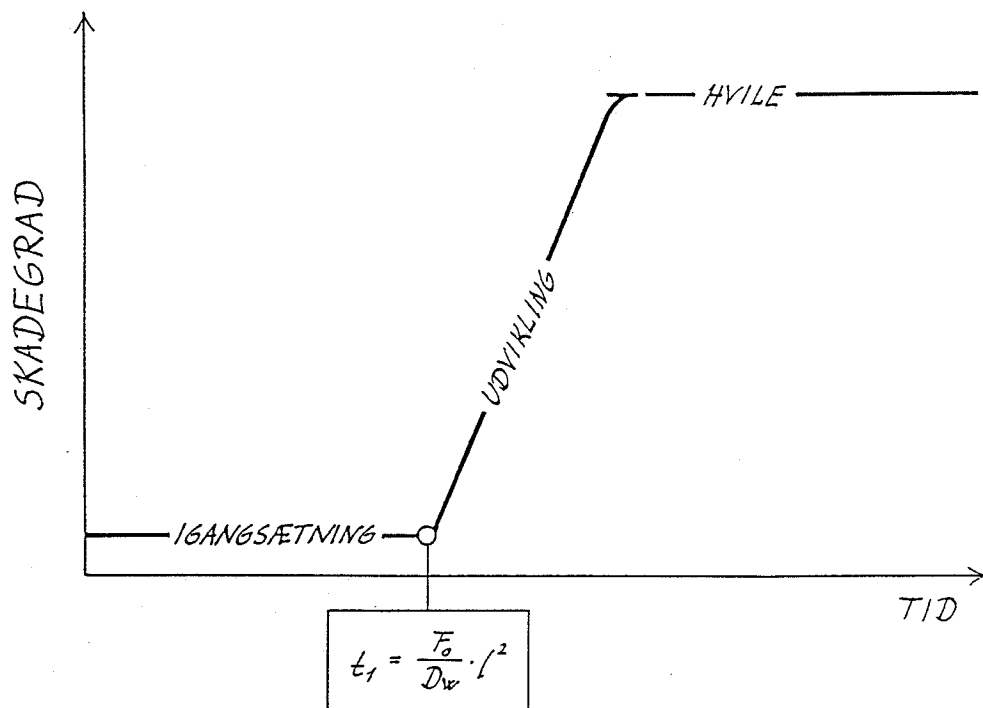
Citation (APA):
Nielsen, A. (1986). *Alkalikiselreaktioners tidsforløb*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



ALKALIKISELREAKTIONERS TIDSFORLØB

ANDERS NIELSEN

LABORATORIET FOR BYGNINGSMATERIALER
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

ALKALIKISELREAKTIONERS TIDSFORLØB

Anders Nielsen
Laboratoriet for Bygningsmaterialer
Danmarks tekniske Højskole

December 1986

Alkalikiselreaktioners tidsforløb
Laboratoriet for Bygningsmaterialer
Danmarks tekniske Højskole
Teknisk Rapport 164/86
December 1986

Stikord

Betonskader, alkalikiselreaktioner,
fugttransport, tidsforløb

Resume

I rapporten opstilles og belyses den hypotese, at det tidspunkt, hvor skader på grund af alkalikiselreaktioner i beton bliver synlige, er bestemt af den tid, det tager for vandet at trænge ind, d.v.s. at tidspunktet bliver proportionalt med kvadratet på en karakteristisk dimension.

INDHOLDSFORTEGNELSE

	<u>Side</u>
SAMMENFATNING	1
SUMMARY	2
INDLEDNING	3
BAGGRUND	3
FYSISK-KEMISKE FÆNOMENER	4
FUGTMEKANIK OG ALKALIKISELREAKTIONER	7
IGANGVÆRENDE EKSPERIMENTER	11
SKADEGRAD OG VANDINDHOLD	11
VURDERING AF SKADERISIKO	12
KONKLUSION	14
LITTERATUR	15
TABEL 1	16

Sammenfatning

Ved alkalikonferencen i Lyngby i 1983 fremsatte jeg den hypotese, at tidsforløbet for alkalikiselreaktionsbetingede skader i betonkonstruktioner forløber med en igangsætningsperiode, en udviklingsperiode og en hvileperiode, og at det kun er i forvejen skadede konstruktionsdele, som revner. I denne rapport belyses hypotesen yderligere, idet den kobles til fugttransportteori- en. Det vises, at tidspunktet for udviklingsperiodens indtræden, t_1 , kan beregnes ud fra $t_1 = K \cdot l^2$, hvor K er 30 à 300 år/m², og l er en karakteri- stisk dimension, for søjler f.eks. er l den halve tykkelse.

Skadet beton kan indeholde mere vand end uskadet beton med samme udgangs- sammensætning. Dette vises og knyttes til den fremsatte teori.

Til slut opstilles en vejledning for vurdering af skaderisikoen i en given kon- struktion.

Summary

At the conference "Alkalis in Concrete" in Lyngby in 1983 I promoted the hypothesis that the time development of damages caused by alkali-silica reactions in concrete structures consists of an initiation period, a period of development, and a period of rest. Further, I stated that it is only structures with initial damages from the construction period which will show damages from alkali-silica reactions.

In the present report this hypothesis is further elucidated and connected to the theory of moisture diffusion. It is shown that the age, t_1 , at which the damages start to develop can be calculated from $t_1 = K \cdot l^2$, where K is 30 to 300 years/m², l is a characteristic dimension, e.g. for a column half of the thickness.

Damaged and undamaged concrete from the same structure have different sorption properties. The damaged concrete holds more water than does undamaged concrete. This fact is shown and connected to the theory.

At last a guideline for evaluating the risk of damages is shown.

Indledning

Et af spørgelserne i dansk betonteknologi er alkalikiselreaktioner (AKR). Der udfoldes meget store anstrengelser for at undgå at få AKR i nye konstruktioner, senest udtrykt i Basisbetonbeskrivelsen (BBB) af 1985. Det spørgsmål melder sig imidlertid, hvad der sker med alle de konstruktioner, som allerede er opført med alkalireaktivt tilslag. Hvorledes vil skadesforløbet være? I det følgende vil jeg opstille en tidsforløbshypotese, som sammenfatter nogle af de mange iagttagelser, vi efterhånden har om AKR og deres tidsmæssige udvikling. I hypotesen kobles tidsforløbet og konstruktionsdimensionerne sammen via teorien for vands diffusion ind i betonen.

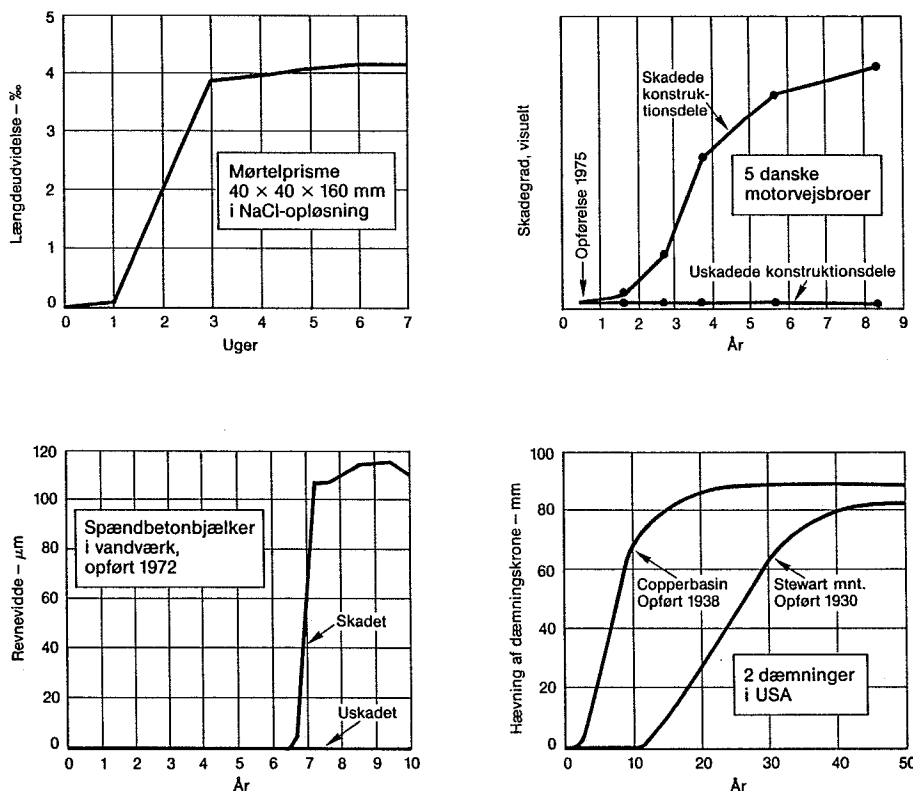
Baggrund

Den principielle fysisk-kemiske mekanisme i AKR er forholdsvis velkendt efter arbejdet i SBI-ATV's alkaliudvalg, arbejdet på Teknologisk Institut/Byggeteknik og den store internationale indsats /5/. Principperne er sammenfattet i Beton-Bogens kapitel 3.5 /1/, hvor jeg også tilføjer de iagttagelser om tidsforløbet, som jeg første gang fremførte på Alkalikonferencen i København i 1983 /6/, se figur 1.

Det, jeg der fremførte, var, at man på prøvelegemer og konstruktionsdele, som skades alene på grund af AKR, kan iagttage, at der er en igangsætningsperiode, en udviklingsperiode, hvor revner dannes og ekspansioner finder sted, og en hvileperiode, som varer resten af konstruktionsdelens levetid (figur 2, øverst). Yderligere postulerede jeg ved konferencen, at det kun er konstruktionsdele, som har skader fra produktionsfasen såsom termorevner og bleeding, som vil skades af AKR.

Tidsforløbet har jeg iagttaget på et stort antal konstruktionsdele fra praksis, og det kan ses ved mørtelprismeforsøg i laboratoriet.

I det følgende skal jeg uddybe min påstand.



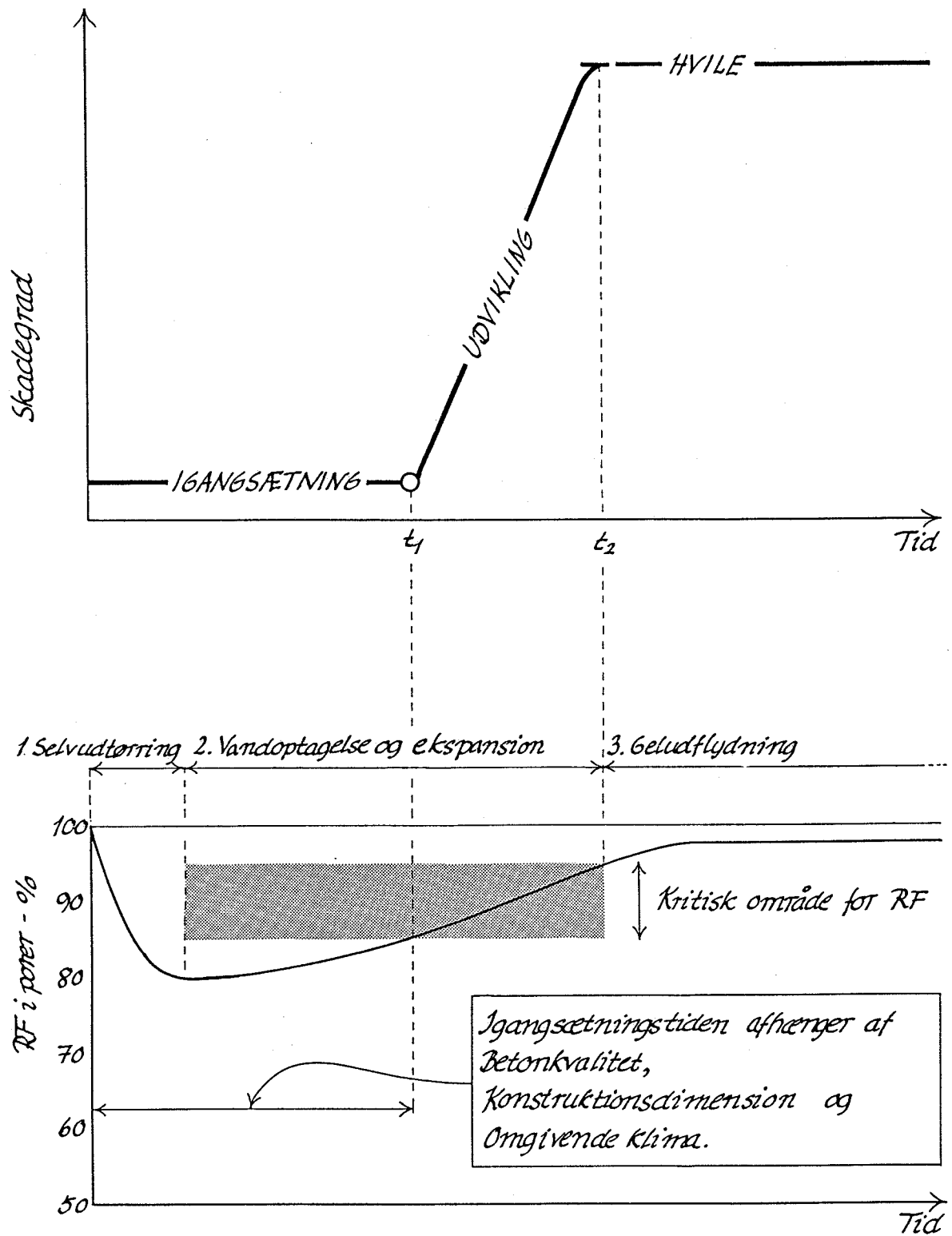
Figur 1. Eksempler på tidsforløbet af skader på forskellige konstruktioner. Observer, at der er uskadede konstruktionsdele identiske med de skadede.

Examples of the influence of time on damages on different kinds of structures. Upper left: Mortar bars. Upper right: Bridges. Identical parts show up with damages and no damages. Lower left: Roof beams, cracking. Lower right: Rise of midcrest of two dams in the U.S.A.

Fysisk-kemiske fænomener

Tidsforløbet (figur 2, øverst) kan, så vidt jeg kan se, henføres til de kemiske og fysiske fænomener inden i betonen på følgende måde (figur 2 nederst).

1. Geldannelse og selvudtørring. Under cementens reaktion med vand dannes cementpasta, også kaldet cementgel. (En gel er et tofasesystem, hvor de to faser er sammenhængende.) Ved reaktionen formindskes det kemisk bundne vands volumen, hvorved der sker en indre udtørring, en selvudtørring, af betonen. De alkalireaktive gruspartikler omdannes sideløbende med cementhydratiseringen til alkalikiselgel, som er en fast gel ligesom cementpasta.



Figur 2. Øverst: Tidsudviklingen for alkaliselreaktionsfremkaldte skader principielt. Nederst: De til tidsudviklingen koblede fysisk-kemiske fænomener.

Top: The time development of damages caused by alkali silica reactions.
Bottom: Principal sketch of the physical-chemical phenomena attached to the different periods in the time development.

Ligesom cementgelen binder alkaliselgelen ikke-fordampeligt kemisk bundet vand, som også mister volumen. Herved kommer alkaliselgeldannelsen til at bidrage til selvudtørringen /7/. Dette svarer til det fænomen, som Torben Knudsen iagttager ved kemisk svind måling af tilslags reaktivitet /8/. Den samlede selvudtørring kan komme ned på ca. 80% RF ved 20^o C. Gudmundsson og Asgeirsson har målt 83% RF ved 23^o C i islandsk beton (/5/ s. 221). Der sker ingen ekspansioner i denne fase, tværtimod. Gudmundsson og Asgeirsson rapporterer en svag kontraktion.

2. Vandoptagelse og ekspansion. Beton produceret som ovenfor beskrevet vil, placeret i en konstruktion i fugtig miljø, d.v.s. med RF > 80%, udsat for slagregn eller i kontakt med vand, begynde at optage vand. Transporten sker som kapillarsugning og diffusion. Den foregår så langsomt, at reglerne for vanddampdiffusion kan anvendes /1/. Når den relative luftfugtighed (RF) kommer op på 85-95% omkring en til alkaliselgel omdannet gruspartikel, vil partiklen forsøge at svulle /9/.

Hvis partiklen er omgivet af revnefri stærk beton, vil den ikke kunne ekspandere. Omgivelserne kan modstå trykket fra gelen, som på sin side ikke har plads til så meget vand. Hvis der derimod er revner ind i betonen, vil de partikler, som ligger nærmest revnerne, have mulighed for at ekspandere, hvorved de allerede eksisterende revner åbnes. Revnerne kan være termorevner, bleedingspor og støbeskel. Ekspansionen sker, mens gelen er i fast tilstand. De ekspanderede partikler ligner stadig porøse flintesten. De dannede revner vil være luftfyldte.

Ekspansionen svarer til den svelning, der sker, når træ sveller under vandoptagelse. Veddet forbliver også der som fast gel. Fænomenet med, at en gel, som står under mekanisk spænding, ikke optager så meget vand som en fri gel, er behandlet for træ af Barkas /10/.

Ekspansionen fortsætter, indtil de enkelte gruspartiklers evne til at udvide sig er opbrugt. Den øvre ekspansionsgrænses eksistens og nødvendighed er vist af Tang Ming-shu & Han Su-fen /11/.

Antagelsen om, at det er nødvendigt, at der er initialrevner til stede for, at der sker revnedannelser på grund af AKR, støttes af den omstændighed, at der står tusindvis af betonkonstruktioner i Danmark støbt med alkalireaktivt

tilslag, hvor man ikke ser skader. Hvis ethvert alkalireaktivt gruskorn altid førte til ekspansion og revnedannelse, ville de fleste af vore broer og havne forlængst være sunket i grus. Antagelsen støttes også af de mange iagttagelser af, at tilsyneladende identiske konstruktionsdele kan optræde såvel skadede som uskadede, jf. figur 1.

3. Geludflydning. Hvis der ledes yderligere vand til de reaktive partikler gennem revnerne, vil gelen optage mere vand og omdannes fra fast til flydende gel, som flyder ud i og fylder revner og hulrum. Her kan gelen stivne og karbonatisere, hvorved revnerne selvheles. Der kan også ske det, at den hygroskopiske gel bliver ved at optage vand, som med opløst stof flyder ud af revnen, ned over konstruktionen og danner "kalktapeter". Geludflydningen er således et relativt ufarligt, ja til og med i nogle tilfælde et gavnligt fænomen.

Fugtmekanik og alkalikiselreaktioner

Igangsætningsperiodens og udviklingsperiodens længde vil være afhængig af, hvor hurtigt vandet kan trænge ind i betonen. Vandindtrængningshastigheden afhænger af det omgivende klima, konstruktionsdelens tykkelse og betonkvaliteten.

På basis af de ovenstående betragtninger antager jeg, at den mængde vand, som skal til at få partiklerne i en given beton til at ekspandere tilstrækkeligt til at lukke revnerne op, er en fast, omend ukendt størrelse. Denne vandmængde definerer sammen med ligevægtsvandindholdet et opfugtningspotentiale, som sammen med konstruktionsdelens form bestemmer et fouriertal, F_0 (jf. diffusionsteorien, f.eks. /1/). Med givet F_0 er tiden, t , til denne vandoptagelse er nået, defineret ved

$$t_1 = \frac{F_0 \cdot l^2}{D_w} \quad (1)$$

hvor l er en karakteristisk dimension ved konstruktionsdelen (jf. figur 3), og D_w er diffusionskoefficienten for den pågældende beton.

Hvis igrangsætningsperiodens længde, t_1 , er afhængig af vandindtrængningen, bør det være således, at t_1 er proportional med l^2 . Udviklingsperiodens sluttidspunkt, t_2 , bør også være en funktion af konstruktionens dimensioner.

For at undersøge, om hypotesen er anvendelig, har jeg samlet et antal iagttagelser fra praksis og fra laboratorieforsøg (tabel 1). På figur 3 er plottet værdierne for t_1 og t_2 som funktion af l i et dobbelt logaritmisk diagram. Tiderne er korrigeret til 20°C , jf. nedenfor. Hvis hypotesen er anvendelig, skal punkterne ligge på en ret linie med hældningen 2, idet man ved logaritmering af (1) får

$$\log t_1 = 2 \log l + \text{konstant} \quad (2)$$

Da forsøgene og iagttagelserne i tabel 1 refererer til forskellige temperaturer, T , har det været nødvendigt at regne om til en referencetemperatur, her 20°C , efter Arrheniusformlen

$$k = \exp\left(\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T}\right)\right) \quad (3)$$

hvor k angiver det antal gange, diffusionen går hurtigere ved den pågældende temperatur,

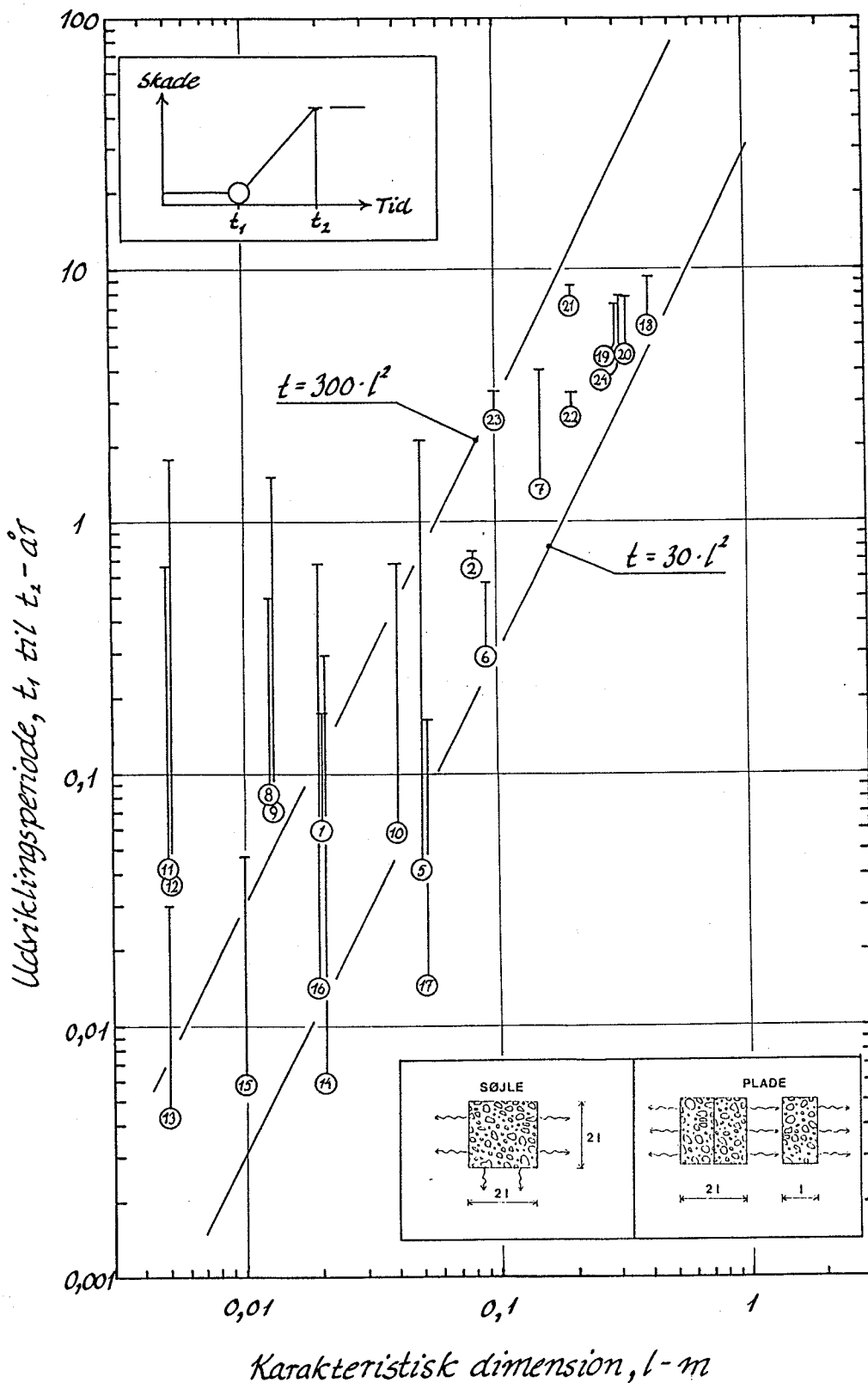
E er aktiveringsenergien for vanddiffusion og

$R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot ^\circ\text{K})$ er gaskonstanten.

Diffusionskoefficientens variation med temperaturen kan aflæses af /1/, figur 3.4-17. Her ses en tredobling af D_w ved forøgelse af temperaturen fra 20°C til 50°C . Det giver en aktiveringsenergi, E , på ca. 28.800 J/mol .

Det ses af figur 3, at resultaterne med l større end $0,08 \text{ m}$ ligger inden for et bånd med en dekades bredde. Disse resultater gælder alle for praktiske, armerede konstruktioner. Spredningen skyldes variation i betonkvalitet og konstruktionsform. Diagrammet kan siges at gælde for "populationen" betonkonstruktioner. Det kan ikke afvises, at hypotesen om tidsudviklingen kan anvendes.

For mørtelprismeforsøgene, som har karakteristiske dimensioner på $0,05 \text{ m}$ og derunder, er der betydeligt større spredning på resultaterne. Igangsættningstiden t_1 varierer over to dekader for fastholdt l . Udviklingsperioden er også længere, end man skulle forvente efter teorien. Hertil skal siges, at hypotesen kun omfatter diffusion af vand. Ved mørtelprismeforsøgene har man også i flere tilfælde diffusion af Na^+ og Cl^- . Vigtigst er dog nok den omstændighed, at ekspansionerne kan udvikle sig voldsommere i et mørtelprisme end i



Figur 3. Udviklingsperiodens start- og sluttidspunkt som funktion af den karakteristiske dimension gældende for referencetemperaturen 20° C. Værdier fra tabel 1.

The start (t_1) and termination (t_2) of the period of development plotted as a function of the characteristic dimension l . Reference temperature 20° C. Values from Table 1.

et armeret betonlegeme, fordi der ikke er tilsvarende sammenholdende kræfter i mørtelen som i betonen. Der bør forskes yderligere i disse forhold.

Punkternes placering i diagrammet figur 3 afhænger af F_o og D_w . F_o afhænger af, hvor stor en del af vandunderskuddet i konstruktionsdelen det er nødvendigt at få ind, før ekspansionen sker. Desuden afhænger det af formen på konstruktionsdelen. Figur 3.4-22 i /1/ viser, at for et middelopfugtningspotentialt på 0,3 à 0,5 kan F_o variere fra 0,01 til 0,2. Diffusionskoefficienten varierer med v/c og mange andre betonteknologiske forhold. For v/c mellem 0,3 og 0,5 har man variationer mellem 5 og $20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. For $t = 1$ år og $l = 1$ m fås hermed værdier for F_o/D_w på 30 à 300 år. Linier for disse to værdier er indtegnet i figur 3.

Igangsætningstidspunktet kan vurderes nøjagtigere, hvis man inddrager fourier-tallet og diffusionskoefficienten for den aktuelle betonkonstruktion i en beregning.

Eksempel: Facadesøjlerne i et boligbyggeri /4/ stikker uden for facaden, således at de kan regnes påvirket todimensionalt. Den karakteristiske dimension sættes lig den halve sidelængde $l = 0,15$ m. Middelttemperaturen over året sættes til 12°C . Ved 12°C og $v/c = 0,45$ får man fra /1/, figur 3.4-17, en diffusionskoefficient $D_w = 8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Middelopfugtningspotentialt sættes skønsomt til $O_m = 0,5$, d.v.s. at halvdelen af vandunderskuddet skal være udlignet. O_m er vurderet ud fra adsorptionsisotermens krumning mellem 80 og 100% RF og ud fra, at ekspansionen formodes at ske ved 90% RF og at ligevægtsvandindholdet ligger ved 95% RF. $O_m = 0,5$ giver $F_o = 0,06$ for en cylinder. Man har da, at ekspansionen vil ske omkring tidspunktet t_1 bestemt af

$$t_1 = \frac{F_o \cdot l^2}{D_w} = \frac{0,06 \cdot 0,15^2}{8 \cdot 10^{-12} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 5,4 \text{ år} \quad (5)$$

Dette gælder for 20°C ; for middelttemperaturen 12°C vil ekspansionen først ske efter

$$\frac{t}{k} = \frac{5,4}{\exp\left(\frac{28.800}{8,314} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{285}\right)\right)} = 7,4 \approx 7 \text{ år}$$

Så vidt det er oplyst, er revnedannelsen i de søjler, der er revnet, sket mellem 2 og 6 år efter opførelsen. Afvigelsen mellem beregninger og iagttagelserne skyldes først og fremmest usikkerheden på fastsættelsen af O_m ,

middelopfugtningspotentialet. Både selvudtørings-RF-værdien, den kritiske RF-værdi for revnedannelse og ligevægts-RF-værdien inde i betonen under påvirkning af slagregn er kun kendt med omtrentlige værdier. Dette bør dog ikke afholde en fra at foretage et kvalificeret skøn på O_m -værdien.

Igangværende eksperimenter

I DIA-B's gård i Lyngby står fire betonklodser $0,7 \times 0,7 \times 1,0$ m støbt i 1977. Der blev anvendt rapidcement i rigelig mængde, således at vi fik provokeret termorevner frem /16/. Sandet var fra Nymølle, d.v.s. reaktivt. Der må, jf. figur 3 med $l = 0,35$ m, forudses skader omkring år 1977 + $4/0,66$ à $10/0,66$, d.v.s. mellem 1983 og 1992. De er ikke revnet i skrivende stund. (0,66 er hastighedsfaktoren, som skal tilføjes, fordi figur 3 gælder for 20° C og vi udendørs har ca. 10° C.)

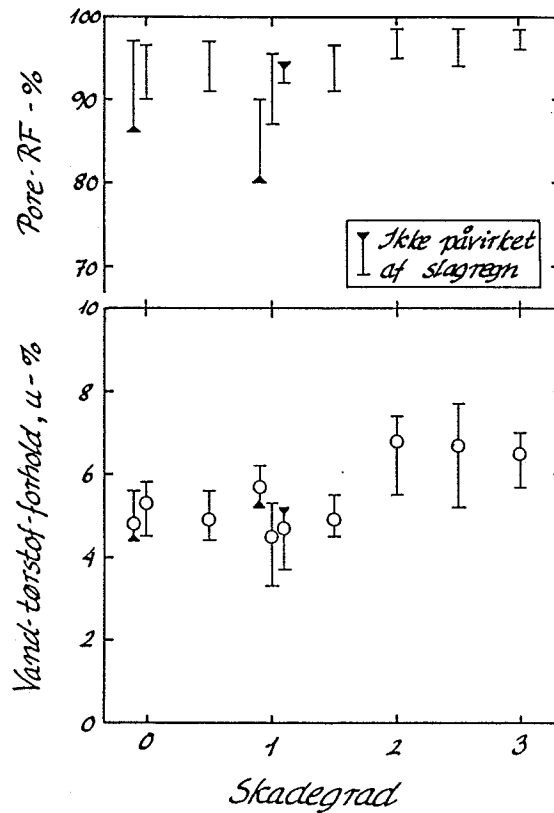
I Halsskov færgeshavn står opstillet fire prøvelegemer fra støbningerne i forbindelse med forberedelsen af 1978-Storebæltsbroen /18/. Der findes elementer med og uden provokerede termorevner. Der er anvendt to forskellige cementer. Elementerne blev opstillet i 1979. Det er plader $2,3$ m i kvadrat, $0,45$ m tykke. Den karakteristiske dimension er $l = 0,225$ m. Ifølge figur 3 burde der ske revnedannelser i 1979 + $1,5/0,66$ à $8/0,66$, d.v.s. mellem 1981 og 1991. De er ikke revnet i skrivende stund.

Skadegrad og vandindhold

Antagelsen om, at der skal være initialrevner til stede, for at der kan ske revnedannelser, har konsekvenser for en alkalireaktiv betons vandoptagelses-evne.

Så længe revnerne er lukkede, vil vandet trænge ind i betonen med samme hastighed i skadede og uskadede konstruktionsdele. Vandindtrængningen til de indre dele stopper, når RF her svarer til en "slagregnsækvivalent" RF-værdi udenfor. De revnede konstruktionsdele vil åbne sig og for samme RF optage mere vand. Dette betyder, at vandindholdet i de uskadede skal være mindre end i de skadede bygningsdele. Dette forhold er illustreret i figur 4.

Her vises for nogle konstruktionsdele fra fem motorvejsbroer den relative luftfugtighed i betonens porer (RF) og vandtørstofforholdet (u) som funktion af konstruktionsdelens skadegrad. Skadegrad 0-1,5 er ikke revnet af betydning.



Figur 4. Sammenhængen mellem RF, vand-tørstofforholdet og skadegrad for prøver fra motorvejsbroer mellem Århus og Skanderborg /17/.

Connection between RH, water-to-dry-mass ratio, and degree of damage for specimens from motor road bridges between Århus and Skanderborg /17/.

Det ses, at RF i alle konstruktionsdelene, undtagen en, som er den tykkeste, ligger over 90%. Det betyder, at vandaktiviteten stort set er ens i alle konstruktionsdele, og at de har mulighed for at revne, hvis de kan. Den kritiske RF-værdi ligger mellem 85% og 95% RF.

Vandindholdet er lavest ved de små skadegrader, bl.a. fordi gelen er indspændt i betonen. Ved de høje skadegrader holder revner og sprækker og udflydt alkalikiselgel på vandet.

Konsekvensen af ovenstående er, at sorptionskurven for en beton med alkalireaktivt tilslag vil være afhængig af betonens spændings- og deformationstilstand.

Vurdering af skaderisiko

Ud fra ovenstående erkendelse kan man opstille følgende procedure ved vurdering af risikoen for revnedannelse i en betonkonstruktion med alkalireaktivt tilslag.

Allerede skadet konstruktionsdel:

Optegn et skadesudviklingsdiagram, f.eks. revneudvidelse, som funktion af tiden. Hvis hvileperioden er nået på optegningstidspunktet, er sandsynligheden for yderligere skader ringe. Hvis hvileperioden ikke er nået, må man vente og se, hvad der sker, eller man må foretage en beregning af udviklingstidspunktet jf. beregningen ovenfor, ligning (5), for at vurdere, hvor langt man er fra ligevægt.

Indtil nu uskadet konstruktionsdel:

En tilsyneladende uskadet konstruktionsdels risiko for at få revner eller andre skader kan vurderes således. Et skøn foretages over tiden t_{90} fra selvudtøringsstadiet, indtil betonen har optaget vand svarende til i gennemsnit ca. 90% RF i porerne, jf. beregningen i ovenstående eksempel.

Tiden fra konstruktionens ibrugtagning til det aktuelle undersøgelsestidspunkt kaldes t_{akt} . Man har da

$t_{90} < t_{akt}$: Sandsynligheden for yderligere skader ringe

$t_{90} > t_{akt}$: Yderligere skader kan ikke udelukkes, vent og se.

Yderligere undersøgelser

De her fremsatte antagelser og iagttagelser leder frem til en del opgaver, som bør belyses med en yderligere forskningsindsats:

- Fastlæggelse af niveauet for den kritiske RF-værdi og undersøgelse af, om den kritiske RF-værdi afhænger af tilslagets art.
- Studie af sammenhængen mellem mekanisk spænding og gelens vandoptagelsesevne.
- Opstilling af en mere nuanceret beregning af starten og slutningen på udviklingsperioden for tykke betonkonstruktioner.
- Opstilling af en mere korrekt stokastisk analyse af udviklingsperiodens start- og sluttidspunkt.

Jeg har dog anset det for vigtigt at få de i rapporten refererede iagttagelser spredt på nuværende tidspunkt for at få dialogen i gang om hypotesens anvendelighed fremfor at vente, til jeg selv har opklaret flere detaljer.

Konklusion

Tidsforløbet for skader på beton med alkalireaktivt tilslag er karakteriseret ved en igangsætningsperiode, en udviklingsperiode og en hvileperiode.

Det er kun i forvejen skadede konstruktionsdele, som får skader fra AKR.

Ud fra et stort antal konstruktionsdeles tidsmæssige skadesudvikling kan det konstateres, at igangsætningsperiodens længde og tiden, til skadesudviklingen stopper, er proportionale med kvadratet på en for konstruktionsdelen karakteristisk dimension.

Igangsætningsperiodens længde kan vurderes ved hjælp af lineær diffusions-teori.

Risikoen for yderligere skadesudvikling kan vurderes ved at vurdere tiden fra konstruktionens ibrugtagning til iagttagelsestidspunktet i forhold til den beregnede igangsætningstid.

Litteratur

- /1/ Herholdt, A.D., m.fl.: Beton-Bogen. Aalborg Portland, 1985.
- /2/ Bonzel m.fl.: Alkalireaktion im Beton. "Beton" 10/86, s.385-389.
- /3/ T. Thorsen: Foredrag i DBF, november 1986, om forsøg med bjælker i varm NaCl-opløsning.
- /4/ Oplysninger fra firmaet Lemming og Eriksson, november 1986.
- /5/ Alkalis in Concrete. 6th International Conference Proceedings, 1983.
- /6/ Nielsen, A.: Service Life Prediction and Alkali Silica Reactions, s.411-418 i /5/.
- /7/ Nielsen, A.: Sorption Properties of Concrete with Alkali-Silica Reactive Aggregate, s.195-200 i /5/.
- /8/ Knudsen, T.: Alkali-kisel projektet under ATV. Dansk Beton 3/1986, s.18-25.
- /9/ Nilsson, L-O.: Moisture Effects on the Alkali-Silica Reaction /5/ s.201-208.
- /10/ Barkas, W.W.: The Swelling of Wood under Stress. Her Maj. Stat. Off. London, 1949.
- /11/ Tang Ming-shu & Han Su-fen: Kinetics of Alkali-Silica Reaction, s.261-267 i /5/.
- /12/ Nielsen, A.: Alkali Silica Reactions and Crack Development. Nord. Bet. 3-4, 1984, s.87-90.
- /13/ COWIconsult. Revneviddemålinger. Broer på M70. Støvring-Aalborg Nord. December 1979 og August 1982.
- /14/ DIA-B: Undersøgelse af skadede betonelementer på bebyggelsen "Brøndby Strand". Marts 1975.
- /15/ Svømmebadsteknisk Forening. Undersøgelser 1986.
- /16/ Personlige iagttagelser på prøvelegeme med provokerede termorevner. Undersøgelsen ikke afsluttet. Prøvelegeme fremstillet af Henning Larsen ved eksamensprojektet "Termorevner i beton". DIA-B, 1977.
- /17/ Nielsen, A.: Fugt i betonbroer, fugtforholdene i udvalgte betonbroer. Århus Amtskommune, Januar 1983. TI/Byggeteknik Statusrapport.
- /18/ Pedersen, E.J., og P. Freiesleben Hansen: SSB-Forundersøgelse B3270, B2253, bkf-centralen (i dag: BKI) R:094, Lyngby 1979.

Tabel 1. Karakteristiske dimensioner og udviklingsperiodens start- og sluttidspunkt for alkaliskeskadede prøvelegemer og konstruktionsdele. Reference 20° C. Tabellen skrevet december 1986.

Nr.	Emne (dimensioner i cm)	Form ^{o)} : Plade Cylinder Kugle	Armeret Uarmeret	Karak- teristisk dimension m	Temperatur		Starttidspunkt, t ₁ , år		Sluttidspunkt, t ₂ , år		Kilde
					°C	Faktor ^{x)}	Målt	Korrigeret til 20° C	Målt	Korrigeret til 20° C	
1	Prisme (4x4x16) i NaCl-opløsning	C(K)	U	0,020	50	3,0	1/52	0,058	3/52	0,173	/1/ s.223
2	TT-bjælker i vandværk	C	A,U	0,080	8	0,60	6,5	3,92	7,5	4,53	/1/ s.223
3	Copperbassin, dæmning	P	?	?	?	?	3	?	20	?	/1/ s.223
4	Stewart mnt., dæmning	P	?	?	?	?	11	?	40	?	/1/ s.223
5	Prismer (10x10x50)	C(K)	U	0,05	40	2,1	1/52	0,041	1	2,13	/2/ s.385 ff.
6	Bjælker i NaCl-opløsn. (VD-DIAB)	C(K)	A	0,09	50	3,0	5/52	0,29	10/52	0,58	/3/
7	Facadesøjler i boligblokke	C	A	0,15	10	0,66	2	1,32	6	4,0	/4/
8	Prismer (2,5x2,5x27,5)	C	U	0,0125	20	1	1/12	0,083	6/12	0,500	/5/ s.65
9	Prismer (2,5x2,5x27,5)	C	U	0,0125	38	2,0	1/24	0,083	9/12	1,50	/5/ s.66
10	Halve normcyl. i NaCl-opløsning	C(K)	U	0,04	50	3,0	1/52	0,058	12/52	0,69	/5/ s.250
11	Prismer (1x1x4)	C(K)	U	0,005	20	1	1/24	0,042	8/12	0,67	/5/ s.263
12	Prismer (1x1x4)	C(K)	U	0,005	40	2,1	1/52	0,041	10/12	1,77	/5/ s.263
13	Prismer (1x1x4)	C(K)	U	0,005	150	37,8	1 h	0,0043	7 h	0,030	/5/ s.263
14	Prismer (4x4x16)	C(K)	U	0,020	40	2,1	1 d	0,0058	50 d	0,292	/5/ s.372
15	Prismer (2x2x16)	C(K)	U	0,010	40	2,1	1 d	0,0058	8 d	0,047	/5/ s.372
16	Prismer (4x4x16)	C(K)	U	0,020	20	1	5 d	0,014	50 d	0,685	/5/ s.373
17	Prismer (10x10x16)	C(K)	U	0,050	20	1	5 d	0,014	60 d	0,164	/5/ s.373
18	Brokantbjælke, M70-137	C	A	0,41	10	0,66	9	5,9	14	9,2	/13/
19	Brosøjler, M70-166	C	A	0,30	10	0,66	7	4,6	11	7,2	/13/
20	Brosøjle, M70-167 (19697)	P	A	0,31	10	0,66	7	4,6	12	7,9	/13/
21	Brosøjler, M70-175	P	A	0,20	10	0,66	11	7,2	13	8,6	/13/
22	Parkeringsdæksøjler, Brøndby Strand	C	A	0,20	10	0,66	4	2,6	5	3,3	/14/
23	Altanvingelement, Brøndby Strand	C	A	0,10	10	0,66	4	2,6	5	3,3	/14/
24	Svømmebassinvæg, Hørsholm	P	A	0,30	27	1,3	3	4,0	6	7,9	/15/
25	Prøvelegemer, DIA-B (70x70x100), 1977	K(C)	U	0,35	10	0,66	>9	>14	-	-	/16/
26	Prøvelegemer, Halskov, 1979, (45x230x230)	P	U	0,225	10	0,66	>7	>11	-	-	/18/

o) Formoplysningen nødvendig ved bestemmelse af fouriertallet.

x) Hastighedsfaktoren i henhold til ligning (3) til omregning til 20° C.