

SBI - publik

Betonkonstruktioners levetid



Et forprojekt

SBI-RAPPORT 225 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1992



Betonkonstruktioners levetid

Et forprojekt

ERIK STOKLUND LARSEN

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

EX. 2
- 4 NOV. 1992

00 194 P

SBI

SBI-RAPPORT 225 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1992

SBI-rapporter er beretninger om afsluttede forskningsprojekter.

SBI-publikationer udgives i følgende serier: Anvisninger, Rapporter, Meddelelser, Byplanlægning og Beton. Publikationerne fås gennem boghandelen eller ved at tegne et SBI-abonnement. Instituttets årsberetning og publikationskatalog er gratis og kan rekvireres fra SBI.

SBI-abonnement er en rabatordning med mange fordele for dem, der vil sikre sig løbende orientering om væsentlige udgivelser inden for byggeforskningsområdet. Ring til SBI og hør nærmere.

ISBN 87-563-0815-9.

ISSN 0573-9985.

Pris: Kr. 135,00 inkl. 25 pct. moms.

Oplag: 800.

Renskrivning: Erik Stoklund Larsen.

Tegninger: Erik Stoklund Larsen.

Omslagsfoto: SBI's arkiv.

Tryk: Bjørvig Offset, Hvidovre.

Statens Byggeforskningsinstitut,

Postboks 119, 2970 Hørsholm.

Telefon 42 86 55 33.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:

SBI-rapport 225: Betonkonstruktioners levetid. Et forprojekt. 1992.

Indhold

Forord	4
Resumé og konklusion	5
Summary	7
Indledning	8
Formål	10
Baggrund for betonkonstruktioners levetid i Danmark	10
Konstruktioner	13
Ældre betonkonstruktioner	13
Yngre betonkonstruktioner	13
Andre betonkonstruktioner	14
Eksisterende data for konstruktionerne	17
Initialdata	17
Generaleftersyn	24
Særeftersyn	27
Skademe mekanismer	29
Alkalikiselreaktioner	30
Frost-tø påvirkninger	34
Armeringskorrosion	36
Resultater og diskussion	40
Resultater fra materialeprøvningen	40
Resultater fra generaleftersyn	43
Resultater fra særeftersyn	53
Afsluttende diskussion	55
Fremtidig forskning	56
Litteratur	57
Bestandighed af beton - generelt	57
Alkalikiselreaktioner i beton	58
Frost-tø påvirkninger af beton	61
Armeringskorrosion	63

Forord

Levetidsvurderinger er efterhånden ved at være almindelige ved opførelse eller reparationer af betonkonstruktioner.

Nærværende projekt er optakten til et omfattende hovedprojekt, der skal give bedre viden og information om betonkonstruktioners levetid.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem DSB, Vejdirektoratet, Laboratoriet for Bygningsmaterialer (DTH), Dansk Teknologisk Institut og Statens Byggeforskningsinstitut.

Til projektet er nedsat en styregruppe bestående af følgende medlemmer:

Civilingeniør Gunnar P. Rosendahl, ATV (formand)
Civilingeniør Poul Nerenst, tidligere Alkaliudvalget
Afdelingsingeniør Peter Kristensen, DSB
Civilingeniør Preben Avnstrøm, tidligere DSB
Overingeniør Per Clausen, Vejdirektoratet
Docent Anders Nielsen, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH
Centerleder S. Øivind Olesen, Dansk Teknologisk Institut
Direktør Hans Jørgen Larsen, Statens Byggeforskningsinstitut

samt følgende tilforordnede:

Sektionsleder Chr. Munch-Petersen, Dansk Teknologisk Institut
Civilingeniør Morten H. Hansen, Dansk Teknologisk Institut
Civilingeniør, Ph.D. Erik Stoklund Larsen, Statens Byggeforskningsinstitut.

Der rettes en tak til Bygge- og Boligstyrelsen, Knud Højgaards Fond og Betonelementforeningen for økonomisk støtte til projektet.

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

Afdelingen for Materialer og Konstruktioner, juni 1992

Georg Christensen, forskningschef

Resumé og konklusion

Forprojektet er optakten til et omfattende hovedprojekt, der skal give en bedre viden og information til beslutningstagere om betonkonstruktioners levetid.

Hovedprojektets formål er fastlæggelse af funktionen for betonkonstruktioners egenskabsudvikling. Det vil sige, hvorledes egenskaberne ændres med tiden som følge af miljøpåvirkningerne, og hvorledes dette afhænger af betonens initialkvalitet.

Ligeledes er det formålet at fastlægge relevante og operationelle kritiske egenskabsniveauer, hvor konstruktionen ikke længere opfylder sin funktion, svarende til at levetiden er opbrugt.

Hovedprojektets sigte er desuden at vurdere om basisbetonbeskrivelsens krav fra 1986 er relevante for opnåelse af holdbare konstruktioner.

Formål

Ved gennemførelsen af nærværende forprojekt er det søgt sikret, at hovedprojektet er godt planlagt, inden det startes, og at hovedprojektet ikke igangsættes uden stor sikkerhed for resultat.

Et vigtigt delformål er at indsamle og oprette en oversigt over litteratur og teorier, der beskriver forskellige betonegenskabers udvikling.

Konstruktioner

Mange forskellige betonkonstruktioner er blevet stillet til rådighed af Vejdirektoratet og DSB. Der er udvalgt 32 konstruktioner der kan indgå i et større projekt. En konstruktion er medtaget når et eller flere af følgende forhold er opfyldt:

- At der foreligger beskrivelse af konstruktionens udførelsesfase, herunder initialdata for anvendte materialer.
- At konstruktionen er blevet orienterende undersøgt og/eller detailundersøgt af Alkaliudvalget i halvtredserne.
- At der på konstruktionen har været gennemført generaleftersyn og/eller særeftersyn.

Ved vedligeholdelse og drift af betonkonstruktioner udføres ca. hvert femte år et såkaldt generaleftersyn. Dvs. at man på makroniveau visuelt beskriver konstruktionens synlige skader. Når konstruktionen er i sådan forfatning at vedligeholdelse skønnes nødvendig, kan man udføre et såkaldt særeftersyn. Særeftersynet beskriver på mikroniveau konstruktionens skader og forløbet af skaderne. Derfor er det vigtigt at have et detaljeret kendskab til skadesmekanismerne og deres forløb.

Skadesmekanismer

I projektet er det valgt at fokusere på tre vigtige skadesmekanismer, nemlig:

- Alkalikiselreaktioner
- Frost-tø påvirkninger
- Armeringskorrosion

Konklusion

Gennemgangen af skadesmekanismerne og de influerende faktorer er baseret på et ganske kortfattet studie af den litteratur og den teori der beskriver skadesmekanismerne. I litteraturlisten er referencerne opdelt efter bestandigheden af beton - generelt, alkalikiselreaktioner, frost-tø påvirkninger og armeringskorrosion.

Ved gennemgang af resultaterne fra materialeprøvningen, general- eftersyn og særeftersyn er der givet eksempler på levetidskurver for forskellige udvalgte konstruktionstyper.

Resultaterne fra gennemgangen af general- og særeftersynene viser skadesmekanismerne synergistiske effekt. Alkalikiselreaktionernes voldsomme indflydelse på nedbrydningen er eftervist.

Et skøn over levetiden for en betonkonstruktion før den første reparation er ca. 30-40 år når nedbrydningen er under indflydelse af alkalikiselreaktioner, modsat ca. 60-80 år når alkalikiselreaktioner ikke er konstateret.

Resultaterne antyder ligeledes at mere dristige udformninger af konstruktionen medfører en større spredning på levetiden. Ved reparation af en skadet konstruktion er det muligt at løfte kvalitetsniveauet ganske meget, men efterfølgende er spredningen på levetidskurven stor.

Endelig er det også vist ud fra generaleftersynene at det er muligt at bestemme skadesgradudviklingen også på konstruktionsdelniveau.

Der gives et eksempel på anvendelsen af det for kloridindtrængning udviklede formelværktøj, hvorved det er muligt at bestemme initieringstider for armeringskorrosion.

Forprojektet har vist, at det er muligt at anvende eksisterende arkivmateriale, kombineret med supplerende undersøgelser, til bestemmelse af betonkonstruktioners levetid. Et hovedprojekt kan derfor igangsættes med stor sikkerhed for resultat.

Resultaterne fra nærværende projekt har da også medvirket ved udformningen og planlægningen af hovedprojektbeskrivelsen: "*Betonkonstruktioners levetid - et værktøj til fastlæggelse af initialkvalitet, eftersynsmetode og reparationsstrategi*", Byggeteknisk Institut, DTI, maj 1992, samt delprojektet: "*Egenskabsudviklinger*", Byggeteknisk Institut, DTI, juni 1992.

Summary

SBI Report 225: Service life of concrete structures - a pilot study

Estimation of the long term performance (durability) of concrete structures and repair actions on such structures is turning increasingly more common.

The report is the result of a pilot study and at the same time the beginning of a more comprehensive study which should give a better background for making such estimations.

It is shown how existing files describing structures built years ago can be utilized to describe the development of the properties of concrete in structures.

Further is shown examples on the continued effects of the different degradation factors. The factors considered are alkali-silica reactions, freeze-thaw exposure and corrosion of reinforcement.

Indledning

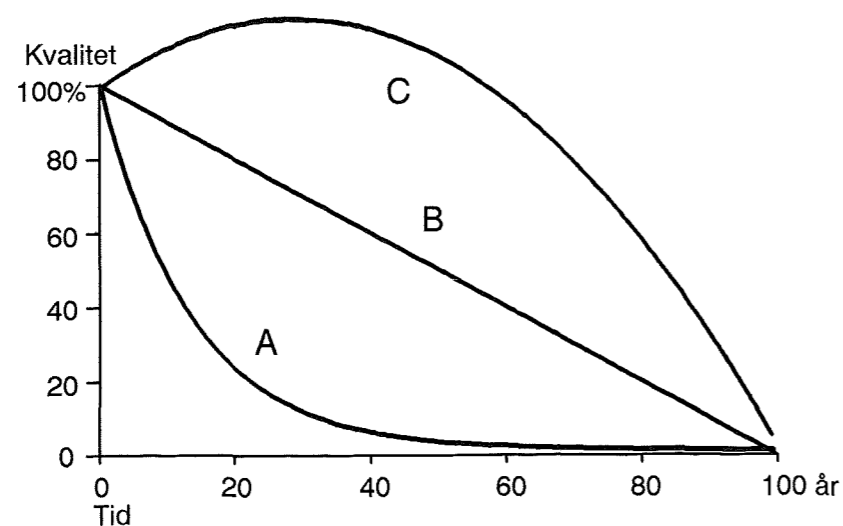
Levetidsproblemet i byggeriet er omfattende. Materialevalg, konstruktionsudformning, arbejdsudførelse er, ligesom drift og vedligeholdelse, eksempler på faktorer der har indflydelse på levetiden. Her indgår behovet for at udvikle metoder til udvælgelse og prøvning af materialers og konstruktioners levetid, samt muligheder for at foretage rigtige klima- og miljøbeskrivelser.

Ved levetid forstås et materiales, en konstruktions eller et systems evne til i et bestemt miljø at fungere som tilsigtet i et givet tidsrum.

Ser man på en egenskabs udvikling med tiden, kan forløbet være som skitseret i figur 1. Forringelsen af egenskaben kan forløbe efter forskellige kurver, og man har i dette tilfælde forudsat en levetid på 100 år. Ved en 100 % reduktion af kvaliteten forstås det tidspunkt hvor en reparation er nødvendig.

Kurve B beskriver nedbrydningen som proportionalt med tiden (eksempelvis som ved slid). Kurve A viser et accelereret forløb til et bestemt niveau hvorefter nedbrydningen sker forholdsvis langsomt. Kurve C viser til at begynde med et bremset forløb, hvorefter det går forholdsvis stærkt med nedbrydningen.

Alle tre forløb har vist sig forekommende i praksis for de cement-baserede kompositmaterialer.



Figur 1. Levetid for konstruktioner med forskellig nedbrydningsforløb.

Kvalitetsniveauet der er bestemmende for at levetiden er opnået, er normalt bestemt ved to forskellige betragtninger, henholdsvis en teknisk og en økonomisk.

Den tekniske levetid er den tid hvor konstruktionen og/eller konstruktionsdelen opfylder sin tekniske funktion.

Økonomisk levetid

Accelererede prøvninger

Langtidsforsøg

Den økonomiske levetid er den tid der går fra opførelsen af en konstruktion(-sdel) eller renoveringen af en konstruktion(-sdel) indtil den udskiftes eller renoveres.

Inden for fastlæggelse af niveauet for den tekniske og den økonomiske levetid kan der være store variationer, ligesom der i det faktiske forløb af konstruktionens levetid vil være store variationer, afhængig af konstruktionsudformningen, materialevalget og miljøpåvirkningerne. Kurveforløbene i figur 1 bør derfor opfattes som bånd med varierende bredde og at variationen formodentligt vokser med tiden.

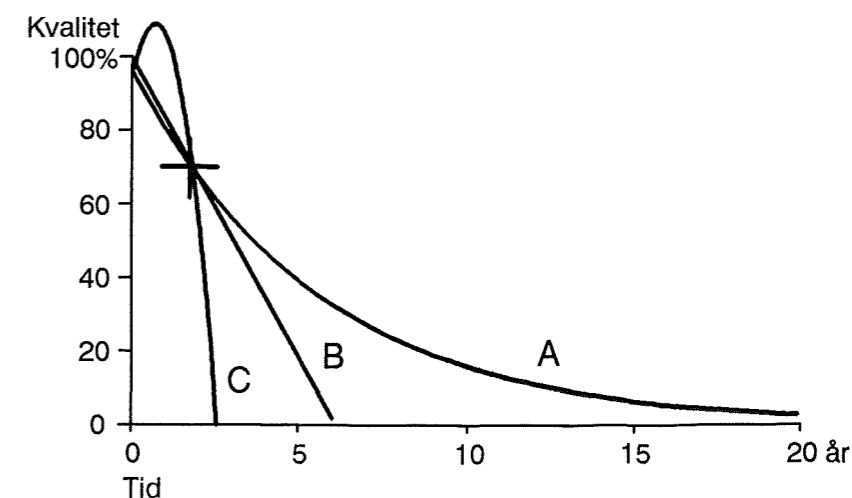
I årtier har man forsøgt at udvikle accelererede prøvningsmetoder, dog uden større held (jf. Larsen, 1992), til at forudsige levetiden af beton. Endnu sværere bliver det når man vil forudsige levetiden af en betonkonstruktion.

Et meget stort problem ved accelererede prøvningsmetoder er, at man mangler data som en form for "facitliste" for prøvningen. Ofte kender man meget lidt til accelerationsfaktorerne for de accelererede prøvninger.

Langtidsforsøg er en metode der har vundet stor udbredelse, dvs. forsøg hvor man måler ganske fintfølede på egenskabsudviklingen over en årrække. De meget små ændringer i egenskaberne kan således ekstrapoleres ud til den forventede levetid.

Igen er problemet at man ikke har tilstrækkeligt kendskab til udviklingen for lignende materialer.

Resultatet af en sådan prøvning kan eksemplificeres ved figur 2. Her ses efter 2 års levetid en reduktion af den målte egenskab til ca. 70 %. Indlægges i figur 2 gennem punktet (2 år, 70 %) tre kurver af form som A, B og C i figur 1, vil skønnet over den samlede levetid variere mellem 2½ og 20 år. Dvs., at kun når man kender nedbrydningskurvens form, er der mulighed for med rimelig sikkerhed at forudsige levetiden ved ekstrapolering.



Figur 2. Levetidens afhængighed af nedbrydningskurvens form ved ekstrapolering.

Formål

Nærværende forprojekt er optakten til et omfattende hovedprojekt, der skal give en bedre viden og information til beslutningstagere om betonkonstruktioners levetid.

Hovedprojektets formål er fastlæggelse af funktionen for betonkonstruktioners egenskabsudvikling. Det vil sige, hvorledes egenskaberne ændres med tiden som følge af miljøpåvirkningerne, og hvorledes dette afhænger af betonens initialkvalitet.

Ligeledes er det formålet at fastlægge relevante og operationelle kritiske egenskabsniveauer, hvor konstruktionerne ikke længere opfylder sin funktion, svarende til at levetiden er opbrugt.

Hovedprojektets sigte er desuden at vurdere om Basisbetonbeskrivelsens krav fra 1986 er relevante for opnåelse af holdbare betonkonstruktioner.

Projektet vil beskæftige sig med tre nedbrydningsmekanismer:

- Alkalikiselreaktioner
- Frost-tø påvirkninger
- Armeringkorrosion.

I hovedprojektet skal teori sammenlignes med praksis ved at sammenholde betonkonstruktioners målte egenskabsudvikling med teorier for egenskabsudviklingen, som har udgangspunkt i de fysiske og kemiske lovregler.

Det skal ved gennemførelsen af forprojektet sikres, at hovedprojektet er godt planlagt, inden det startes, og at hovedprojektet ikke igangsættes uden stor sikkerhed for et resultat.

Et vigtigt delformål er desuden at indsamle og oprette en oversigt over litteratur og teorier, der beskriver de forskellige betonegenskabers udvikling.

Ligeledes er det formålet med forprojektet at gennemgå eksisterende arkiver med henblik på at udvælge relevante betonkonstruktioner, der kan indgå i hovedprojektet.

Ved gennemgang af arkiver hos Vejdirektoratet, DSB og SBI vil der blive fokuseret på konstruktioner, hvor der foreligger forhåndsviden fra:

- Projektfasen
- Udførelsesfasen
- Eftersyn og analyser.

Således indgår en konstruktion i hovedprojektet kun hvis den er forsynet med initialdata og/eller er detaljeret beskrevet gennem konstruktionens levetid.

På baggrund af de eksisterende data, der således repræsenterer flere punkter på levetidskurven, skal det vurderes, om det er muligt at nå et resultat ved gennemførelse af et større og mere detaljeret projekt.

Et delformål er at indsamle og oprette en oversigt over litteratur og teorier, der beskriver de forskellige betonegenskabers udvikling, herunder hvordan skadesmekanismerne virker og hvilke faktorer der influerer.

Baggrund for betonkonstruktioners levetid i Danmark

Alkalikiselreaktioner som skadesmekanisme blev først erkendt af T. Stanton i Californien, USA, omkring 1940. Da Poul Nerenst i 1951 var på studierejse i USA besøgte han T. Stanton og blev opmærksom på proble-

Alkaliudvalget

merne. Tilbage i Danmark iværksatte Nerenst og Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) undersøgelser af skadet beton der førte til erkendelsen af, at alkalireaktioner var en medvirkende årsag til skader af danske betonkonstruktioner.

I 1954 nedsatte SBI og Akademiet for de Tekniske Videnskaber (ATV) et udvalg til undersøgelse af alkalireaktioner i beton (Alkaliudvalget).

Udvalget bestod bl.a. af et grusudvalg, et laboratorieudvalg og et markudvalg.

Grusudvalget havde til formål at undersøge danske grusmaterialer, samt at udrede omfanget af reaktivt materiale i de ressourcer der fandtes i Danmark.

Laboratorieudvalget havde til formål ved laboratorieforsøg at belyse skadesmekanismerne med de af grusudvalget indsamlede grusmaterialer.

Markudvalget havde til formål at undersøge bestående betonkonstruktioners tilstand dels ved besigtigelser, målinger, etc., dels i laboratoriet ved petrografiske undersøgelser af udborede betonprøver. Markudvalget gennemførte i de følgende år orienterende undersøgelser af ca. 400 betonkonstruktioner og detaljerede undersøgelser af ca. 20 betonkonstruktioner.

Der blev oprettet et fælles sekretariat, som havde til huse på SBI og koordinerede de omfattende forsøgsserier i laboratoriet og undersøgelser i marken af beskadigede betonkonstruktioner.

Efter udvalgets dannelse blev der iværksat en orienterende undersøgelse af godt 400 udendørs betonkonstruktioner i Jylland, på Fyn og på Sjælland. Ved disse orienterende undersøgelser blev betonens tilstand efter en besigtigelse af konstruktionerne summarisk karakteriseret ved talværdierne 0 - 5, idet 0 betegnede en uskadt betonkonstruktion, 5 alvorlig forvitring af hele konstruktionen, og 1 - 4 en graduering mellem disse yderværdier. Endvidere blev forvitringssymptomer, dvs. revnedannelser, springere og sekundære udfældninger af alkalikiselgel m.v. registreret, og konstruktionens data i øvrigt noteret. Endelig blev der foretaget en omfattende fotografisk registrering.

I sommeren 1955 blev der på grundlag af oplysningerne fra den orienterende undersøgelse gennemført detaljerede undersøgelser af ca. 20 betonkonstruktioner. I alt blev der udtaget ca. 200 borekerner samt et stort antal andre prøver. Ved tyndslibsfremstilling efter imprægneringsteknik med araldit opnåede man en fiksering af materialet, og kunne ved petrografiske undersøgelser beskrive nedbrydningerne af betonens struktur.

Alkaliudvalgets arbejde er offentliggjort i 21 Progress Reports. Disse rapporter redegør hver for sig detaljeret for en enkelt arbejdsfase og er holdt på et teoretisk plan. Alkaliudvalgets vejledning 1: "Foreløbig vejledning i forebyggelse af skadelige alkalireaktioner i beton", 1961, sammenfatter de i praksis anvendelige resultater og markerer afslutningen af udvalgets arbejde.

På baggrund af Alkaliudvalgets arbejde indførte afdelingsingeniør Arne Jeppesen, DSB, praksis for at anvende lav-alkal cement, samt anvende granitkærver og kvartssand ved opførelsen af nye betonkonstruktioner.

I 1967 forsvarede G. M. Idorn doktorafhandlingen: "Durability of Concrete Structures in Denmark", der er en sammenfattende beskrivelse og vurdering af betonkonstruktioners holdbarhed i Danmark, og af forvitringfænomener observeret i beton fra sådanne konstruktioner. Den

væsentligste del af Idorns observationsmateriale stammer fra hans arbejde i Alkaliudvalget 1952-1956.

I samarbejde med Vejdirektoratet har Byggeteknisk Institut, DTI, udført et pilotprojekt vedrørende betonkonstruktioner med forhåndsviden.

I pilotprojektet er udvalgt 5 af Vejdirektoratets broer fra perioden omkring 1980, idet Vejdirektoratet og DSB fra 1979 stillede krav om begrænsning af tilslaget alkalikiselreaktivitet, samt krævede data herom målt i forbindelse med opførelsen af konstruktionen.

DTI konkluderer i rapporten "AKR i broer 1978-81 (foreløbig)" bl.a. følgende:

"De af VD i 1979-82 stillede krav til tilslaget efter den tyske metode sikrer ikke mod skadelige alkalikiselreaktioner. Broernes fremtidige skadesudvikling bør følges. Skadesmængden bliver dog formentlig begrænset, idet tyndslibs-analyserne efterviser mindre end 3,8 vol % reaktive materialer, og restekspansion viser maksimalt 1 ‰ ekspansion. Heller ikke den petrografiske analyse synes at give en sikring mod AKR.

Med baggrund i de nedenfor opstillede succesrater for hhv. den tyske metode og TI-B 52 metoden, bør der anbefales dels undersøgelse af et større antal broer dels på baggrund af heraf en vurdering af relevansen af prøvningsmetoderne og de tilhørende kravformuleringer."

Brotyper

Konstruktioner

En lang række af forskellige betonkonstruktioner er blevet gennemgået i nærværende projekt. Af det store udvalg der blev stillet til rådighed fra DSB og Vejdirektoratet er der valgt 32 betonkonstruktioner.

Kriterierne for udvælgelse har bl.a. været:

- At der foreligger rimelige beskrivelser af konstruktionens udførelsesfase, herunder initialdata for anvendte materialer.
- At betonkonstruktionen er blevet orienterende undersøgt og/eller detailundersøgt af Alkaliudvalget i halvtredserne.
- At der på konstruktionerne har været gennemført generaleftersyn og/eller særeftersyn.

Ældre betonkonstruktioner

Ved ældre betonkonstruktioner menes konstruktioner der indgik i Alkaliudvalgets undersøgelser, dvs. konstruktioner hvor der eksisterer initialdata og/eller at disse konstruktioner har fået udført et eller flere generaleftersyn samt evt. særeftersyn i deres levetid. Nogle af de udvalgte konstruktioner er blevet repareret i den forløbne tid.

De valgte konstruktioner er alle broer og kan groft opdeles i fire forskellige typer:

- i): Uarmeret hvælving af grovbeton (type Hg)
- ii): Hvælving af armeret beton (type Ha)
- iii): Pladebro med indstøbte jerndragere (type D)
- iv): Kontinuerligt pladebro af armeret beton (type Pa)

Endelig er medtaget eksempler på armeret ramme (type Ra) og pladeribbebroer (type Ba).

Ad i) og ii). Der ikke geometrisk nogen forskel på de to typer af buebroer der begge står i trykpåvirket tilstand (figur 3). Typisk er grovbetonbroerne vejunderføringer med mindre spænd, hvorimod betonbuebroerne er vejoverføringer med større spænd, og kan godt være buer over flere fag.

Ad iii). Type D er en ældre konstruktionstype og er typisk anvendt ved vejunderføringer (figur 4).

Ad iv). Type Pa er en konstruktionstype der blev bygget en del af i trediverne og er typisk anvendt ved vejoverføringer (figur 5).

Yngre betonkonstruktioner

Ved yngre betonkonstruktioner menes konstruktioner der er opført i perioden 1979-1981 efter at der kom krav til tilslaget med hensyn til alkalireaktivitet.

For de fem udvalgte betonkonstruktioner, der alle er broer, foreligger der oplysninger om sandets indhold af alkalireaktivt materiale.

Tabel 1. Udvalgte betonkonstruktioner.

Nr.	Beliggenhed	Strækning	km	DSB/VD nr.	Over/under	Type	Byggeår
6.2	Dværgetved-Tolne	Hjørring-Frederikshavn	320,767	DSB 21476	Vejunderføring	Hg	1917
41.2		Hobro-Ålborg	225,755	DSB 21133	Vejunderføring	Hg	1920
125.6		Fredericia-Vejle	9,012	DSB 20514	Vejunderføring	Hg	1920
79.1		Århus-Randers	133,532	DSB 20938	Vejunderføring	Hg	1937
6.1	Tolne	Hjørring-Frederikshavn	317,634	DSB 21472	Vejoverføring	Ha	1918
98.3		Skanderborg-Silkeborg	4,508	DSB 25520	Vejoverføring	Ha	1920
68.4		Århus-Randers	151,543	DSB 20968	Vejoverføring	Ha	1921
98.4	Stillinggade	Skanderborg-Århus	90,815	DSB 20808	Vejoverføring	Ha	1922
115.2		Vejle-Brande	89,641	DSB 24248	Vejoverføring	Ha	1942
66.2	Skaber Mølleå	Langå-Viborg	34,152	DSB 25264	Vejunderføring	D	1910
131.7	Sneum å	Bramminge-Esbjerg	43,630	DSB 23612	Åunderføring	D	1912
89.8		Viby-Terp	104,529	DSB 20840	Vejunderføring	D	1916
98.1		Skanderborg-Silkeborg	10,646	DSB 24532	Vejunderføring	D	1916
98.14		Horsens-Skanderborg	73,263	DSB 20754	Vejunderføring	D	1922
89.7		Skanderborg-Århus	104,996	DSB 20844	Vejunderføring	D	1938
68.1		Århus-Randers	165,624	DSB 20992	Vejoverføring	Pa	1934
68.2		Århus-Randers	164,444	DSB 20988	Vejoverføring	Pa	1934
68.3		Århus-Randers	161,593	DSB 20981	Vejoverføring	Pa	1936
78.3		Århus-Randers	139,709	DSB 20948	Vejoverføring	Pa	1937
78.4		Silkeborg-Lauerbjerg	31,526	DSB 25172	Vejoverføring	Pa	1938
78.1		Århus-Randers	147,652	DSB 20962	Vejoverføring	Pa	1939
54.4	Humlum	Struer-Thisted	8,018	DSB 24132	Vejoverføring	Pa	1940
146.64	Ringe (A9)	Odense-Svendborg	21,619	DSB 21564	Vejunderføring	Pa	1963
16.90	Vestergade	Ålborg-Brønderslev	274,812	DSB 21290	Vejunderføring	Pa	1963
79.3		Århus-Randers	135,018	DSB 20944	Vejunderføring	Ra	1937
200.13	Brøndbyøster st.	Rødovre-Brøndbyøster	8,602	DSB 15120	Gangtunnel	Ra	1952
79.2		Århus-Randers	133,653	DSB 20940	Åunderføring	Ba	1937
226.62	Kalvehavevej	Køge-Rødbyhavn	96,825	VD 30-0062	Vejoverføring		1979
207.83	Gl. Køge landevej	Jægersborg-Kastrup	55,420	VD 3-0083	Vejoverføring		1979
237.80	Nykøbingvej	Køge-Rødbyhavn	116,218	VD 30-0080	Vejoverføring		1981
237.82	Lundbyvej	Køge-Rødbyhavn	117,107	VD 30-0082	Vejoverføring		1981
207.87	Avedøre Havnevej	Jægersborg-Kastrup	57,442	VD 3-0087	Vejoverføring		1981

Eksisterende data for konstruktionerne

Ved drift og vedligeholdelse af betonkonstruktioner anvendes almindeligvis følgende strategi.

Ca. hvert femte år udføres et såkaldt generaleftersyn, der visuelt beskriver betonkonstruktionens synlige skader. Man arbejder her på makroniveau.

Når konstruktionen er i sådan en tilstand, at der ved generaleftersynet skønnes en eller anden form for vedligeholdelse, går man ind og studerer konstruktionen på mikroniveau. Der udføres et såkaldt særeftersyn, der mere eller mindre detaljeret beskriver skadesomfang og årsag for dele og/eller hele konstruktionen.

Specielt ved særeftersynet er det vigtigt at kende skadesmekanismerne og konstruktionens initialdata så detaljeret som muligt.

Fra arkiver hos Vejdirektoratet, DSB og SBI er der gennemgået en stor mængde data.

Følgende data eksisterer typisk for de ældre betonkonstruktioner:

- Statistiske beregninger
- Materialedata:
 - Forprøvning af cement og tilslagsmaterialer
 - Udførelseskontrol fra støbningen af konstruktionen
- Tegninger, herunder blandingsforhold, armering, m.m.
- 1 eller flere generaleftersyn
- (Særeftersyn forekommer i sjældne tilfælde).

For de yngre betonkonstruktioner eksisterer et overvældende materiale fra opførelsen af konstruktionerne. Her skal kort nævnes følgende der vedrører betonentreprisen:

- Statistiske beregninger
- Materialedata:
 - Forprøvning af cement og tilslagsmaterialer
 - Betonproportionering
 - Resultater fra prøvestøbning
 - Støbeprogrammer
 - Udførelseskontrol fra støbningen af konstruktionen
- Tegninger
- (Generaleftersyn).

Initialdata

Ved initialdata forstås den information der foreligger fra konstruktionens udførelse, her tænkes bl.a. på betonens sammensætning, materialeprøvningen, arbejdsudførelsen, samt opnåede betonegenskaber (eksempelvis 28 døgns trykstyrkerne).

I tabel 2 og 3 er angivet, for konstruktionerne, hvilke data der er fundet ved gennemgang af arkivalierne hos DSB, Vejdirektoratet og SBI.

28 døgns trykstyrkerne, der er opgivet, er resultater fra terningstrykstyrker udtaget ved støbningen af konstruktionen og opbevaret på

byggepladsen. Trykstyrkerne er omregnet til ekvivalent cylindertrykstyrke (15 cm x 30 cm). Trykstyrkerne er angivet som middelværdier med standardafvigelse i parentes. Af tabellerne fremgår ligeledes om der eksisterer viden om cement (C), sand (Sa) og sten (St) samt hvor mange generaleftersyn (GE) og særefeftersyn (SE) der er gennemført.

Tab. 2. Eksisterende data for betonkonstruktionerne.

Nr.	Konstruktionsdel	v/c	Blandingsforhold	Sætmål (cm)	28 døgns eqv. trykstyrke (MPa)	Viden om			GE	SE
						C	Sa	St		
6.2									3	
41.2									3	
125.6						Ja			2	
79.1	Hvælving	0,63	1:3:5	6,5	33,3 (4,0)	Ja	Ja	Ja	3	
	Fløjmur	0,56	1:2:3	14	42,3 (3,4)					
	Fundament	0,67	1:4:7	2						
6.1									4	
98.3	Bue		1:2½:3½						3	
68.4	Bue		1:2½:3½						3	
98.4						Ja			5	1
115.2			1:2:3						2	
66.2									5	
131.7						Ja			3	
89.9									3	
98.1			1:2:3						3	
98.14						Ja	Ja	Ja	3	
89.7	Brodæk mm	0,53	1:2:3	12-19	31,0 (2,1)	Ja	Ja	Ja	3	
	Pæle	0,56	1:2:3	13	39,7 (5,5)					
68.1	Dæk, søjler	0,67	1:2:3	15	46,2 (4,4)		Ja		3	
	Fundament	0,67	1:3:5	10	26,4 (2,9)					
68.2	Dæk	0,67	1:2:3	15	37,9 (1,8)		Ja		3	
	Landpiller	0,67	1:4:7	10	27,3 (0,7)					
	Fundament	0,67	1:3:5	10	26,4 (2,9)					
68.3	Brodæk	0,53	1:2:3	11-12,5	30,9 (1,1)	Ja	Ja	Ja	3	
78.3	Dæk, piller, fundament	0,56	1:2:3	13-16	42,0 (3,4)	Ja			3	
78.4	Brodæk	0,52	1:2:3	11	27,5 (2,2)	Ja	Ja	Ja	3	
	Kørebanebeton	0,40	1:2:3	0	33,8 (1,9)					
	Fløje	0,52	1:2:3	10	23,9 (0,8)					
	Mellempille	0,65	1:3:5	7	14,8 (0,1)					
	Fundament, endepiller	0,8	1:4:7	3-6	9,9 (2,3)					
78.1	Brodæk	0,59	1:2:3	17	29,2 (1,4)	Ja	Ja	Ja	3	
	Nord og syd piller	0,56	1:2:3	16	35,5 (2,5)					
54.4	Dæk	0,5	1:2:3	16	32,5 (1,8)	Ja	Ja	Ja	3	
	Mellemdrager	0,5	1:2:3	16	27,3 (2,7)					
146.64	Alle	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		1
16.90										

Tab. 3. Eksisterende data for betonkonstruktionerne.

Nr.	Konstruktionsdel	v/c	Blandingsforhold	Sætmål (cm)	28 døgns eqv. trykstyrke (MPa)	Viden om			GE	SE
						C	Sa	St		
79.3	Dæk, sidemure	0,56	1:2:3	15-17	29,1 (1,7)				3	
200.13	Vægge, dæk, fløjmur	0,54	1:2:3	8-10	32,5 (2,6)				2	
	Bund	0,59	1:2½:4	8-10	29,1 (1,7)					
79.2	Brodæk	0,56	1:2:3	15	48,2 (1,9)				3	
226.62	Alle	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		
207.83	Alle	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		
237.80	Alle	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		
237.82	Alle	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		
207.87	Alle	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		

Eksempler på materialeprøvning

Efterfølgende vises eksempler hentet fra DSB's arkiv på undersøgelse af cement, sand og sten samt prøvning af beton. Alle eksemplerne er fra konstruktion nr. 89.7 opført 1938.

STATSPRØVEANSTALTEN

Postadresse: Amager Boulevard Nr. 108.
Telegramadresse: Prøveanstalten.
Telefonnumre: 5338 og 11638.

København S.

d. 10/8 1937.
Løbe Nr. C. 7957.

Resultat af en Undersøgelse

af en Prøve Cement,

indsendt d. 10/7 1937 af De danske Statsbaner, 6' Drøyle-område, Nørhüs.

Prøven var mærket: "I" og angives at vedrøre 15 m Underføring Hæselager-Nørhüs, km 106,467 samt at være udtaget d. 7/7 1937.

Størkningstid (Afbindingstid) i Normalkonsistens (o: udrørt med 25 pCt. Vand) ved en Varmegrad af 18 °C: 4 1/2 Timer — Minutter. Størkningen begynde efter 1 3/4 Timer — Minutter.

Malingens Finhed. Sigterest paa Sigten med 900 Masker pr. cm²: 0,05 pCt., med 4900 Masker pr. cm²: 2,0 pCt.

Formbestandighed. Udfaldet af 28 Døgn Koldtvandsprøven *bestaaet*.
Udfaldet af Le Chateliers Prøve angivet (som Middeltal af to Forsøg) ved Forøgelsen af Afstanden mellem Naalene: 0,5 mm.

Styrke mod Træk og Tryk.

Trækprøvelegemerne var 8-talformede med et Mindstetværsnitsareal paa 5 cm².

Trykprøvelegemerne var Tærninger med 50 cm² Sideflade.

Prøvelegemerne fremstilledes af en Mørtel i Blandingsforholdet 1:3 efter Vægt under Anvendelse af lysk Normalsand. Mørtelens Vandmængde var 8 pCt. angivet i Vægtprocent af de tørre Mørtelbestanddele. Til Mørtelens Blanding benyttedes Steinbrück-Schmelzers Blandemaskine og til Prøvelegemernes Formning Böhmes Hammerapparat.

Prøvelegemernes Lagringsmaade:

- a) »Vandlagring«: 1 Døgn i fugtig Luft, Resten af Tiden i Vand.
- b) »Vand- og Luftlagring«: 1 Døgn i fugtig Luft, 6 Døgn i Vand, Resten af Tiden i Stueluft.

Tallene angiver Brudbelastningen i kg pr. cm².

a) Styrke mod Træk og Tryk ved »Vandlagring«.

b) Styrke mod Træk og Tryk ved »Vand- og Luftlagring«.

Efter 7 Døgn		Efter 28 Døgn		Efter Døgn		Efter Døgn	
Træk	Tryk	Træk	Tryk	Træk	Tryk	Træk	Tryk
35,2	508	40,8	626				
33,4	492	40,0	626				
32,8	486	39,2	616				
32,8	480	37,0	602				
32,6	478	36,0	588				
32,0	476	35,4	564				
Middeltal 33,1	487	38,1	604				

Efter Døgn		Efter Døgn	
Træk	Tryk	Træk	Tryk

Kemisk Analyse.

	pCt. i Cementen i Indleveringstilstand	pCt. i Cementen i tørret Tilstand
I Saltsyre uoploseligt		
Kiselsyre (SiO ₂) opløselig		
Jernilte (Fe ₂ O ₃)		
Lerjord (Al ₂ O ₃)		
Kalk (CaO)		
Magnesia (MgO)		
Svovlsyreanhydrid (SO ₃)		
Glødningstal		
Hygroskopisk Vand		

Det hydrauliske Modul, d. v. s. Vægtforholdet $\frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} =$

W. G. / J. B. Hvidberg

Undersøgelse af Sand til Betonstøbning.

No 152/604

Glasprøve G.

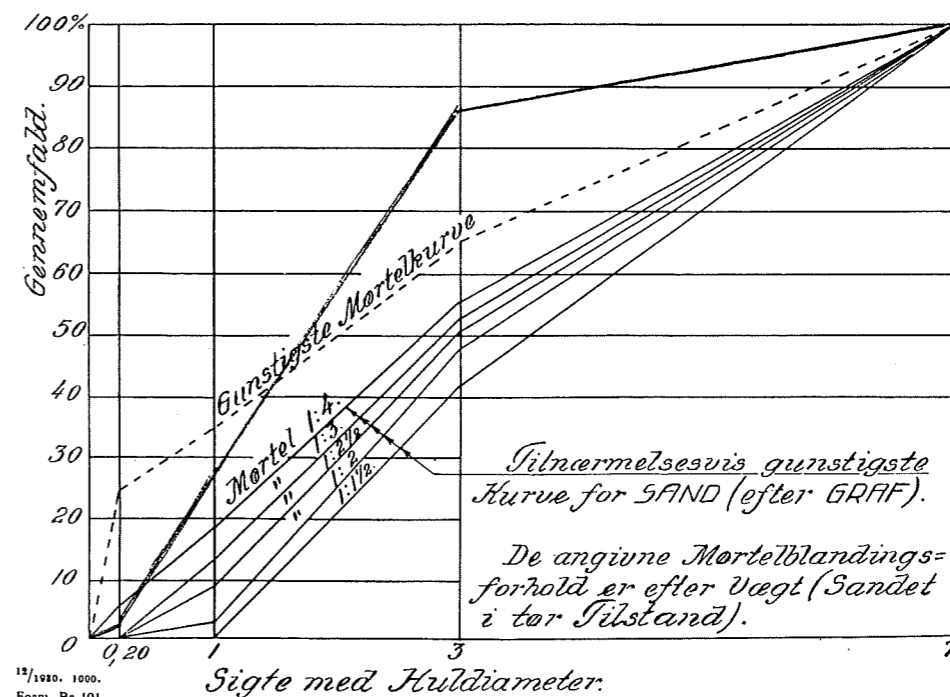
Bygværk: <i>15m W. Hvidberg - Aarhus, km 106,465</i>	Sandets Art: <i>Strøvsand</i>
Leverandør: <i>Aarhus Portlandcement</i>	Indvindingssted: <i>Aarhus Byggeværk</i>

Kornform: <i>isotelt</i>	Rumvægt: Naturfugtig ($\frac{41}{100}$ H ₂ O) $\frac{1,325}{kg/l}$
Kornoverflade: <i>ru</i>	(løst) Tørt $\frac{1,58}{kg/l}$
Kornmateriale: <i>granit og kvart</i>	Hulrumsprocent (løst Mat.): $\frac{34}{100}$
Farve: <i>graa</i>	Specifik Vægt:

Forurenet af:		
Ler?	Humus?	Andre Stoffer?
0 (.....%)	0	0

Undersøgelse af Kornstørrelsen.

Tørt Materiale (5000 g)	Samlet Rest paa Sigten med Huldiameter (mm)							A n m.
	0,20	1	3	7	12	25	40	
	4920	3580	625	50				Korn over 7 mm regnes fra (regnes som Sten) Stenprocent: $\frac{1}{100}$
Middel (g)								
Samlet Gennemfald i %	1,2	28,6	87,2	100,0	X	X	X	



Aarhus 17/7 07

J. Haas Jensen

Undersøgelse af Sten til
Betonstøbning

Nr. 152/604

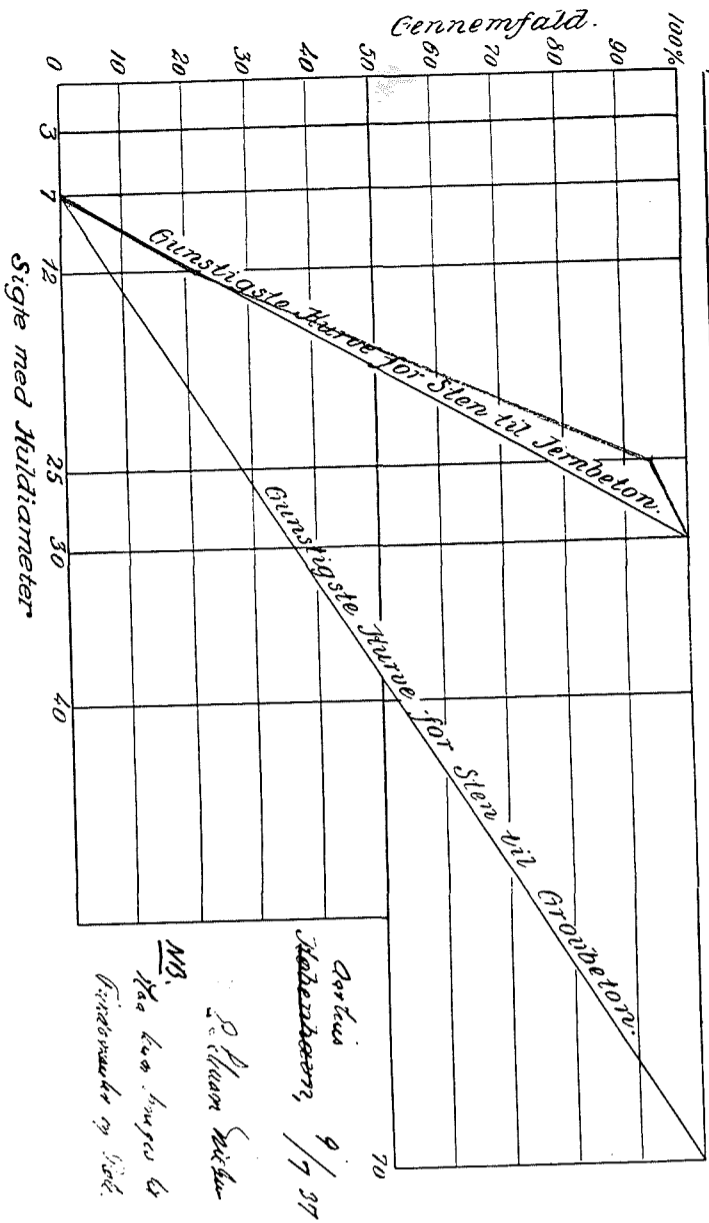
Bygværk: *15m Bj. Rindings - Arklar 100*
Leverandør: *2 1/2 Sk. Skovgaard*
Stenenes Art: *Baldersdal*
Indvindingssted: *Skovgaard*

Kornform: *svend*
Kornoverflade: *7%*
Kornmaterialer: *granit og Feld*
Farve: *grønt*
Rumvægt: *1,570 kg/l*
Hulrumsporcet: *33,5 %*
Specifik Vægt: *2,7*

Indhold af:
Andre Stoffer: *Rej.*
Kalk? *Ja* (*4,5 %* efter Vægt)

Undersøgelse af Kornstørrelsen.

Tørt Materiale (5000 g)	Samlet Rest paa Siglen med Huldiameter (mm)						Ann. Korn under 7 mm regnes fra (regnes som Sand) Sandprocent: <i>11 %</i>
	1	3	7	12	25	30	
			<i>4915</i>	<i>2880</i>	<i>225</i>	<i>0</i>	
Middel (g)			<i>55</i>	<i>122</i>	<i>172,5</i>	<i>0</i>	
Samlet Gennemfald i %	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>0</i>	<i>21,6</i>	<i>91</i>	<i>100</i>	



Prøvning af Beton
(Terning- og Bjælkeprøvninger).

Løbe-Nr.	Bjælke- (Bj.) eller Terning (T. 20 el. T. 30)	Konstruktionsdel	Blendingsforhold (efter Rf.)	Cement Prøve- attest Nr.	Sand Prøve- attest Nr.	Sten Prøve- attest Nr.	Sandets Vand-proc. efter Vægt	C/V efter Vægt	Konsistens			Dato for Støbningen	Lagring a) 15° C b) paa Byggeplads	Dato for Prøvning	Alder med Fradrag for den Tid hvor t ± 4° C Døgn	Opnaet Trykstyrke kg/cm²		Forlangt Trykstyrke efter 28 Dage kg/cm²	Cementens Normstyrke kg/cm²	Ventet Trykstyrke Beregnet af C/V	Anmærkning
									Sæt-maal cm	Ryste-maal d 10 cm	Ryste-maal d. 15 cm					Middeltal for samtidig støbte Legemer					
1																325					
2	T20	Pole	1:2:3	C 7957	15a/604	15k/604		1,8	13		19/9 37	b)	16/8 37	28		366	352 ✓	250	?		
3																365					
4		Fundament til		?	"	"		1,9	13		2/10 37	b)	1/10 37	28		395	411 ✓	"			
5	"	sydl. Rammebj.														435					
6																403					
7		Endepille i			25a/604	25k/604		1,9	12		25/10 37	b)	3/12 37	28		378	367 ✓	"			
8	"	sydl. Rammebj.														365					
9																359					
10		Dæk over sydl.														350					
11	"	Frakto						1,9	14		4/11 37	c)	20/10 37	14		410	373	"			
12																371					
13		Dæk over sydl.														429					
14	"	Frakto						1,9	14		4/10 37	b)	11/12 37	28		425	441 ✓	"			
15																433					
16		Fundament til														493					
17	"	sydl. Rammebj.						1,9	13		5/1 38	b)	12/12 38	28		522	519 ✓	"			
18																371					
19		Endepille i														468					
20	"	sydl. Rammebj.						1,9	18		27/1 38	b)	7/9 38	28		475	459 ✓	"			
21																435					
22		Dæk over nordl.														456					
23	"	Rammebj.						1,9	19		7/2 38	b)	1/3 38	14		489	461	"			
24																438					
25		Dæk over nordl.														498					
26	"	Rammebj.						1,9	19		7/2 38	b)	17/9 38	28		551	546 ✓	"			
27																570					
28		Dæk under Skov-														377					
29	"	spor i Hvidler-						1,9	17		17/5 38	b)	2/6 38	15		381	371	"			
30		bj.														354					
31		Dæk under Skov-														419					
32	"	spor i Hvidler-						1,9	17		17/5 38	b)	14/6 38	28		414	418 ✓	"			
33		bj.														422					
34		Dæk under Skov-														385					
35	"	spor i Hvidler-						1,9	17		13/6 38	b)	20/6 38	14		370	332	"			
36		bj.														341					
7		Dæk over nordl.														414					
8	Bj	Rammebj.						1,9	19		7/2 38	b)	17/9 38	28		367	390 ✓	200			
9																450					

Generaleftersyn

Jf. DSB Broforvaltning DANBRO - Manual for Generaleftersyn, 1990, og Vejdirektoratets Broforvaltning med DANBRO - Generaleftersyn, 1991.

Generaleftersyn foregår ved systematisk at gennemgå visuelt betonkonstruktioners synlige dele for skader.

- Generaleftersyn udføres ca. hvert femte år og er et redskab til at:
 - Udarbejde løbende 5-års prognoser over de samlede reparationsudgifter for alle betonkonstruktioner.
 - Udarbejde oversigter over konstruktionsmassens generelle tilstand bedømt ud fra tilstandskaraktererne. Oversigterne kan bruges til at vurdere, om bygværkernes skadestilstand ændres med tiden.
 - Udarbejde oversigter over vedligeholdelsestilstanden for hele eller dele af konstruktionsmassen. Oversigten kan anvendes som et hjælpemiddel til at vurdere de samlede driftsmidlers størrelse og en hensigtsmæssig fordeling.
 - Udskrive lister med konstruktioner, hvor der skal udføres særeftersyn og nye generaleftersyn.

Der kan opstilles følgende karakterskala for angivelse af en konstruktions generelle tilstand, tabel 4. Trinene på skalaen angiver hvor påtrængende det er at få gennemført en udbedring.

Skadeskarakter

Tabel 4. Skadesgradering.

Karakter	Vejdirektoratet	DSB (tommelfingerregler)
0	Helt ubetydelige skader	Ingen eller få skader. Restlevetiden svarer til et nykonstrueret elements.
1	Ingen udbedring	Kun mindre tegn på nedbrydning. Skader kan forekomme og udvikles over mange år.
2	Udbedring ved lejlighed	Elementet har i vid udstrækning mindre, ikke fuldt udviklede skader, eller større og alvorligere men begrænsede skader. Skaderne vil under alle omstændigheder kunne udvikle sig i nogle år endnu før elementets funktion ikke længere er opfyldt.
3	Udbedring snarest	Elementet er svært nedbrudt og dets funktion ophører snart hvis det ikke allerede er sket.
4	Udbedring straks	
5	Alarm	

Skalaen kan anvendes til at angive hovedindtrykket af en konstruktion som helhed, ligesom den kan bruges på de enkelte konstruktionsdele. Karaktererne 0-2 er udtryk for en acceptabel tilstand, hvorimod karaktererne 3-5 er udtryk for en uacceptabel tilstand og det er nødvendigt med reparation og/eller udskiftning af det skadede element eller af konstruktionen.

Skadeskonsekvenser

Anvendes skalaen på de enkelte konstruktionselementer kan skaderne have konsekvens for:

- Konstruktionsdelenes holdbarhed
- Omgivelserne, herunder trafiksikkerheden, de andre konstruktionsdeles eller konstruktionens sikkerhed eller funktion samt omgivelsernes miljøforhold.
- Konstruktionsdelenes funktion, herunder afløbssystemer, fuger, m.m.

Skadesudviklingen

Endelig skadeskarakter

- Konstruktionens udseende og æstetik.

Skadernes udvikling skal vurderes at forløbe efter tre principielle forløb (jf. figur 1) nemlig:

- A: Hurtig nedbrydning til et bestemt niveau, hvorefter skaderne forløber ganske langsomt (f.eks. påkørselsskader).
- B: Konstant nedbrydning i tidens løb (f.eks. slid fra trafik, is og vand).
- C: Accelererende nedbrydning i tidens løb (f.eks. frost-tø-skader på beton).

Karaktererne gives som vist i tabel 5, idet man ser på konstruktions-elementernes værste skader.

Tilstandskarakteren findes som summen af karaktererne fra skadeskarakter, funktionskarakter og konsekvenskarakter. Skalaen for tilstandskarakter bliver således fra 0 til 5.

Ved generaleftersyn udføres bedømmelsen af skadernes omfang og karakter på de overordnede konstruktionselementer og hele konstruktionen som det fremgår af tabel 6.

Tabel 5. Skadesgradvurdering.

		Vejdirektoratet	DSB
I	Skadernes art og omfang betragtes og karakteriseres små/få til store/mange med tallene	0 - 2	0 - 3
II	Den sandsynlige skadeudvikling vurderes og karakteriseres efter forløbene A, B, og C med tallene	0 - 2	0 - 1
	Der summeres	0 - 4	0 - 4
III	Summen korrigeres under hensyn til de øvrige konsekvenser, som er nævnt ovenfor, med tallene	-1 - +1	0 - 1
	Herved fås karaktererne	0 - 5	0 - 5

Tabel 6. Konstruktionsdele til bedømmelse.

Vejdirektoratet	DSB
Endeunderstøtninger	Understøtninger
Mellemunderstøtninger	
Fløje	Fløje
Lejer	Lejer og andre detaljer
Broplade	Bærende overbygning
Kantbjælker	
Autoværn, rækværker	Autoværn, rækværker
Brobelægning	Belægninger/banelegeme
Fugtisolerings	
Dilatationsfuger	Fuger
Skråninger	Skråninger
Andre konstruktionselementer	
Hele bygværket	Hovedindtryk

På næste side gives et eksempel på et resumé af et generaleftersyn hentet fra DSB's arkiv af konstruktion nr. 89.7.

DSB Baneafdelingen		EFTERSYN					B 2.1	
RESUMÉ		Bygværk Bro nr. 208 44			Eftersynsdato 1984.10.04			
Eftersynet foretaget af		HLS / Rambøll & Hannemann						
Vejret under eftersyn		Overskyet, 12 ^o						
TILSTANDSKARAKTERISTIK								
Del	Karakter					Bemærkninger		
	0	1	2	3	4		5	
Understøtninger		x						
Fløje		x						
Lejer og andre detaljer			x			Lysarmaturer		
Bærende overbygning			x					
Autoværn, rækværker		x		(x)		(x) Rækværk v/mundst.		
Belægninger / banelegeme		x						
Fuger								
Skråninger			x					
Hovedindtryk			x					
Øvrige bemærkninger Kritisk højde: 4,08 NØ Der er indbygget for mange skærver i overført ballastprofil.								

Særeftersyn

Jf. Vejdirektoratets Broforvaltning med DANBRO - Særeftersyn, 1991. eller DSB Projektjenesten, Byggeledelses- og Vedligeholdelsesteknik: Særeftersyn - Planlægning og gennemførelse, 1991.

Særeftersyn omfatter undersøgelser af skadesomfang og -årsag for et eller flere konstruktionselementer på en konstruktion, og udføres normalt på uregelmæssige tidspunkter.

Særeftersyn iværksættes normalt med baggrund i ét af følgende to forhold:

1. Bygværket eller dele deraf er indstillet til særeftersyn med baggrund i et generaleftersyn.
2. Bygværket eller dele deraf har været udsat for særlige påvirkninger som f.eks. påkørsler.

Formål med særeftersyn

I disse tilfælde bør de overordnede formål med særeftersyn være at:

- Vurdere aktuel funktions- og bæreevne og eventuelle svækkelser af disse.
- Vurdere risiko for eventuelle fremtidige svækkelser af funktions- og bæreevne.
- Vurdere levetid med de aktuelle skader og deres formodede udvikling.
- Vurdere eventuelt nødvendigt reparationsomfang.

Faser i et særeftersyn

Et særeftersyn består normalt af følgende faser:

0. Kravspecificering af eftersyn.
 1. Orienterende eftersyn med opstilling af hypotese for skadernes art og omfang samt deres betydning.
 2. Planlægning og program.
 3. Detailundersøgelser - eventuelt i 2 etaper ved komplekse konstruktioner - for at kunne vurdere tilstand, udvikling, levetid og nødvendig udbedring.
 4. Rapportering inkl. dispositionsforslag og reparationsstrategier.

Eksempel på særeftersyn

I det følgende gennemgås enkelte dele af et særeftersyn udført i 1990 for DSB på bro nr. 146.64 der er en underføring af hovedvej A9 ved Ringe.

Broen er en fire-fags pladebro, understøttet af tre store (Ø 1400 mm) massive søjler. Broen er opført 1963 og dens forløb er ca. nord-syd.

Der er ikke synlige tegn på nedbrydning af *brodækket*, dog har enkelte påkørsler resulteret i blotlægning af armeringen.

Den *nordlige søjle* har ingen synlige skader.

Den *miderste søjle* har begyndende revnedannelser af samme type som der er observeret på den sydlige søjle, blot med meget mindre revnevidder.

Den *sydlige søjle* har væsentlige skader nemlig:

- Grove lodrette revner fra ca. 1 m over fundamentsniveau til ca. 1,1 m under brodækket.
- En del fine revner af overvejende lodret karakter på den nederste halvdel af søjlen, der på den øverste halvdel af søjlen overgår til at blive af mere netagtig karakter.

Visuelle observationer

Tekniske undersøgelser

Følgende undersøgelser er udført ved særeftersynet:

- Mikro- og makroskopiske undersøgelser
- EKP-målinger

- Kloridmålinger
- Måling af karboniseringsdybder
- Fugtmålinger
- Dæklagsmålinger.

Konklusioner

På grundlag af de visuelle observationer og de tekniske undersøgelser kunne følgende konkluderes:

- De observerede skader på den sydlige søjle og midtersøjlen tyder på at alkalikiselreaktioner er den primære skadesårsag.
- Karbonatisering og kloridindtrængning langs eksisterende revner har givet anledning til opstart af armeringskorrosion i den sydlige søjle og risiko for samme i den midterste søjle.
- Betonen i den nordlige søjle samt brodækket vurderes at være af bedre kvalitet med få ubetydelige skader.
- Det anbefales at supplerende målinger udføres med hensyn til alkalikiselreaktionernes restaktivitet og fugtindhold, før reparationsvalg kan foreligge endeligt.

Supplerende vurderinger

Der er observeret alkalikiselreaktioner i den nordlige søjle dog uden synlige skadelige virkninger, dog er der indre revnedannelser i forbindelse med reaktive korn.

Nogle af de i søjlerne observerede revner ser ud til at stamme fra kernen af søjlerne, og forløb til hovedarmeringen og videre ud til overfladen af søjlen.

En del af de observerede revner vurderes til at være svind- eller termorevner.

Skadesmekanismer

Betonkonstruktioners levetid er afhængig af et utal af faktorer. Her kan kort nævnes betonproportioneringen, arbejdsudførelsen, efterbehandlingen, vejrliget, kemiske faktorer, slid, design, osv.

I nærværende projekt er det valgt at fokusere på tre meget vigtige skadesmekanismer, nemlig:

- Alkalikiselreaktioner
- Frost-tø påvirkninger
- Armeringskorrosion.

Hver især er de tre skadesmekanismer afhængig af forskellige faktorer. De forskellige influerende faktorer, der er erkendt ved et litteraturstudie, fremgår af tabel 7.

Gennemgangen af skadesmekanismerne er baseret på et ganske kortfattet litteraturstudie. Litteraturoversigten medtager de efter forfatterens mening vigtigste referencer der omhandler bestandighed af beton generelt, alkalikiselreaktioner i beton, frost-tø påvirkninger af beton og armeringskorrosion i beton.

Tabel 7. Faktorer, jf. litteraturen, der har indflydelse på forløbet af tre skadesmekanismer.

	Alkalikiselreaktion	Frost-tø påvirkninger	Armeringskorrosion
v/c forhold	Ja	Ja	Ja
Cementindhold	Ja	Ja	Ja
Cementtype (bl.a. alkaliindhold)	Ja		Ja
Luftindhold	Ja	Ja	
Revner og fejl (udførelse)	Ja	Ja	Ja
Indhold af reaktivt tilslag	Ja		
Kornstørrelsesfordeling af reaktivt tilslag	Ja		
Indhold af calciumhydroxyd	Ja		Ja
Konstruktionens karakteristiske dimension	Ja		
Dæklagstykkelse			Ja
Miljø (fugtindhold, temperatur, salte)	Ja	Ja	Ja
Skader	Ja	Ja	Ja

Alkalikiselreaktioner

Da det var erkendt at alkalireaktioner var en medvirkende årsag til skader på danske betonkonstruktioner nedsatte SBI og Akademiet for de Tekniske Videnskaber i 1954 et udvalg til undersøgelse af alkalireaktioner i beton (Alkaliudvalget). Udvalget bestod, som før nævnt, bl.a. af et grusudvalg, et laboratorieuvalg og et markudvalg.

Som arbejdshypotese anvendte Alkaliudvalget bl.a. Powers og Steinours (1955) teori om skadesmekanismerne ved alkalikiselreaktioner.

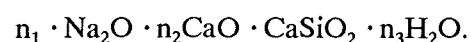
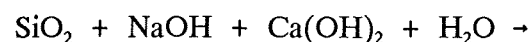
Tesen skal kort gengives i det følgende:

Problemet med alkalikiselreaktioner kan gøres overskueligt ved at betragte en enkelt reaktiv partikel, f.eks. opal, omgivet af beton. I betonen findes der andre ikke-reaktive tilslagsmaterialer, cementgel, calciumhydroxyd, vand og alkalier.

Til at begynde med vil der på overfladen af det reaktive korn dannes en ikke svellende gel (opbygget som Portlandcementgel) af reaktionsprodukter fra en kemisk reaktion mellem calciumhydroxyd, vand, alkalier og kisel.

Den dannede kalkalkaliskiselmembran forsinker tilførsel af calciumioner til det stadig ureagerede indre del af opalpartiklen, hvor reaktionen mellem alkalier, vand og kisel kan danne alkalikiselgel. Forløbet er skematisk vist i figur 7, og sammensætningen af alkalikiselgel er skitseret i figur 8.

Ved en alkalikiselreaktion forstår man altså en kemisk reaktion, der uden hensyn til støkiometri kan skrives som følger, hvor der som betegnelse for alkalier er benyttet natriumionen:



Powers og Steinour observerede at nogle kombinationer af alkalier, vand og reaktive korn kunne forårsage ekspansioner af betonen, hvor andre kombinationer ikke gjorde.

Disse kombinationer var afhængige af alkaliindholdet, mængden og størrelsesfordelingen af reaktivt materiale samt tilstedeværelsen af vand.

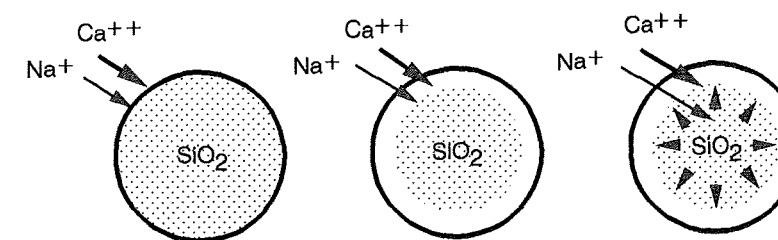
Den dannede kalkalkaliskiselgel adsorberer kalk og alkalier fra den omkringliggende matrix. Den reaktive mængde af adsorberet alkali og kalk er kontrolleret af alkalimængden i betonmatricen. Ved diffusion transporteres adsorberet kalk og alkalier gennem kalkalkaliskisegelen og reagerer med det indre af opalpartiklen.

Kalk kan diffundere hurtigt gennem gelen til at sikre dannelsen af ikke svellende gel, hvis mængden af adsorberet kalk i forhold til alkali er højt nok.

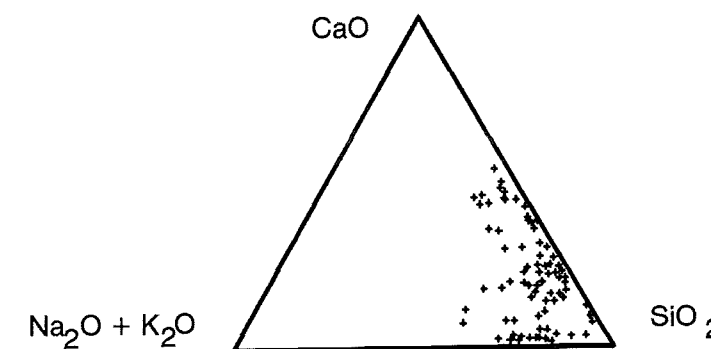
Alkalikoncentrationen i beton må derfor være lav. Hvis alkaliindholdet er for højt dannes den svellende alkalikiselgel ved vandoptagelse hvilket medfører revnedannelse i og ekspansion af betonen.

Laboratorieuvalgets omfattende forsøgsserier med mørtelprismer kan belyse nogle af de forskellige variable der indgår i alkalikiselreaktioner. I figur 9 er vist nogle resultater over mørtelprismeekspansioner efter 20 måneders lagring (udvalget havde vanskeligt ved at skønne det afsluttende ekspansionsforløb efter kun 12 måneder).

Skadesmekanisme



Figur 7. Skematisk fremstilling af alkalikiselreaktionens mekanisme (jf. Plum et al, 1957). Til venstre ses en gruspartikel af reaktiv kisel, omgivet af cementpasta, der bl.a. indeholder calciumioner (Ca^{2+}) og alkaliioner (Na^+). I midten ses alkalireaktioner i en uskadelig begyndelsesfase, idet der under laget af kalkalkaliskiselgel dannes alkalikiselgel uden kalk. Denne gel sveller under optagelse af vand og udøver tryk mod omgivelserne.



Figur 8. Trekantsdiagram over den kemiske sammensætning af alkalikiselgeler i beton [skitseret efter Thaulow og Andersen, 1988].

Alkaliindhold

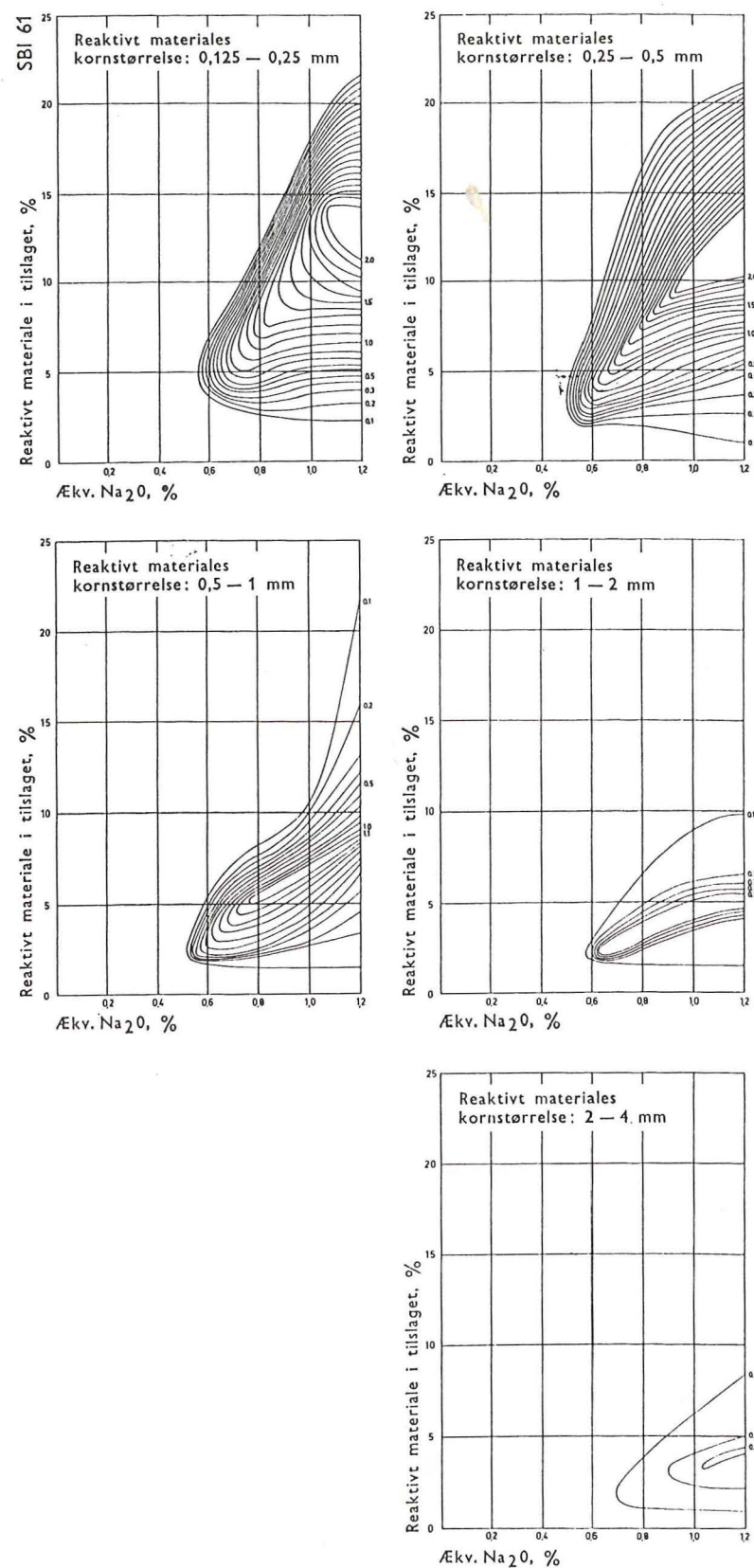
Figur 9 viser at ved højere alkaliindhold fås ved samme indhold af reaktiv materiale en større mørtelprismeekspansion.

Alkaliindholdet er blandt andet bestemt ved den anvendte cementtype samt indholdet af cement og v/c-forholdet.

Almindeligvis udregnes mængden af alkalier (Na^+ , K^+) i cement som ekvivalent mængde af natriumoxid efter følgende formel i vægtprocent (i en cement er alkalierne aldrig fundet som oxider):

$$\text{Na}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \cdot \text{K}_2\text{O} \quad (1)$$

Figur 9 viser også at selv med lave alkaliindhold opstår ekspansioner af mørtelprismerne, dvs ved hver blanding er der for hvert alkaliindhold en given minimumsmængde af reaktivt kisel der skal overskrides for at få ekspansion. Mængden af reaktivt tilslag i betonen er lige så vigtigt som alkaliindholdet. Det er derfor meget svært at fastsætte en kritisk grænse for cementens alkaliindhold uden samtidigt at tage hensyn til type og mængde af det reaktive kisel.



Figur 9. Kornstørrelsens indflydelse på størrelsen af mørtelprismers ekspansion efter lagring i 20 måneder. Kurverne angiver de sammenhørende værdier af ækv. Na_2O og procentvis reaktivt materiale i tilslaget, der giver samme ekspansion. Det reaktive materiale er porøs Erslev-flint. Ekspansionen er til højre for kurverne angivet i % af prøvelegemernes oprindelige størrelse [Alkaliudvalgets vejledning 1, 1961].

Calciumhydroxyd

Indhold af reaktivt materiale

Størrelsesfordeling

Fugtindholdet

Temperaturen

Luftindhold

Karakteristisk dimension

Chatterji (1979) viser, at tilstedeværelsen af calciumhydroxyd er en nødvendighed for at alkalikiselreaktioner kan forløbe i Portlandcement. Calciumhydroxydmængden, der indgår ved dannelsen af alkalikisegel, er bestemmende for gelens viscositet, og dermed bestemmende for gelens evne til at udøve et tryk på omgivelserne (jf. Thaulow et al, 1988).

Figur 9 viser som før nævnt at indholdet af reaktivt materiale har indflydelse på ekspansionen af mørtelprismet. I Danmark er flint det dominerende reaktive tilslag i grusmaterialerne. Flinten består af opal, porøs kalcedon, tæt kalcedon og kalk. Opal er en amorf kisel og kalcedon er en mikrokrystallinsk kisel.

Ekspansionen af betonen vil finde sted når det reaktive kisel i beton repræsenterer en kritisk overflade. Denne overflade er ikke partiklernes tilsyneladende overflade, men afhængig af partiklernes porøsitet. Begyndelsesreaktionen vil øjeblikkelig reducere alkaliindholdet, og da reaktionen kun foregår i overfladen, vil alkalikoncentrationens reduktion være bestemt af det reaktive kisels kornkurve, kornstørrelse, porøsitet og mængde.

Hvis der ikke er tilførsel af alkalier fra omgivelserne, kan man ved at tilsætte reaktivt kisel med en stor specifik overflade i tilstrækkelig mængde forhindre skadelige alkalikiselreaktioner.

Opal har større reaktionshastighed end porøs kalcedon der igen reagerer hurtigere end tæt kalcedon. Det er krystalstrukturen af det enkelte korn der er bestemmende for reaktionshastigheden.

Nilsson og Peterson's (1983) arbejde, på området med springere i belægninger forårsaget af alkalikiselreaktioner, viser fugtindholdets og temperaturens indflydelse på alkalikiselreaktioners forløb. En relativ fugtighed nær de 90 % ved forskellige temperaturer er påvist at være en pessimal fugtighed.

I det samme arbejde fremgår med tydelighed at ved at hæve temperaturen forøges hastigheden af skadesudviklingen (reaktionshastigheden).

Forsøg udført af Jensen et al (1984) viser at indblanding af 4 % luft i mørtlen reducerer mørtelprismeeekspansionen med 40 %. Petrografiske undersøgelser af beton fra konstruktioner med alkalikiselreaktioner har netop vist, at luftboblerne kan virke som ekspansionsbeholdere for den svellende gel.

Luftindblanding kan også virke kapillarbrydende, hvorved vandoptagelsen mindskes med langsommere udvikling af alkalireaktionerne som resultat.

Konstruktionens karakteristiske dimension har indflydelse på skadedannelsen forårsaget af alkalikiselreaktioner i en betonkonstruktion jf. Nielsen (1986). Dette begrundes med, at dannelsen af cementgel og alkalikisegel udtørre betonen indefra. Alkalikisegel vil først svulle når fugt udefra er tilført, hvilket er afhængig af konstruktionens dimensioner.

Initieringstiden, t , dvs. den tid der går før en skade indtræder, er givet ved følgende:

$$t = K \cdot l^2 \quad (2)$$

hvor K afhænger af fugtdiffusionskoefficienten og potentialet og er i størrelsesordenen 30-300 år/ m^2 . l er den karakteristiske dimension af konstruktionen.

Nielsen postulerer ligeledes, at det kun er i forvejen skadede konstruktioner, dvs. konstruktioner med udførelsesfejl (revner), der får skader som følge af alkalikiselreaktioner.

En af konklusionerne fra Vejdirektoratets rapport (1980) kan måske medvirke til støtte for postulatet, her står bl.a.:

"Sammensætningsfejl er den udførelsesdefekt der er mest markant er karakteristisk for de revneskadede konstruktionsdele.

Udførelsesdefekterne medfører, at betonen er uensartet, hvorfor dens modstandsevne overfor nedbrydningsmekanismer som alkalikiselreaktioner og frost er reduceret.

Undersøgelserne har vist, at alkalikiselreaktioner er den hyppigst optrædende følgeskade i de revneskadede konstruktionsdele, idet næsten samtlige betoner indeholder alkalireaktive partikler i sandfraktionen.

Frostskader i form af udvidelser af revner forekommer sjældent alene men ses ofte sammen med alkalikiselreaktioner".

Thøgersen og Gottfredsen (1990) har ved modelbetragtninger vist, at de spændinger der opstår, når en reaktiv partikel ekspanderer, ikke er større end trækstyrkerne i den omkringliggende urevnede matrix.

Ved at sænke v/c-forholdet øges styrken af betonen hvilket kan forhindre reaktive korn i at ekspandere.

Miljøet, her tænkes på temperatur, fugtighed, salte osv., påvirker udviklingen af alkalikiselreaktioner. Temperatur og fugtighed er omtalt i ovenstående. Salte kan tilføres fra havvand, tåge i kystnære områder og ved tørsaltning. Ved salttilførsel sker en tilførsel af alkalier hvorved der er risiko for at alkalikiselreaktioner sætter ind.

Frost-tø påvirkninger

Ved naturlige eksponeringer er der ikke nogen typisk tilstand og frostbestandigheden er afhængig af betonens forhistorie, herunder udtørring og opfugtning, og især afhængig af vandmætningsgraden og fordelingen af vand i betonen.

I det følgende skal kort gengives nogle af de hypoteser der har været fremsat om frostskafer i beton.

I 1945 udvikler Powers sin teori om frostskafer i cementpasta, hvori han antager at det er det hydrauliske tryk, der opstår ved den 9 % volumenforøgelse der sker, når vand skifter fase fra flydende til fast form, hvorved pastaen ødelægges.

Cementen består af kapillarporer med permeable vægge af cementgel. Frysningen af vand til is starter i kapillarporerne og forårsager en pumpning af ufrossent vand i de finere gelporer.

Litvan (1972) foreslår derimod, at vand der ikke er i stand til at fryse i de fineste porer, fordampes imod isdannelsen i de grovere porer, hvorved der dannes en udtørningsmenisk der er årsag til spændingsdannelse i pastaen.

Fagerlund (1977) definerer den kritiske vandmætningsgrad, S_{CR} , som den mængde vand i porerne der skal til for at materialet fryser i stykker. Frostbestandigheden, F , af en beton er da defineret som:

$$F(tid) = S_{CR} - S_{ACT}(tid) \quad (3)$$

hvor $S_{ACT}(tid)$ er den aktuelle vandmætningsgrad afhængig af miljøpåvirkningerne på konstruktionen.

Den kritiske vandmætningsgrad betragtes som en materialeparameter der bl.a. afhænger af v/c-forholdet, modenheden, luftindholdet, revner osv.

Den aktuelle vandmætningsgrad afhænger af miljøpåvirkningerne, herunder temperatur, fugtighed og salte. Ligeledes har konstruktionens geometriske udformning indflydelse på fugtbelastningen af konstruktionen.

Uanset frysemekanismen i porerne har Nielsen (1988, 1989) udviklet en brudmekanisk model der beskriver et porøst materiales nedbrydning på grund af indre spændinger i materialet. Teorien er baseret på antagelsen, at frostbestandigheden afhænger af porestrukturen i materialet, og at der fra porerne udstråler mikrorevner. Når der af en eller anden grund opstår spænding omkring en pore, begynder revnerne at udvikle sig. Når revnerne udvikler sig relaxeres materialet og revneudviklingen stopper. Hvis der yderligere opstår spændinger i materialet får revnen endnu en mulighed for at udvikle sig.

Modellen kan bruges til at bestemme et materiales kritiske vandmætningsgrad ud fra kendskab til materialets styrke, stivhed og porestruktur.

Miljøpåvirkninger

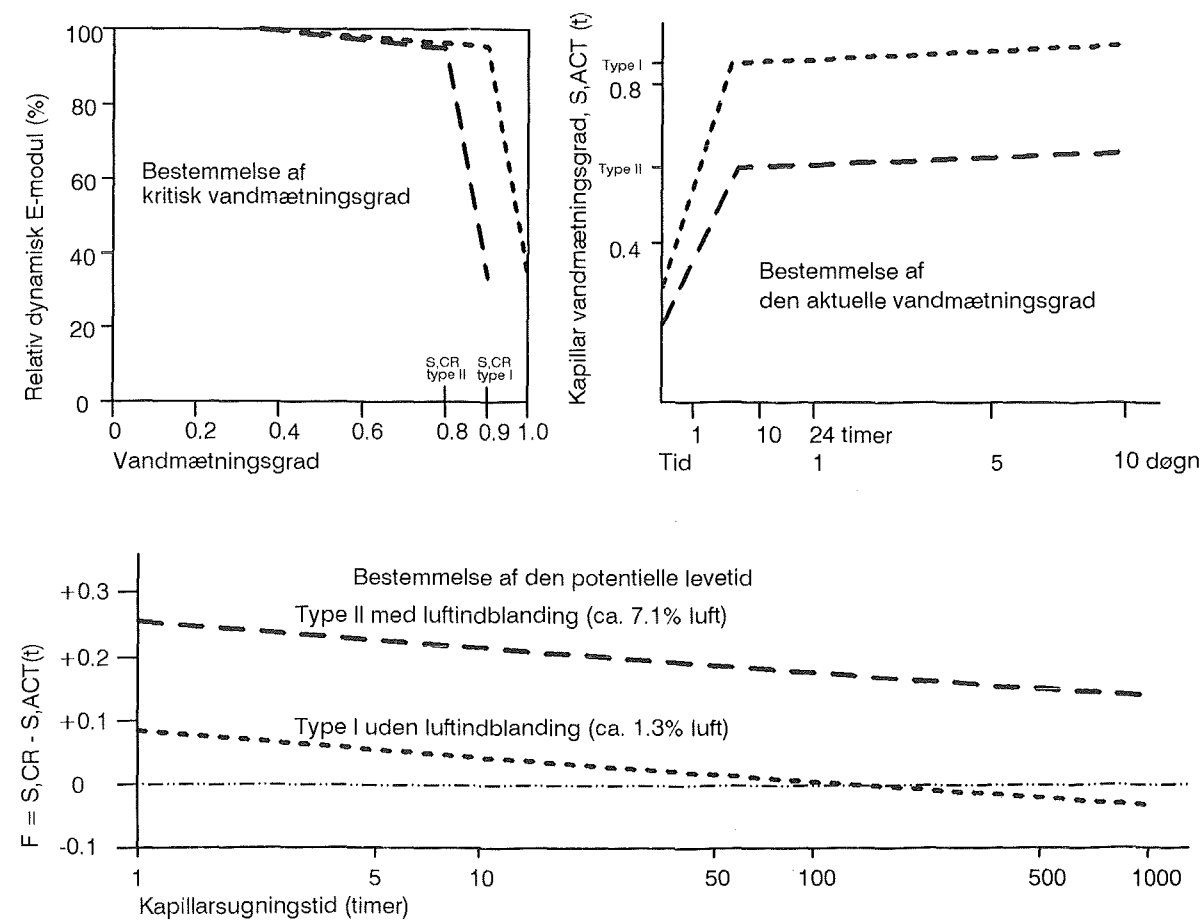
Brudmekanisk model

v/c-forhold

Miljøpåvirkninger

Skadesmekanisme

Kritisk vandmætningsgrad



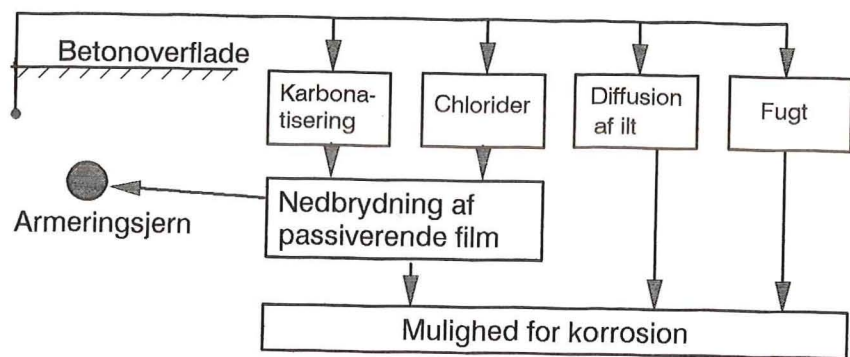
Figur 10. Eksempel på eksperimentel bestemmelse af potentiel levetid for en frostpåvirket beton [Fagerlund, 1987].

Armeringskorrosion

I det basiske miljø i et cementbaseret materiale er armeringsjerns overflade passiveret af et tyndt lag af ferrioxid.

Tilstedeværelsen af kloridioner kan nedbryde det beskyttende ferrioxidlag. Karbonatisering af beton kan nedsætte pH-værdien i porevæsken, hvilket også nedbryder det beskyttende ferrioxidlag.

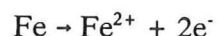
Når først mulighederne for korrosion er skabt afhænger denne af fugtindholdet og tilstedeværelsen af ilt, dvs. i høj grad af iltens diffusionshastighed.



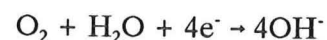
Figur 11. Korrosion af armering i beton

Korrosion kan relateres til en elektro-kemisk proces der kræver en potentialforskul mellem to forbundne elektroder i en elektrolyt. I beton kan elektroderne være to punkter på det samme armeringsjern, eller forskellige armeringsjern eller grupper af jern hvor der er en potentialforskul.

Korrosion af ubeskyttet armeringsjern foregår efter følgende kemiske reaktion i anodedelen:

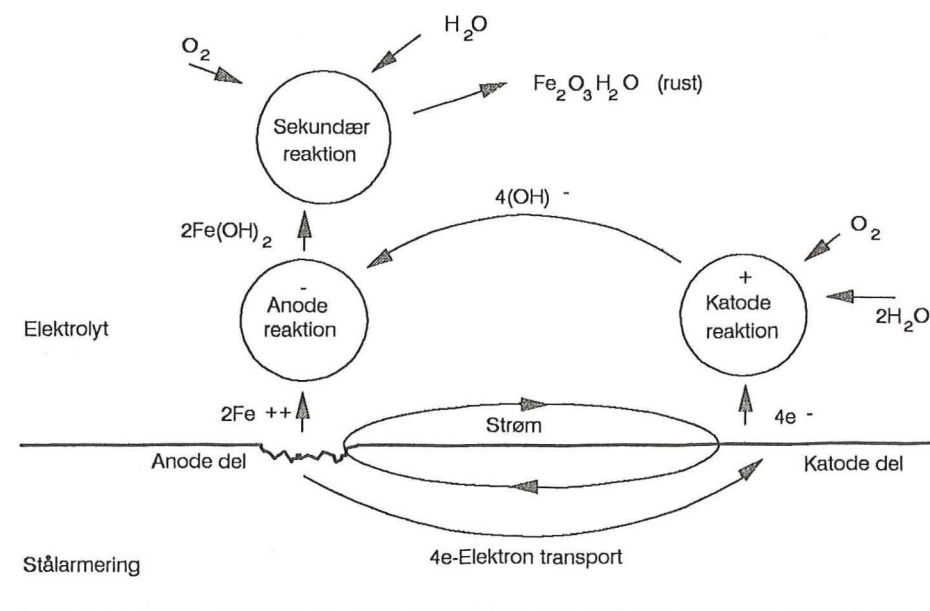


og i forbindelse med ilt og vand sker reaktionen i katodedelen som følger:



Resultatet af korrosionsprocessen er Fe^{2+} - og OH^- -ioner. Disse produkter bruger ilt og vand til dannelsen af forskellige rustprodukter som f.eks. $\text{Fe}(\text{OH})_2$, FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ og $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Disse reaktionsprodukter har et forøget volumen sammenlignet med jern. Denne volumenforøgelse kan sprænge betonen.

Hvilke korrosionsprodukter der produceres er afhængig af både potentialet og pH-værdien af elektrolytten.



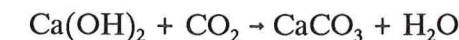
Figur 12. Korrosionsproces.

Karbonatiseringsbetinget korrosion

Karbonatisering er ikke ødelæggende for beton, den kan derimod virke tætnende, men den har effekt på betonens evne til at beskytte armeringsjern.

Betonens indhold af calciumhydroxyd ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gør, at beton er stærkt basisk (pH ~ 12-14) hvilket passiverer armeringen. Ved karbonatiseringen neutraliseres miljøet i beton, hvorved armeringen får mulighed for at korrodere, såfremt ilt og fugt har mulighed for at nå armeringen.

Karbonatisering sker ved at luftens kuldioxid (CO_2) reagerer med calciumhydroxyd i betonoverfladen og i revner i betonen. Processen sker efter følgende reaktionsligning:



Reaktionshastigheden afhænger af fugtindholdet og hvor hurtigt CO_2 kan diffundere ind i betonen. Reaktionen foregår hurtigst ved relative fugtigheder ved 40-70 % RF. Ligeledes vil en forøgelse af temperaturen på 10 °C fordoble reaktionshastigheden.

Karbonatiseringsfrontens indtrængning ved 50 % RF i beton forløber efter følgende empiriske formel (jf. Herholdt et al, 1985):

$$l_c = 72 \left(\frac{1}{\sqrt{f_c}} - 0.126 \right) \sqrt{h} \quad (4)$$

hvor f_c er trykstyrken (i MPa) og h er tiden i år. Man må dog være forberedt på afvigelser på op til 25 %.

Som nævnt nedbrydes passiveringen af armeringen ved karbonatisering hvorved denne fladetæres. Man ser også grubetæring i forbindelse med karbonatisering i revner.

Tabel 8. Initieringsperioder i år for armeringskorrosion forårsaget af karbonatisering [Tuutti, 1982].

Portlandcement- beton lagret udendørs	Dæklags- tykkelse (mm)	Initieringsperiode (år)		
		v/c-forhold		
		0.55	0.65	0.75
Ikke beskyttet mod regn	30	>100	>100	100
	20	>100	70	50
Beskyttet mod regn	30	80	35	15
	20	35	15	7

Kloridbetinget korrosion

Fick's anden lov

Selv om beton er stærkt basisk kan armeringens passivering nedbrydes ved indtrængning af klorider. Korrosionen forløber i dette tilfælde ofte som en grubetæring, da den passiverende film kun nedbrydes på mindre områder, dvs. et lille anodeareal og et stort katodeareal.

Det antages ofte at klorider diffunderer ind i en revnefri beton på en måde som det lader sig beskrive ved Fick's anden lov:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

Dette på trods af at ingen af forudsætningerne for Fick's anden lov er opfyldt, nemlig at:

- Materialet skal være permeabelt og isotropt.
- Der må ikke ske kemisk reaktion mellem det permeable materiale og de diffunderende klorider.
- Materialet må ikke ændre sine diffusionsegenskaber med tiden eller med stofkoncentrationen, dvs. diffusionskoefficienten skal være konstant.

Teorien er ikke udviklet til at gælde for kloriddiffusion i beton. Beton er nemlig ikke et isotropt materiale. Kloriderne kan binde sig kemisk til cementens hydratiseringsprodukter (jf. Page og Vennesland, 1983). Betonen ændrer sig ved hydratiseringen, hvorved diffusionskoefficienten kan ændre sig.

En tilnærmet løsning på Fick's anden lov er givet ved følgende (jf. Poulsen, 1990):

$$\frac{x^2}{12t} = D \left(1 - \sqrt{\frac{C(x,t) - C_i}{C_s - C_i}} \right)^2 \quad (6)$$

når følgende betingelse er opfyldt

$$\frac{12tD}{x^2} > 1 \quad (7)$$

- C_s er kloridindholdet ved betonoverfladen,
 C_i er betonens initiale kloridindhold,
 $C(x,t)$ er betonens kloridindhold i afstanden x fra betonoverfladen,
 D er betonens kloriddiffusionskoefficient,
 t er den tid i hvilken diffusionsprocessen har virket.

Kritisk kloridindhold

For at armeringen skal begynde at ruste, skal betonporevæskens kloridindhold være over et kritisk niveau. Dette kloridindhold beskrives almindeligvis ved følgende tærskelværdi:

$$\frac{[Cl^-]}{[OH^-]} \geq 0.6 \quad (8)$$

dvs. porevæskens kloridkoncentration skal være større end 60 % af porevæskens hydroxydionkoncentration før armeringen begynder at ruste.

Hydroxydionkoncentrationen kan beregnes efter følgende:

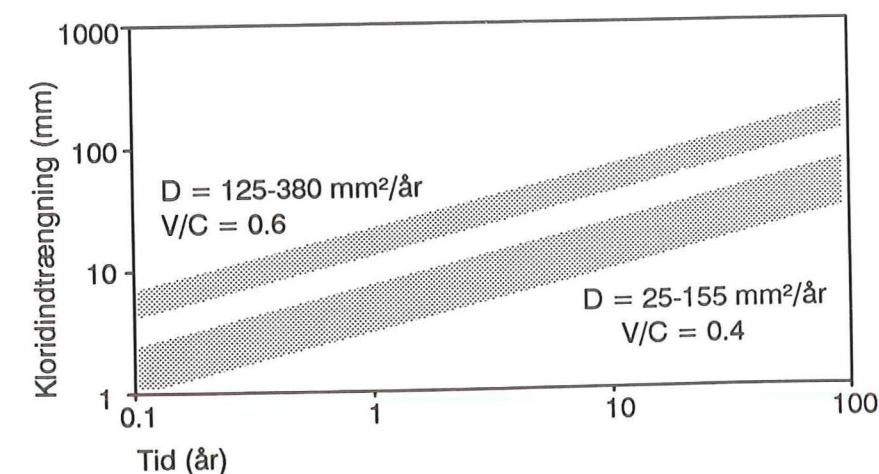
$$[OH^-] = \frac{C \cdot (Na)}{23} + \frac{C \cdot (K)}{39} \cdot 100 \quad (9)$$

hvor C er cementindholdet (kg/m^3), (Na) , (K) er vægtindholdet af Na og K i cementen, og P er porøsiteten af betonen.

Kloridindholdet angives også som målt i % af tør betonvægt. Det kritiske kloridindhold for initiering af armeringskorrosion bedømmes almindeligvis herhjemme til at være 0,05% af tør betonvægt, omend denne grænse er materiale- og konstruktionsafhængig. Denne værdi er det totale kloridindhold, dvs. der skelnes ikke mellem frie og bundne klorider i betonen.

Tabel 9. Målte $[OH^-]$ koncentrationer i porevæsken i Portlandcementbeton, samt beregnede tærskelværdier for $[Cl^-]$. Kloriddiffusionskoefficienter er givet [Tuutti, 82].

v/c	D ($mm^2/\text{år}$)	$[OH^-]$ (ekivalent/l)	Tærskelværdi $[Cl^-]$ (g/l)
0.4	25-155	1.1 +/- 0.4	25
0.6	125-380	0.4 +/- 0.2	9



Figur 13. Kloridindtrængningsdybder i beton som funktion af tiden, kloriddiffusionskoefficienten og v/c-forholdet.

Resultater og diskussion

I det følgende gennemgås nogle eksempler på levetidskurver bestemt ud fra resultaterne fra materialeprøvning, generaleftersyn og særeftersyn.

Resultater fra materialeprøvningen

Cementen

Krav om højere styrker har medført udvikling af cement, der hurtigere udvikler og når højere styrker.

Udviklingen af Portlandcementen afspejles ganske tydeligt ved en hurtigere styrkeudvikling af cementen, som vist på figur 14 og 15, der viser tryk- og trækstyrketallene efter danske normer for standardmørtel 1:3 efter 7 og 28 døgns vandlagring.

Omkring 1920 er Portlandcementens 28 døgns trykstyrke på ca. 35 MPa, medens den i 1940 når over 50 MPa.

Figur 14 og 15 viser ligeledes, at forskellen mellem 7 døgns- og 28 døgnsstyrkerne mindskes med årene. Denne formindskelse skyldes udviklingen i cementens formalingsgrad, jo finere cementen er formalet desto hurtigere udvikler cementen tidlig styrke.

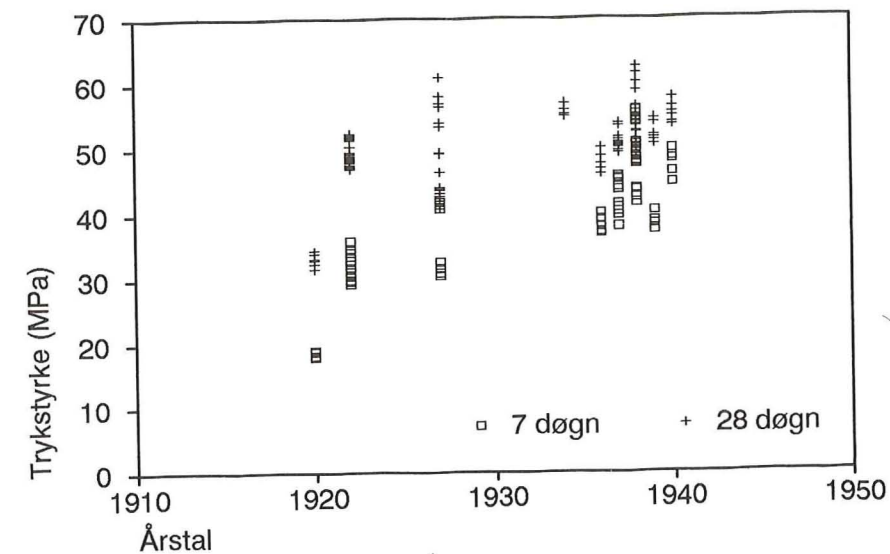
Indtil 1950 anvendtes herhjemme næsten udelukkende Portlandcement, hvorefter der indførtes brug af andre typer såsom Rapidcement og Superrapidcement, op til i dag hvor cementerne almindeligvis indeholder flyveaske og er mere komplekse.

Tilslaget

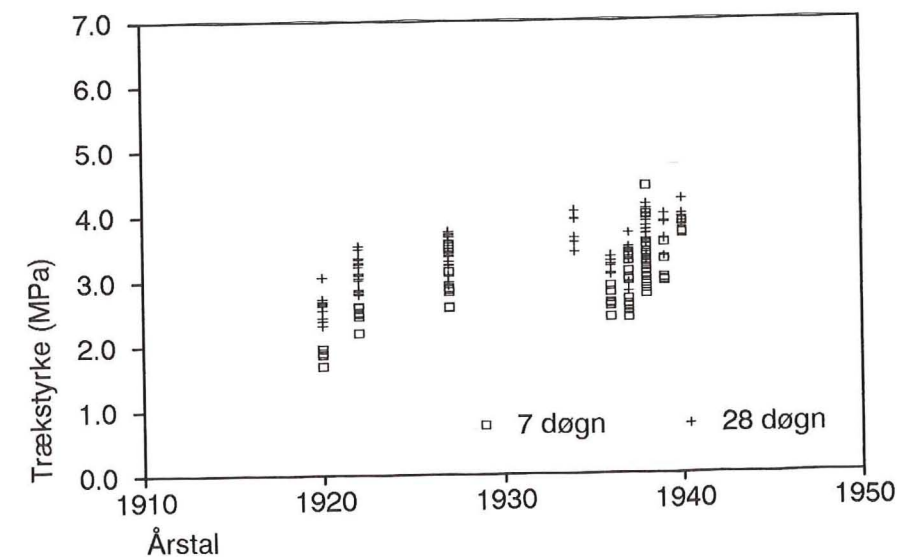
I figur 16 er vist nogle sigtekurver for sandet anvendt til tre konstruktionstyper, henholdsvis Hg, D og Pa. Der ses en svag tendens til at kornene er fordelt over den gunstigste kornkurve for alle konstruktionstyper.

Med hensyn til stenenes kornkurve, vist på figur 17, for de forskellige konstruktionstyper, er det tydeligt at kornkurverne for stenene anvendt til grovbeton afviger ganske meget fra den ønskelige fordeling.

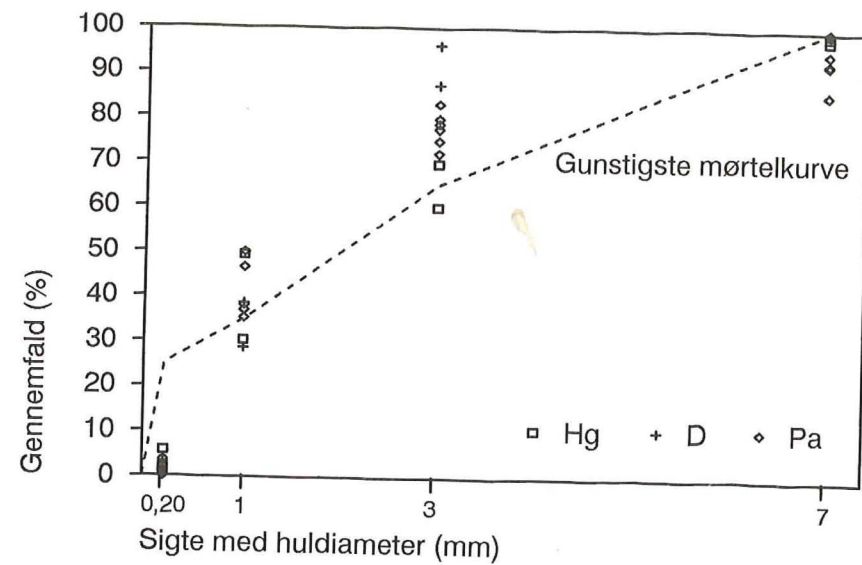
En for stor afvigelse for både sand og/eller sten medfører en dårlig bearbejdning af beton, hvilket kan resultere i dårligt udstøbte konstruktioner.



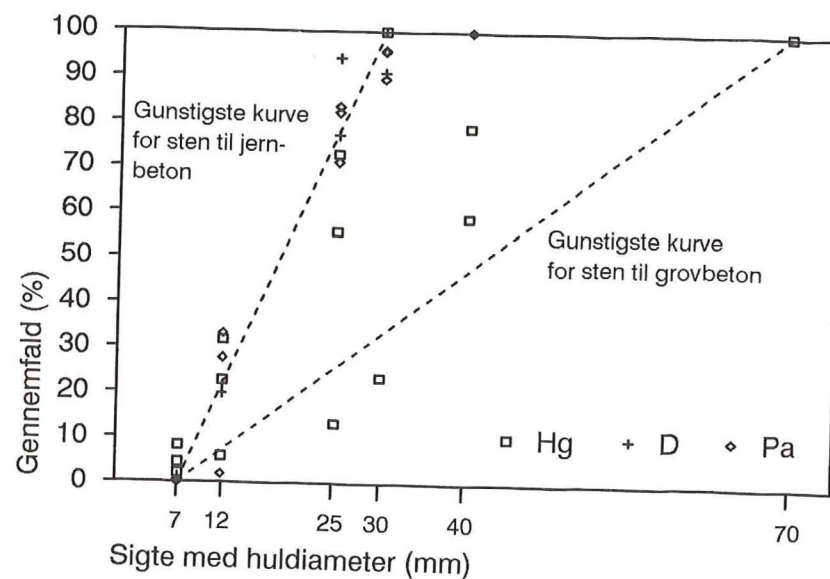
Figur 14. Udviklingen i cementens trykstyrke. Mørtel 1:3, ca. 8 vægt % vand og lagret i vand ved stuetemperatur.



Figur 15. Udviklingen i cementens trækstyrke. Mørtel 1:3, ca. 8 vægt % vand, lagret i vand ved stuetemperatur.



Figur 16. Kornkurver for sand anvendt for Hg, D og Pa konstruktionstyperne.



Figur 17. Kornkurver for sten anvendt for Hg, D og Pa konstruktionstyperne.

Resultater fra generaleftersyn

I det følgende skal gennemgås nogle af de resultater der fremkommer ved gennemgang af generaleftersyn på ældre betonkonstruktioner opført før 1940.

I figur 18-21 er ændringerne i hovedindtrykket af de ældre betonkonstruktioner ved generaleftersyn afbildet som funktion af tiden. De fire forskellige konstruktionstyper, henholdsvis Hg, Ha, D og Pa, er afbildet i hver sin figur.

I det omfang der er registreret alkalikiselreaktioner af Alkaliudvalget, er resultaterne adskilt i henholdsvis konstruktioner med (+AKR) og konstruktioner uden alkalikiselreaktioner (-AKR).

I tabel 10-15 er angivet karaktererne fra generaleftersyn af de ældre betonkonstruktioner. Her er medtaget de vigtigste konstruktionsdele der indgår i generaleftersynene. Karaktererne er angivet for konstruktionsdelene hvor det har været muligt at udrede reparationernes omfang.

Uden alkalikiselreaktioner

Ved konstruktioner, hvor Alkaliudvalget ikke har konstateret alkalikiselreaktioner, er der generelt set ikke nogen forskel på levetiden afhængig af konstruktionstypen.

Et skøn over middelværdien for levetiden af en konstruktion uden alkalikiselreaktioner vil være ca. 70 år før en reparation er nødvendig.

Ser man på spredningerne er der forskel konstruktionstyperne imellem. Den armerede hvælving (type Ha) udviser en ganske lille spredning, levetiden er ca. 70-80 år, i forhold til den armerede plade (type Pa) hvor der ses ganske store spredninger med levetider på 70-100 år. Her er det formodentligt konstruktionsudformningen der slår igennem, fra den armerede hvælving der er trykbelastet over hele konstruktionen, til den armerede plade på bærende åg og/eller søjler der er en mere dristig konstruktion.

Typisk er der tale om en generel forvitring af udsatte konstruktionsdele, så som rækværker, autoværn og belægninger. Rækværker er efter 65-70 år ofte i så dårlig stand at de erstattes af nye. En sådan aktion omfatter ofte reparation af konstruktionens kantbjælker. Ofte ses også blotlægning af armeringsjernene der skyldes korrosion af jern med for lille dæklag.

Frost-tø påvirkninger på de ældre konstruktioner (beton uden luftindblanding) er som regel værst for de udsatte konstruktionsdele som f.eks. kantbjælker ved kørebane, dvs. beton udsat for tørsalting og høj fugtighed.

Der er ikke på understøtninger, fløje eller bærende overbygninger konstateret dårligere skadesgrader end 2-3 efter ca. 70 års forløb. Konstruktionerne vurderes almindeligvis med betydelige restlevetider, således at den samlede levetid før en eventuel hovedreparation er ca. 100 år.

Med alkalikiselreaktioner

De tilfælde hvor Alkaliudvalget konstaterede alkalikiselreaktioner er bl.a. grovbetonkonstruktionerne (type Hg).

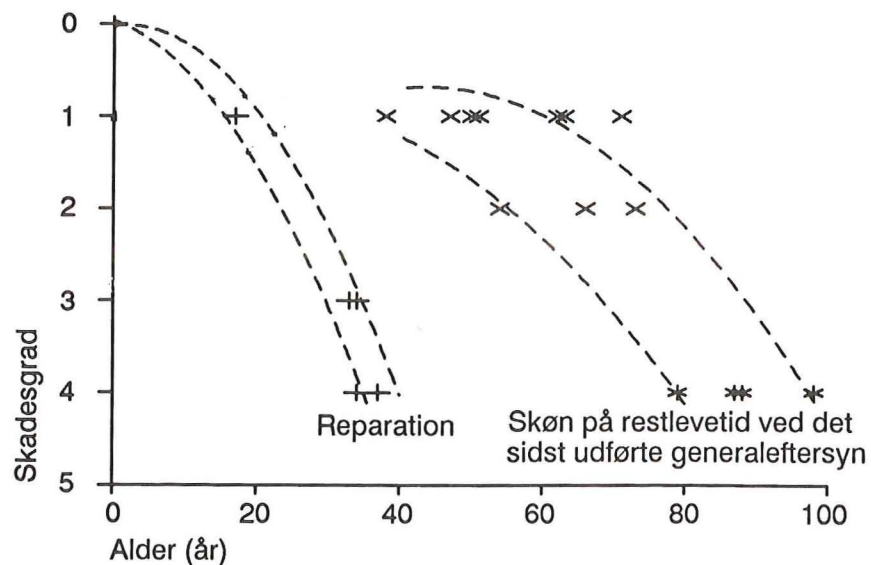
Under indflydelse af alkalikiselreaktioner sker nedbrydningen meget hurtigt. Igen har det været svært at se forskel på konstruktionstyperne.

Et skøn på middelværdien af levetiden af en konstruktion der er påvirket af alkalikiselreaktioner vil være ca. 30-40 år før en reparation er nødvendig. I figur 18 er indtegnet generaleftersynskaraktererne for hovedindtrykket af grovbetonkonstruktionerne, før og efter reparation. For alle afbildede konstruktioner er der konstateret alkalikiselreaktioner af Alkaliudvalget. I konstruktionerne optræder skaderne meget tilfældigt,

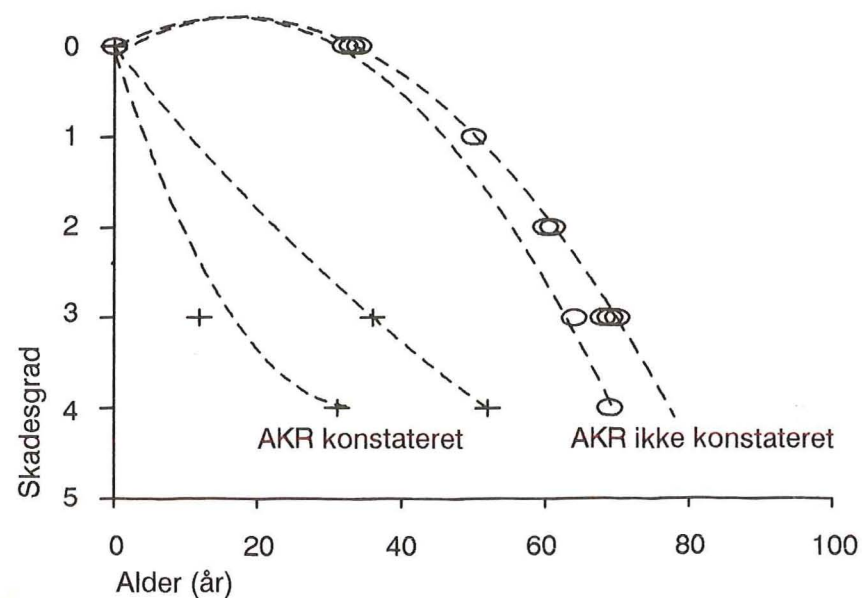
men det er tydeligt at udsatte konstruktionsdele skal udskiftes eller repareres efter ca. 30-40 år.

Efter en første reparation vil det typisk være nødvendigt at reparere igen, når konstruktionen er ca. 70-100 år.

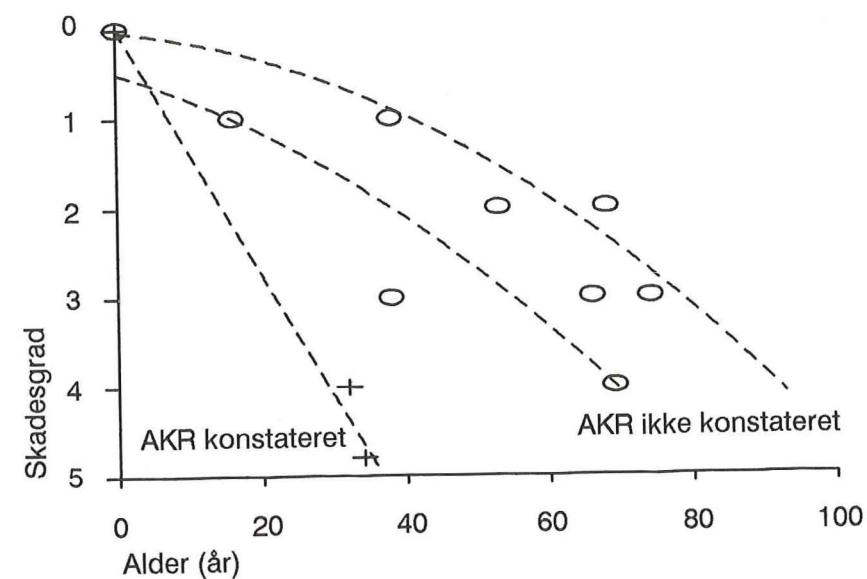
Efter reparation er spredningen større end før reparation, da alle konstruktionsdele ikke bliver repareret og derfor fortsætter sit oprindelige nedbrydningsforløb. Endelig er der på figur 18 angivet det skøn over levetiden som eftersynsingeniøren forudsiger ved det sidst udførte generaleftersyn.



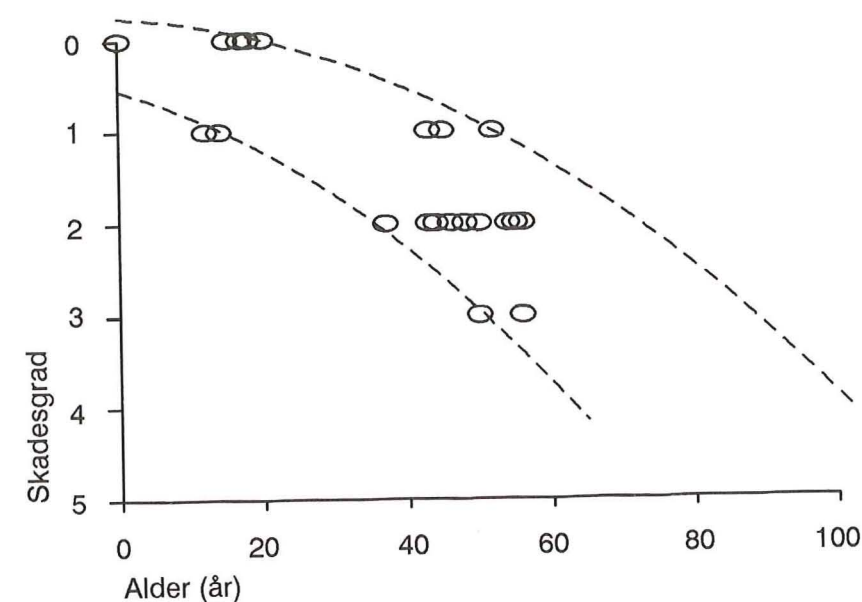
Figur 18. Udvikling i hovedindtryk af konstruktionstype Hg. I alle de medtagne konstruktioner er der af Alkaliudvalget konstateret alkalikiselreaktioner. Ligeledes er indtegnet udviklingen efter reparation med angivelse af skønnet på levetiden ved det sidst udførte generaleftersyn.



Figur 19. Udvikling i hovedindtryk af konstruktionstype Ha.



Figur 20. Udvikling i hovedindtryk af konstruktionstype D.



Figur 21. Udvikling i hovedindtryk af konstruktionstype Pa. Der er ikke af Alkaliudvalget konstateret alkalikiselreaktioner i nogen af konstruktionerne medtaget i denne figur.

Skadesgradbestemmelse på konstruktionsdelniveau

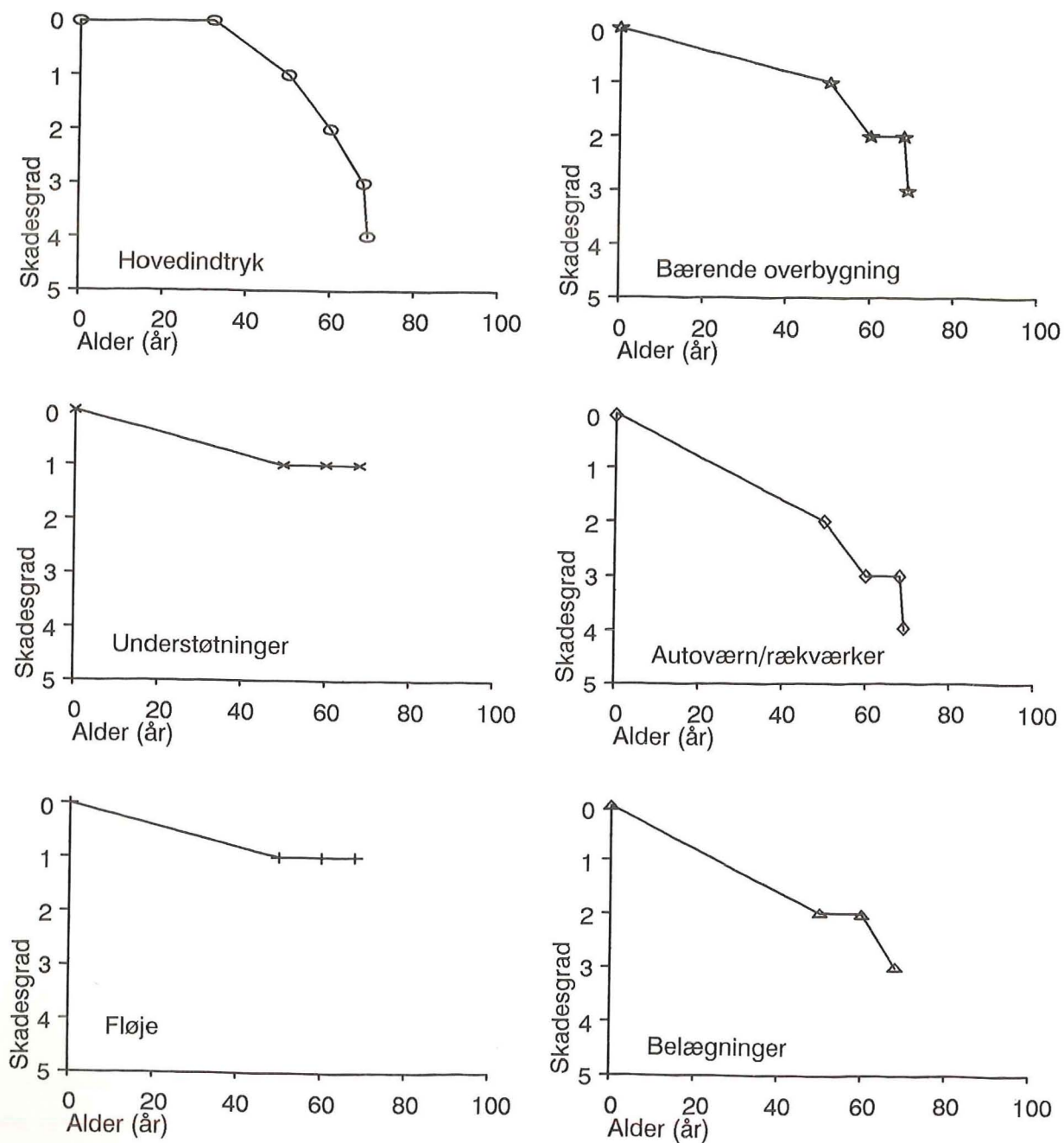
På figur 22 er vist resultaterne fra generaleftersynene på konstruktion nr. 98.4, en armeret hvælving (type Ha), vejoverføring og opført i 1922.

Hovedindtrykket af hele konstruktionen viser til at begynde med en bremset udvikling i skaderne, for efter ca. 70 år at nå en tilstand hvor en reparation er nødvendigt.

Ser man på konstruktionsdelene viser understøtningerne og fløjene efter 70 år at være i særdeles god stand, ingen af delene har nået en ringere skadeskarakter end 1.

Den bærende overbygning, autoværn/rækværker og belægning udviser kraftig nedbrydning efter ca. 70 år. Ikke mindst autoværn/rækværker står foran en udskiftning, men også belægningen er i en dårlig forfatning,

hvilket kan have direkte indflydelse på den bærende overbygning. Revner og huller i belægningen kan lede vand og tørsalte ned i den bærende overbygning med en accelereret nedbrydning som følge. Det er umuligt på grundlag af generaleftersynene at bestemme de egentlige skadesårsager, men det er tydeligt at der er en sammenhæng i nedbrydningen af den bærende overbygning og nedbrydningen af autoværn/rækværker og belægningen.



Figur 22. Udviklingen i skadesgradkarakter for hovedindtrykket af konstruktion nr. 98.4 samt bedømmelse angivet på konstruktionsdelsniveau.

Tabel 10. Tider i år for skadesgradudviklinger for hovedindtryk af konstruktionerne.

Nr.	Type	AKR	Før istandsættelse					Efter istandsættelse				
			0	1	2	3	4	5	1	2	3	
6.2	Hg	+					37			51	66,73	
41.2	Hg	+				34				50,63,71		
125.6	Hg	+					34			38,62		
79.1	Hg	+		17		33				47	54	
6.1	Ha	+				36	52			52	65,72	
98.3	Ha		34			64,70						
68.4	Ha		33		61	69						
98.4	Ha		32	50	60	68	69					
115.2	Ha	+				12	31			31	42	
66.2	D						44			47	66,67	
131.7	D											
89.8	D					38,66	69			69	75	
98.1	D			38	68	74						
98.14	D	+					32	34		34	60,69	
89.7	D			16	46,53							
68.1	Pa		20			50,56						
68.2	Pa		20		50,56							
68.3	Pa		18		48,55							
78.3	Pa		17	45	54							
78.4	Pa			12	43,46							
78.1	Pa		15	43,52								
54.4	Pa			14	37,44							

Type Hg: Uarmeret hvælving af grovbeton.

Type Ha: Hvælving af armeret beton.

Type D: Pladebro med indstøbte jerndragere.

Type Pa: Kontinuerligt pladebro af armeret beton.

Karakter 0-2: Acceptabel tilstand.

Karakter 3-5: Uacceptabel tilstand.

Tabel 11. Tider i år for skadesgradudviklinger for understøtninger af konstruktionerne.

Nr.	Type	AKR	Før istandsættelse					Efter istandsættelse				
			0	1	2	3	4	5	1	2	3	
6.2	Hg	+										
41.2	Hg	+										
125.6	Hg	+										
79.1	Hg	+										
6.1	Ha	+				36	52	52	65,72			
98.3	Ha											
68.4	Ha			61,69								
98.4	Ha			50,60,68								
115.2	Ha	+							42			
66.2	D					44	47		66,67			
131.7	D											
89.8	D			66,75								
98.1	D			68,74								
98.14	D	+					60,69					
89.7	D			46,53								
68.1	Pa				50,56							
68.2	Pa			50,56								
68.3	Pa			48	55							
78.3	Pa		45,54									
78.4	Pa				43,46							
78.1	Pa		43,52									
54.4	Pa		37,44									

Type Hg: Uarmeret hvælving af grovbeton.
 Type Ha: Hvælving af armeret beton.
 Type D: Pladebro med indstøbte jerndragere.
 Type Pa: Kontinuerligt pladebro af armeret beton.

Karakter 0-2: Acceptabel tilstand.
 Karakter 3-5: Uacceptabel tilstand.

Tabel 12. Tider i år for skadesgradudviklinger for fløje af konstruktionerne.

Nr.	Type	AKR	Før istandsættelse					Efter istandsættelse				
			0	1	2	3	4	5	1	2	3	
6.2	Hg	+								51	73	
41.2	Hg	+										
125.6	Hg	+										
79.1	Hg	+										
6.1	Ha	+						36		52		
98.3	Ha				64,70							
68.4	Ha			61,69								
98.4	Ha			50,60,68								
115.2	Ha	+						31		31	42	
66.2	D											
131.7	D											
89.8	D				66	69				69	75	
98.1	D				68,74							
98.14	D	+								60,69		
89.7	D			46,53								
68.1	Pa								50,56			
68.2	Pa				50,56							
68.3	Pa				48,55							
78.3	Pa		45,54									
78.4	Pa				46	43						
78.1	Pa		43,52									
54.4	Pa		44									

Type Hg: Uarmeret hvælving af grovbeton.
 Type Ha: Hvælving af armeret beton.
 Type D: Pladebro med indstøbte jerndragere.
 Type Pa: Kontinuerligt pladebro af armeret beton.

Karakter 0-2: Acceptabel tilstand.
 Karakter 3-5: Uacceptabel tilstand.

Tabel 13. Tider i år for skadesgradudviklinger for bærende overbygning af konstruktionerne.

Nr.	Type	AKR	Før istandsættelse					Efter istandsættelse				
			0	1	2	3	4	5	1	2	3	
6.2	Hg	+										
41.2	Hg	+										
125.6	Hg	+										
79.1	Hg	+										
6.1	Ha	+				36				65,72		
98.3	Ha						64,70					
68.4	Ha				61,69							
98.4	Ha		50		60,68	69						
115.2	Ha	+						31		42		
66.2	D						44			47		66,67
131.7	D											
89.8	D				66	75						
98.1	D				68	74						
98.14	D	+								60,69		
89.7	D				46,53							
68.1	Pa					50						
68.2	Pa				50,56							
68.3	Pa		48		55							
78.3	Pa		45,54									
78.4	Pa				43,46							
78.1	Pa		43,52									
54.4	Pa		37,44									

Type Hg: Uarmeret hvælving af grovbeton.

Type Ha: Hvælving af armeret beton.

Type D: Pladebro med indstøbte jerndragere.

Type Pa: Kontinuerligt pladebro af armeret beton.

Karakter 0-2: Acceptabel tilstand.

Karakter 3-5: Uacceptabel tilstand.

Tabel 14. Tider i år for skadesgradudviklinger for autoværn og rækværker af konstruktionerne.

Nr.	Type	AKR	Før istandsættelse					Efter istandsættelse				
			0	1	2	3	4	5	1	2	3	
6.2	Hg	+								51		72
41.2	Hg	+										
125.6	Hg	+										
79.1	Hg	+										
6.1	Ha	+							36		36	65 72
98.3	Ha				64	70						
68.4	Ha					61				69		
98.4	Ha				50	60,68	69					
115.2	Ha	+							31			42
66.2	D											
131.7	D											
89.8	D					66						75
98.1	D					68	74					
98.14	D	+								60		69
89.7	D									46		46,53
68.1	Pa					50						
68.2	Pa				50,56							
68.3	Pa					48,55						
78.3	Pa				54	45						
78.4	Pa					43,46						
78.1	Pa				43	52						
54.4	Pa					37,44						

Type Hg: Uarmeret hvælving af grovbeton.

Type Ha: Hvælving af armeret beton.

Type D: Pladebro med indstøbte jerndragere.

Type Pa: Kontinuerligt pladebro af armeret beton.

Karakter 0-2: Acceptabel tilstand.

Karakter 3-5: Uacceptabel tilstand.

Tabel 15. Tider i år for skadesgradudviklinger for belægninger på konstruktionerne.

Nr.	Type	AKR	Før istandsættelse					Efter istandsættelse			
			0	1	2	3	4	5	1	2	3
6.2	Hg	+							72		
41.2	Hg	+									
125.6	Hg	+									
79.1	Hg	+									
6.1	Ha	+					36		65	72	
98.3	Ha				64	70					
68.4	Ha				61	69					
98.4	Ha				50,60	68					
115.2	Ha	+	42								
66.2	D										
131.7	D										
89.8	D			66	75						
98.1	D										
98.14	D	+	60		69						
89.7	D		46	53							
68.1	Pa		50								
68.2	Pa			50	56						
68.3	Pa		48	55							
78.3	Pa		54	45							
78.4	Pa		43,46								
78.1	Pa		43		52						
54.4	Pa		37,44								

Type Hg: Uarmeret hvælving af grovbeton.

Type Ha: Hvælving af armeret beton.

Type D: Pladebro med indstøbte jerndragere.

Type Pa: Kontinuerligt pladebro af armeret beton.

Karakter 0-2: Acceptabel tilstand.

Karakter 3-5: Uacceptabel tilstand.

Resultater fra særeftersyn

For at give et billede af brugen af det i teori afsnittet beskrevne formelværktøj omkring klorider i beton, bestemmes i det følgende diffusionskoefficienterne for de tre søjler ved bro nr. 146.64 ved terræn, samt de dertil hørende kloridbetingede korrosionsstarttider.

Tabel 16. Følgende kloridindhold er målt i søjlerne ved terrænniveau.

Søjle	Dybde (mm)	Kloridindhold
Nordlige	0-20	0,01
	20-40	0,00
Midterste	0-20	0,02
	20-40	0,01
Sydlige	0-20	0,06
	20-40	0,05
	40-60	0,16 ¹⁾

¹⁾ Ophobningen af klorider kan skyldes flere ting. En forklaring kunne være at klorider i de ydre lag er vasket ud og der er ikke tilført nye grundet de seneste års milde vintre. En anden forklaring kunne være at ved karbonatiseringen i revnerne frigøres klorider ved dannelse af det såkaldte Friedelssalt (jf. Page og Vennesland, 1983), hvorved der tilføres ekstra klorider ind i beton. En tredje forklaring kunne være en målefejl.

Løsningen til Fick's anden lov (6) kan omskrives på følgende måde:

$$\sqrt{C_{(x,t)} - C_i} = \sqrt{C_s - C_i} - x \sqrt{\frac{C_s - C_i}{12tD}} \quad (10)$$

Der kan skrives som:

$$y = \alpha x + q \quad (11)$$

hvor

$$y = \sqrt{C_{(x,t)} - C_i} \quad (12)$$

$$q = \sqrt{C_s - C_i} \quad (13)$$

$$\alpha = -\frac{\sqrt{C_s - C_i}}{\sqrt{12tD}} = -\frac{q}{\sqrt{12tD}} \quad (14)$$

Betonens diffusionskoefficient, D , og kloridindholdet i betonoverfladen, C_s , kan da bestemmes som følger:

$$D = \frac{\left(\frac{q}{\alpha}\right)^2}{12t} \quad (15)$$

$$C_s = q^2 + C_i \quad (16)$$

Ved at anvende de udviklede formler på de målte kloridindhold fås følgende diffusionskoefficienter og tider for kloridbetinget korrosion angivet i tabel 17.

Resultaterne i skemaet er kun tendenser, dvs. der er for få bestemmelser af kloridindholdet til at man kan sige noget sikkert om diffusionen af klorider ind i betonen.

Resultaterne er meget konservativt skønnet, dvs. de er de tidligste tider der kan forventes korrosion af søjlernes armering.

EKP-målingerne på søjlerne understøtter resultaterne i tabel 17. Den nordlige søjles EKP-målinger indikerer en god armeringstilstand uden væsentlig risiko for igangværende korrosion. Målingerne på den midterste søjle viser potentielle områder for opstart af korrosion inden for overskuelig fremtid. EKP-målingerne på den sydlige søjle indikerer igangværende korrosion.

Forklaringen på hvorfor der er så stor forskel på de tre søjler kan til dels hentes i mikroanalyserne af tyndslib fra den sydlige og nordlige søjle.

I begge søjler er der konstateret alkalikiselreaktioner. I den sydlige søjle er der konstateret svind og/eller termorevner i et betydeligt omfang, modsat i den nordlige søjle hvor der kun er konstateret meget få mikrorevner.

Disse svind/termorevner har skabt mulighed for hurtig fugt-indtrængning i så store mængder, at alkalikiselreaktioner har haft let ved at forløbe. Alkalikiselreaktionerne har yderligere åbnet op for konstruktionen, hvorved klorider har haft nemmere ved af diffundere ind i betonen (jf. de høje diffusionskoefficienter).

Man har altså allerede ved udstøbningen af den sydlige søjle tilført fejl i betonen der har haft megen stor indflydelse på dens levetid.

Bestemmelsen af diffusionskoefficienterne viser med tydelighed, at der er forskel fra søjle til søjle, og at der i den nærmeste fremtid kan forventes problemer med armeringskorrosion i den midterste søjle.

Tabel 17. Bestemmelse af diffusionskoefficienter og initieringstider for kloridbetinget korrosion af armeringen i betonsøjlerne i bro nr. 146.64.

Søjle	Dybde y (mm)	α	q	C_s (%)	D (mm ² /år)	t (år)
Nordlige	0-20	0,10	-0,005	0,15	0,02	3
	20-40	0,00				104
Midterste	0-20	0,14	-0,002	0,16	0,03	19
	20-40	0,10				27
Sydlige	0-20	0,25	-0,001	0,26	0,07	183
	20-40	0,22				17
	40-60	0,40				

Ved anvendelse af formel 2 på søjlerne fås initieringstider på 15-150 år for alkalikiselreaktioner; en ganske usikker størrelse.

I 1975, dvs. 12 år efter opførelsen, er der konstateret revnedannelse i den sydlige søjle, og ved gennemgang af brobogen fremgår det at nivellement på broen i 1966-1967 viser en tydelig hævnning af broen!

Disse observationer tyder på at alkalikiselreaktioner sætter ind på et meget tidligt tidspunkt, således at konstanten i formel 2 er nærmere de 30 år/m² end de 300 år/m².

Afsluttende diskussion

Ved litteraturgennemgangen blev det klart at der er mange faktorer der influerer på en konstruktions levetid.

Resultaterne i nærværende rapport har vist at det er muligt at opstille levetidsmodeller og levetidskurver for betonkonstruktioner.

Stadig er der mange spørgsmål der bør afklares. Følgende spørgsmål kan stilles:

To tilsyneladende ens konstruktioner eller konstruktionsdele nedbrydes med forskellig hastighed, i den ene kommer alkalikiselreaktioner til udtryk og ikke i den anden. I hvor stor grad har initialfejl og revner indflydelse på udviklingen af alkalikiselreaktioner?

Konstanten $K = 30-300$ år/m² i formel 2 er ikke særlig operativ, den bør om muligt præciseres.

Hvilke typer af potentielle reaktive korn reagerer i praksis og hvad er restreaktiviteten?

Hvad rolle har størrelsesfordelingen af de reaktive korn for udviklingen og forløbet af alkalikiselreaktioner?

Eksisterer der en absolut kritisk værdi for indholdet af alkalier hvorunder alkalikiselreaktioner ikke har nogen effekt på konstruktionen?

Det er efterhånden muligt ud fra kendskab til porestrukturen at bestemme den kritiske vandmætningsgrad for en beton (jf. et Ph.D.-studie på SBI). Stadig mangler der en udredning af hvordan betonens aktuelle vandmætningsgrad varierer med årsvariationerne i vejrliget gennem hele konstruktionens levetid.

Oftentimes anvendes ved laboratorieforsøg 3 % saltkoncentration i porevæsken som en pessimal koncentration med hensyn til frost-tø; hvorvidt optræder dette forhold i praksis?

Det er almindeligt at bruge Fick's anden lov ved bestemmelse af initieringstider for kloridbetinget armeringskorrosion i beton. Spørgsmål der endnu ikke er afklaret er, om diffusionskoefficienten er konstant gennem hele konstruktionens levetid og i hvor høj grad kloriderne bindes kemisk i betonen.

Som nævnt er det almindeligt herhjemme at anvende en tærskelværdi på 0,05 % klorid i beton som start af kloridbetinget armeringskorrosion; gælder denne værdi i praksis?

Det er koncentrationsforskellene i klorider ved overfladen i forhold til det indre af betonen der er den drivende mekanisme i Fick's anden lov. Hvad er betonens initiale kloridindhold og hvad er kloridbelastningen af vore konstruktioner/konstruktionsdele?

Revner i betonoverfladen kan forårsage at karbonatiseringbetinget korrosion starter på et tidligere tidspunkt end forudsagt ved formel 4; kan denne formel udvikles til at gælde for beton med initialrevner?

Alkalikiselreaktioner

Frost-tø påvirkninger

Armeringskorrosion

EKP-målinger

Petrografiske undersøgelser

Mulig forklaring

Fremtidig forskning

Følgende bør bl.a. afklares i et hovedprojekt vedrørende betonkonstruktioners levetid:

- Beskrivelse af betonens mikromiljø, her tænkes på den aktuelle vandmætningsgrad, kloridbelastningen, alkalibelastningen, m.m., som funktion af vejrets årsvariationer.
- Udredning af skademekanismernes synergistiske effekt, især hvor alkalikiselreaktioner, frost-tø påvirkninger og armeringskorrosion indgår.
- Initialfejl og revners indflydelse på skadernes udvikling.
- Alkalikiselreaktioner
 - Kan initieringstiden bestemmes mere nøjagtigt?
 - Hvilke typer af potentielle reaktive korn reagerer i praksis?
 - De reaktive korns størrelsesfordelings indflydelse på alkalikiselreaktionernes udvikling og forløb.
 - Bestemmelse af kritisk alkaliindhold.
- Frost-tø påvirkninger
 - Eksisterer der en kritisk saltkoncentration hvor frostskeer i beton er størst og er denne materialeafhængig?
- Armeringskorrosion
 - Undersøgelse om kloriddiffusionskoefficienten er konstant.
 - Bestemmelse af det kritiske kloridindhold for start af armeringskorrosion.

Litteratur

I det følgende angives udvalgt litteratur der generelt beskriver betons bestandighed, samt alkalikiselreaktioner, frost-tø påvirkninger og armeringskorrosion i beton.

Bestandighed af beton - generelt

- 1967 Idorn, G. M.: "Durability of Concrete Structures in Denmark. A study of Field Behaviour and Microscopic Features". Teknisk Forlag, København 1967. 208 p.
- 1978 Vejdirektoratet: "Betons holdbarhed - Rapport nr. 1: Indledende undersøgelser af broer med revneskader". Broafdelingen. 1978. 21 + 26 p.
- 1980 Vejdirektoratet: "Betons holdbarhed - Rapport nr. 2: Undersøgelse af udvalgte betonbroer". Broafdelingen. 1980. 66 + 32 p.
- 1981 Vejdirektoratet: "Betons holdbarhed - Rapport nr. 3: Overfladebeskyttelse af betonbroer". Anlægs- og driftsområdet. Broafdelingen. 1981. 25 + 19 p.
- 1983 Vejdirektoratet: "Betons holdbarhed - Rapport nr. 4: Ryå-broen - forsøg med silicabeton". Anlægs- og driftsområdet. Broafdelingen. 1983. 51 + 2 p.
- 1985 Vejdirektoratet: "Betons holdbarhed - Rapport nr. 5: Madum Å-broen - Forsøg med flyveaskebeton". Anlægs- og driftsområdet. Broafdelingen. 1985. 71 + 18 p.
- Herholdt, A. D.; Justesen, C. F. P.; Nepper-Christensen, P. og Nielsen, A.: "Beton-Bogen". CtO 1985. 731 p.
- 1987 Fagerlund, G.: "Betongkonstruktioners Beständighet". Cementsa 1987. 101 p.
- 1991 Andersen, D. B. og Schultz, K.-I.: "Tilstandsvurdering af betonbroer - Fornyet undersøgelse af udvalgte motorvejsbroer". Afgangsprojekt, Bygningsafdelingen, Danmarks Ingeniørakademi. 1991. 79 p.
- 1992 Larsen, E. S.: "Service life prediction and cementitious composites". SBI-rapport 221, Statens Byggeforskningsinstitut. 1992. 76 p.

Alkalikisereaktioner i beton

- 1955 Powers, T. C. og Steinour, H. H.: "An interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction. Part 2 - A hypothesis Concerning Safe and Unsafe Reactions with Reactive Silica in Concrete". ACI Proceedings. Detroit, February 1955. Vol. 51. pp. 785-810. Discussion pp. 812-I - 812-20.
- Powers, T. C. og Steinour, H. H.: "An interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction. Part 1 - The Chemical Reactions and Mechanism of Expansion". ACI Proceedings. Detroit, February 1955. Vol. 51. pp. 497-516.
- 1956 Idorn, G. M.: "Disintegration of Field Concrete". Progress Report N1, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1956. 39 p.
- 1957 Andreasen, A. H. M.; Christensen, K. E. H. og Bredsdorff, P.: "Investigation of the Effect of Some Pozzolans on Alkali Reactions in Concrete". Progress Report L1, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1957. 88 p.
- Jensen, A. T.; Wøhlk, C. J.; Drenck, K.; Andersen, E. K. og Idorn, G. M.: "A Classification of Danish Flints etc. Based on X-Ray Diffractometry". Progress Report D1, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1957. 37 p.
- Nerenst, P.: "Alment om alkalireaktioner i beton". Progress Report A1, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1957. 47 p.
- Plum, N. M.; Poulsen, E. og Idorn, G. M.: "Foreløbig oversigt over alkalireaktioner i beton i Danmark". Ingeniøren. B. København 1957. Nr. 27. 66. årg. Statens Byggeforskningsinstitut. Særtryk 91. 24 p.
- 1958 Christensen, K. E. H.: "Evaluation of Alkali Reactions in Concrete by the Chemical Test". Progress Report H1, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1958. 58 p.
- Gry, H. og Søndergård, B.: "Flintforekomster i Danmark". Progress Report D2, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1958. 63 p.
- Idorn, G. M.: "Concrete on the West Coast of Jutland, Part II". Progress Report B2, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1958. 54 p.
- Idorn, G. M.: "Concrete on the West Coast of Jutland, Part I". Progress Report B1, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1958. 57 p.
- Jeppesen, A.: "Durability and Maintenance of Concrete Structures on Danish Railways". Progress Report B3, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1958. 75 p.

Jones, F. E.: "Investigations of Danish Aggregates at Building Research Station". Progress Report I1, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1958. 62 p.

Meyer, E. V.; Ditlevsen, L. og Andersen, Johs.: "The Alkali Content of Danish Cements - A New Danish Alkali-Resistant Cement - Methods for the Determination of Alkalies in Aggregate and Concrete". Progress Report F123, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1958. 21 p.

Poulsen, E.: "Preparation of Samples for Microscopic Investigation". Progress Report M1, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1958. 46 p.

Trudsø, E.: "Experiments on Concrete Bars. Freezing and Thawing Tests". Progress Report K2, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1958. 39 p.

1959 Søndergård, B.: "Petrografisk undersøgelse af danske kvartære grusaflejringer". Progress Report E1, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1959. 74 p.

1960 Efsen, A. og Glarbo, O.: "Experiments on Concrete Bars. Expansion During Storage in Climate Room". Progress Report K1, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1960. 38 p.

1961 Idorn, G. M.: "Studies of Disintegrated Concrete, Part II". Progress Report N2, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1961. 47 p.

Idorn, G. M.: "Studies of Disintegrated Concrete, Part I". Progress Report N2, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1961. 72 p.

Jeppesen, A.: "Alkaliudvalgets vejledning 2: Vedligeholdelse og istandsættelse af beton- og jernbetonkonstruktioner". Statens Byggeforskningsinstitut. Teknisk Forlag. København 1961. 151 p.

Plum, N. M.: "Alkaliudvalgets vejledning 1: Foreløbig vejledning i forebyggelse af skadelige alkalikisereaktioner i beton". Statens Byggeforskningsinstitut. Teknisk Forlag. København 1961. 60 p.

1962 Bredsdorff, P.; Idorn, G. M.; Kjær, A.; Plum, N. M. og Poulsen, E.: "Chemical Reactions Involving Aggregate". In: Proceedings of the 4th International Symposium in Chemistry of Cement, Washington 1960 - vol 2. National Bureau of Standards. Washington 1962. pp. 749-806.

1964 Idorn, G. M.: "Studies of Disintegrated Concrete, Part IV". Progress Report N2, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1964. 45 p.

Idorn, G. M.: "Studies of Disintegrated Concrete, Part III". Progress Report N2, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1964. 66 p.

- Idorn, G. M.: "Studies of Disintegrated Concrete, Part V". Progress Report N2, DNIBR/ATV Committee on alkali reactions in concrete. 1964. 81 p.
- 1979 Chatterji, S.: "The role of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali-silica reaction". Cement and Concrete Research. Vol. 9. 1979. pp. 185-188.
- 1982 Jensen, A. D.; Chatterji, S.; Christensen, P.; Thaulow, N. og Gudmundson, H.: "Studies of alkali-silica reaction - part 1: A comparison of two accelerated test methods". Cement and Concrete Research. Vol. 12. 1982. pp. 641-647.
- 1983 Idorn, G. M.: "30 years with alkalis in concrete". In: Proceedings from 6th International Conference : Alkalis in Concrete - Research and Practice (Ed. Idorn and Rostam). Copenhagen 1983. pp. 19-38.
- Nielsen, A.: "Sorptions properties of concrete with alkali-silica reactive aggregate". In: Proceedings from 6th International Conference : Alkalis in Concrete - Research and Practice (Ed. Idorn and Rostam). Copenhagen 1983. pp. 195-200.
- Nilson, L.-O. og Peterson, O.: "Alkali-silica reactions in Scania, Sweden - A moisture problem causing pop-outs in concrete floors". Report TVBM-3014. Division of Building Materials. Lund Institute of Technology. Lund, Sweden 1983. 106 p.
- 1984 Jensen, A. D.; Chatterji, S.; Christensen, P. og Thaulow, N.: "Studies of alkali-silica reaction - part 2: Effect of air-entrainment on expansion". Cement and Concrete Research. Vol. 14. 1984. pp. 311-314.
- Nielsen, A.: "Alkali silica reactions and crack development". Nordisk Betong 3-4. 1984. pp. 87-90.
- 1986 Chatterji, S.; Jensen, A. D.; Thaulow, N. og Christensen, P.: "Studies of alkali-silica reaction - part 3: Mechanisms by which NaCl and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ affect the reaction". Cement and Concrete Research. Vol. 16. 1986. pp. 246-254.
- Knudsen, T.: "Alkali-kisel projektet under ATV - Nogle resultater". Dansk Beton. Nr. 3. 1986. pp. 18+19+21+23+25.
- Nielsen, A.: "Alkalikiselreaktioners tidsforløb". TR 164/86. Laboratoriet for Bygningmaterialer. Danmarks Tekniske Højskole. 1986. 16 p.
- Thorsen, T. og Hansen, B. M.: "Alkalikisel-reaktioner i betonprøveemner". Dansk Beton. Nr. 2. 1986. pp. 8+9+11+13+15.
- 1987 Chatterji, S.; Thaulow, N. og Jensen, A. D.: "Studies of alkali-silica reaction - part 4: Effect of different alkali salt solutions on expansion". Cement and Concrete Research. Vol. 17. 1987. pp. 777-783.

- 1988 Andersson, R.; Gram, H.-E.; Malolepszy, J. og Deja, J.: "Alkali-activated slag". CBI Research fo 1:88. Sweden 1988. 104 p.
- Chatterji, S.; Thaulow, N. og Jensen, A. D.: "Studies of alkali-silica reaction - part 6: Practical implications of a proposed reaction mechanism". Cement and Concrete Research. Vol. 18. 1988. pp. 363-366.
- Christensen, P. og Chatterji, S.: "Måling af sands alkalikiselreaktivitet ved hjælp af mørtelprismemetoden". Dansk Beton. Nr. 1. 1988. pp. 20+21.
- Thaulow, N. og Andersen, K. T.: "Ny viden om alkalireaktioner". Dansk Beton. Nr. 1. 1988. pp. 14+16+17+19.
- 1989 Brandt, K.; Thorsen, T. og Munch-Petersen, Chr.: "Alkali-kiselreaktioner i beton". Skov- og Naturstyrelsen, Miljøministeriet. 1989. 106 p.
- Chatterji, S.; Thaulow, N. og Jensen, A. D.: "Studies of alkali-silica reaction - part 5: Verification of a newly proposed reaction mechanism". Cement and Concrete Research. Vol. 19. 1989. pp. 177-183.
- Madsen, P. K.: "Densitetsmetoden". Dansk Beton. Nr. 3. 1989. pp. 26+27+29+30+32+33.
- 1990 Bach, F.: "Bæreevnen af alkalikiselskadede konstruktionselementer". Dansk Beton. Nr. 4. 1990. pp. 20+21+23+24+25.
- Chatterji, S. og Christensen, P.: "Studies of alkali-silica reaction - part 7: Modelling of expansion". Cement and Concrete Research. Vol. 20. 1990. pp. 285-290.
- Jepsen, B. B.: "Bagning - hurtig metode til måling af sands alkalireaktivitet". Dansk Beton. Nr. 1. 1990. pp. 44+45.
- Thøgersen, F. og Gottfredsen, F. R.: "Spændingsopbygning og revneudvikling i betonkonstruktioner med alkalikiselreaktioner". TR 231/91. Laboratoriet for Bygningmaterialer. Danmarks Tekniske Højskole. 1990. 143 p.
- 1991 Strunge, H.; Chatterji, S. og Jensen, A. D.: "Studies of alkali-silica reaction - part 8: Correlation between mortar-bar expansion and Δ values". Cement and Concrete Research. Vol. 21. 1991. pp. 61-65.
- 1992 Munch-Petersen, C. et al: "AKR i broer 1978-81 (foreløbig)". Byggeteknisk Institut, DTI, Hørsholm. 1992. 43 p.
- Frost-tø påvirkninger af beton*
- 1945 Powers, T. C.: "A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete". Journal of the American Concrete Institute. Vol. 16. No. 4. 1945. pp. 245-272.

- 1954 Powers, T. C.: "Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete". Journal of the American Concrete Institute. Vol. 25. No.9. 1954. pp. 741-760.
- 1955 Powers, T. C.: "Basic Considerations Pertaining to Freezing-and-Thawing Tests". American Society for Testing Materials. Vol. 55. 1955. pp. 1132-1155.
- 1962 Helmuth, R. A.: "Capillar Size Restrictions on Ice Formation in Hardened Portland Cement Pastes". In: Proceedings of the 4th International Symposium in Chemistry of Cement, Washington 1960 - vol 2. National Bureau of Standards. Washington 1962. pp. 855-869.
- Nerenst, P.: "Frost Action in Concrete". In: Proceedings of the 4th International Symposium in Chemistry of Cement, Washington 1960 - vol 2. National Bureau of Standards. Washington 1962. pp. 807-834.
- 1964 Haynes, J. M.: "Frost Action as a Capillar Effect". In: Transactions of the British Ceramic Society. Vol. 63. 1964. pp. 855-869.
- 1972 Litvan, G. G.: "Phase Transitions of Adsorbates: IV, Mechanism of Frost Action in Hardened Cement Paste". Journal of The American Ceramic Society. Vol. 55. No. 1. 1972. pp. 38-42.
- 1976 Thorsen, T.: "Måling af Powers afstands faktor ved modificeret linear traverse metode". Nordisk Betong. Nr. 1. 1976. pp. 5-10.
- 1977 Christensen, P. og Chatterji, S.: "Frostbestandigheden af luftblandede cementmørtler". Nordisk Betong. Nr. 4. 1977. pp. 9-12.
- Fagerlund, G.: "The critical degree of saturation method of assessing the freeze-thaw resistance of concrete". Materials and Structures. Vol. 10. No. 58. 1977. pp. 217-253.
- 1980 Bager, D. H. og Sellevold, E. J.: "Ice formation in hardened cement paste II Steam-cured pastes with variable moisture contents". In: Durability of Building Materials and Components, ASTM STP 691 (Ed. Sereda og Litvan). Philadelphia, American Society for Testing and Materials. 1980. pp. 439-454.
- Le Sage de Fontenay, C. og Sellevold, E. J.: "Ice formation in hardened cement paste - I Mature water-saturated pastes". In: Durability of Building Materials and Components, ASTM STP 691 (Ed. Sereda og Litvan). Philadelphia, American Society for Testing and Materials. 1980. pp. 425-438.
- 1981 Fagerlund, G.: "Principer för betongs frostbeständighet". Nordisk Betong. No. 2. 1981. pp. 5-13.
- 1984 Bager, D. H.: "Ice formation in hardened cement paste". TR 141/84. Laboratoriet for Bygningmaterialer. Danmarks Tekniske Højskole. 1984. 66 p.
- 1985 Bager, D. H.: "Beton og frost". Dansk Beton. Nr. 1. 1985. pp. 8-11.
- 1986 Bækmark, K.: "Støbning af beton under vinterforhold". Dansk Beton. Nr. 2. 1986. pp. 33+35.
- Christensen, P.; Jensen, J. H. og Mikkelsen, J.: "Erfaringer om prøvning af beton ved brug af strukturanalyse". Dansk Beton. Nr. 2. 1986. pp. 22+23+25+27.
- 1988 Bache, H. H.: "Fejlvurdering af store porers betydning for betons frostbestandighed". Dansk Beton. Nr. 3. 1988. pp. 19+21.
- Bache, H. H.: "Geometrisk restriktion for dannelse af fin luftporestruktur i beton med lave v/c-tal". Dansk Beton. Nr. 3. 1988. pp. 22-23.
- Gjørsv, O. E.; Okkenhaug, K.; Bathen, E. og Husevåg, R.: "Frost resistance and air-void characteristics in hardened concrete". Nordic Concrete Research. Publ. No. 7. Oslo. 1988. pp. 89-104.
- Jepsen, B. B.: "Skal kravene til luftporestrukturen justeres". Dansk Beton. Nr. 4. 1988. pp. 19.
- Jepsen, B. B.: "Sammenhæng mellem betons v/c-forhold og luftporestruktur". Dansk Beton. Nr. 4. 1988. pp. 10.
- Nielsen, L. F.: "Selvødelæggelse af imprægnerede porøse materialer". TR192/88. Laboratoriet for Bygningmaterialer. Danmarks Tekniske Højskole. 1988. 21 p.
- 1989 Jepsen, B. B. og Christensen, P.: "Hvor mange borekerner skal der indgå i en strukturanalyse?". Dansk Beton. Nr. 1. 1989. pp. 43.
- Nielsen, L. F.: "Frostødelæggelse i porøse materialer - en beregnings-procedure". TR197/89. Laboratoriet for Bygningmaterialer. Danmarks Tekniske Højskole. 1989. 9 p.
- Armeringskorrosion*
- 1979 Tuutti, K.: "Service life of concrete structures - corrosion test methods". In Studies on Concrete Technology. CBI. Stockholm 1979. pp. 227-247.
- 1982 Tuutti, K.: "Corrosion of steel in concrete". CBI Research fo 4:82. Stockholm. 1982. 469 p.
- 1983 Page, C. L. og Vennesland, Ø.: "Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes". Materials and Structures. Vol. 16. No. 91. 1983. pp. 19-25.
- 1985 Hansson, C. M.; Strunge, H.; Markussen, J. B. og Frølund, T.: "The effect of cement type on the diffusion of chloride". Nordic Concrete Research. Publ. No. 4. 1985. pp. 70-80.

Andersen, O. V. og Strunge, H.: "En metode til aktiv korrosionsbeskyttelse af armering i beton". Dansk Beton. Nr. 2. 1988. pp. 8+10+13+17.

Gautefall, O. og Maage, M.: "Durability of concrete - quality criteria". Nordic Concrete Research. Publ. no. 7. Oslo, 1988. pp. 73-88.

Rostam, S. og Buhr, B.: "Katodisk beskyttelse af brostøjler". Dansk Beton. Nr. 2. 1988. pp. 24+25+27+28.

Skovsende, S. og Fangel, B.: "Chlorid i beton". Dansk Beton. Nr. 1. 1988. pp. 24+25+27+28.

Sørensen, B.: "Katodisk beskyttelse af armeringsjern". Dansk Beton. Nr. 2. 1988. pp. 19+20+22+23.

Vesikari, E.: "Service life of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement". Research report no. 553. Technical Research Centre of Finland. 1988. 53 p.

Andersen, O. V.; Thomsen, J. V. og Sørensen, E. A.: "Repair of Chloride-Contaminated Concrete Walls in a Tunnel". IABSE Symposium Lisbon 1989: Durability of Structures. Report 57/2 Zürich IABSE 1989. pp. 701-706.

Hedegård, S. E.: "Flyveaskebeton - Proportionering og tæthed overfor indtrængning af kloridioner og vand". TR 221/90. Laboratoriet for Bygningsmaterialer. Danmarks Tekniske Højskole. 1990. 186 p.

Poulsen, E.: "The chloride diffusion characteristics of concrete - approximative determination by linear regression analysis". Nordic Concrete Research. Publ. no. 9. Oslo 1990. pp. 124-133.

Dhir, R. K.; Jones, M. R. og Ahmed, H. E. H.: "Concrete durability: estimation of chloride concentration during design life". Magazine of Concrete Research. Vol. 43. No. 154. 1991. pp. 37-44.

Henriksen, C.; Stoltzner, E. og Lauridsen, J.: "Kloridbetinget korrosion". Broområdet, Vejdirektoratet. 1991. 60 + 58 p.

Levetidsvurderinger er efterhånden ved at være almindelige ved opførelse eller reparation af betonkonstruktioner. Rapporten er et forprojekt og optakten til et omfattende hovedprojekt, der skal give bedre viden og information om betonkonstruktioners levetid. Der redegøres for anvendelse af praktiske data fra eksisterende arkiver til bestemmelse af egenskabsudviklinger. Endvidere vises eksempler på synergi-effekter af forskellige skadesmekanismer. De i rapporten beskrevne skadesmekanismer er henholdsvis alkaliselreaktioner, frost-tø-påvirkninger og armeringskorrosion.