

Dansk Betondag 1973 i Horsens

● **BETON OG TØSALTE**

●
DANSK BETONFORENING

●
Dansk Betondag 1973 i Horsens

● **BETON OG TØSALTE**

●
DANSK BETONFORENING
●

FORORD

Den foreliggende rapport er resultatet af en undersøgelse iværksat på initiativ af Dansk Betonforening. Formålet med undersøgelsen var at forsøge at afklare problemerne omkring betons holdbarhed over for kombinerede påvirkninger af frost og afisningsmidler.

En gruppe af interessenter tilvejebragte i fællesskab de økonomiske forudsætninger for undersøgelsens gennemførelse, og i december 1971 aftaltes, at Teknologisk Institut skulle forestå undersøgelsen for interessentgruppen, der bestod af:

Betonelement-Foreningen (v/civilingeniør F. Brink Laursen), Aktieselskabet Aalborg Portland-Cement-Fabrik (v/underdirektør, civilingeniør P. Skjoldborg), Vejdirektoratet (v/civilingeniør H. G. Kjær), Landsforeningen Dansk Beton-Industri (v/fabrikant Aa. Brandt og direktør Holger Hansen), Generaldirektoratet for Statsbanerne (v/afdelingsingeniør E. Lavbjerg Madsen), En gruppe af rådgivende ingeniører (v/civilingeniør J. J. Jessen), Entreprenørforeningen.

På Dansk Betonforenings vegne deltog civilingeniør P. Nepper-Christensen i interessentgruppens møder etc.

Arbejdet blev udført af en arbejdsgruppe bestående af:

direktør, civilingeniør J. Fuglsang (Nymølle Betonvarefabrik A/S), ingeniør K. Puckman (Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor), civilingeniør S. H. Sloth (Vejdirektoratet),

udpeget af interessentgruppen, samt

civilingeniør Aa. D. Herholdt (Danmarks Ingeniørakademi, B-afd., Aalborg), civilingeniør F. Heichelmann (Teknologisk Institut).

Opgaven var formuleret som:

AT UNDERSØGE OG UDREDE OM BETONKONSTRUKTIONERS
HOLDBARHED OVER FOR KOMBINERET PÅVIRKNING AF
FROST OG AFISNINGSMIDLER

ved

- a) registrering og karakterisering af skadede betonkonstruktioner, samt registrering af tilhørende data for betonernes delmaterialer, sammensætning, fremstilling og efterbehandling, betonens alder og tilstand ved første påvirkninger af frost og afisningsmidler, samt andre forhold af betydning for udredning af årsager til de aktuelle skader.
- b) indsamling og bearbejdning af tilgængelig og relevant litteratur vedr. betons holdbarhed over for kombinerede påvirkninger af frost og afisningsmidler.
- c) sammenfatning og vurdering af resultaterne fra skadesregistrering og litteraturundersøgelse herunder udarbejdelse af oplæg til eksperimentel afprøvning af opstillede hypoteser for skadesårsager og -mekanismer.
- d) udarbejdelse af foreløbige regler for fremstilling af beton, der er holdbar over for kombinerede påvirkninger af frost og afisningsmidler.

Undersøgelsens resultater er nedfældet i 3 delrapporter, der alle indgår i den foreliggende samlede rapport.

De 3 delrapporter er

- 1) En sammenfattende rapport, der indeholder undersøgelsens konklusion samt en anvisning på fremstilling af beton, der er bestandig over for tørsalte. Denne rapport er udarbejdet af arbejdsgruppen.
- 2) En rapport over en omfattende litteraturundersøgelse vedrørende saltskader på beton. Denne undersøgelse er udført af civilingeniør Aa. D. Herholdt for Teknologisk Institut som et led i sagen. Civilingeniør Aa. D. Herholdt har siden undersøgelsens afslutning foretaget en yderligere bearbejdning af litteraturredaktionen med henblik på anvendelse til undervisningsbrug. Resultatet af denne bearbejdning blev et kompendium "Beton og tørsalte", DIA-B Aalborg 1973. Det er denne seneste version af litteraturredaktionen, der er indeholdt i den foreliggende rapport.
- 3) En rapport, der indeholder oplysninger om registrerede skader på beton som følge af påvirkninger fra frost og tørsalte. Denne

delundersøgelse er udført af arbejdsgruppen, og de indhentede oplysninger er hovedsagelig formidlet af interessentgruppens medlemmer.

Efter tilladelse af interessentgruppen forelægges den samlede rapport hermed for deltagerne i Dansk Betondag 1973 i Horsens.

København, i september 1973

DANSK BETONFORENING

INDHOLD

Arbejdsgruppen: SAMMENFATTENDE RAPPORT

INDLEDNING

SKADEBILLEDET

ØDELÆGGELSESMEKANISMER

VEJLEDNING I FREMSTILLING AF BETON, DER ER BESTANDIG
OVER FOR TØSALTE

Betonens delmaterialer og sammensætning

Betonens komprimering

Betonens hærkning og efterbehandling

Aage D. Herholdt: LITTERATURUNDERSØGELSE

INDLEDNING

SORTERING AF OPLYSNINGER

ALMENT GRUNDLAG

Opløsningers forhold

Cementpastas struktur

LITTERATURGENNEMGANG - HYPOTESER OG DISKUSSION

Principielle overvejelser

Strukturelle ødelæggelsesmekanismer

Fænomenologiske forklaringer

Empiriske regler

OVERSIGT OVER KONKLUSIONER

EFTERSKRIFT: OM PROBLEMETS STATISTISKE SIDE

LITTERATUR

Arbejdsgruppen: SKADESREGISTRERING

ALMENT

REGISTRERING

BESIGTIGELSER OG INTERVIEWS

Skader på betonbroer

Skader på betonbelægninger

Skader på betonvarer m. v.

Perronforkanter

Overfladebehandling

Bilag: Spørgeskema

Beton og tøsulte

Sammenfattende rapport

Jørgen Fuglsang

Finn Heichelmann

Aage D. Herholdt

Knud Puckman

Søren H. Sloth

BETON OG TØSALTE

Sammenfattende rapport

1. INDLEDNING

I de senere år er det i Danmark ligesom mange steder i udlandet blevet mere og mere udbredt at anvende kemiske optøningsmidler til smeltning af is og sne på gader, veje, broer o.s.v.

Anvendelsen af disse stoffer viste sig hurtigt at have forskellige skadelige følgevirkninger f.eks. ødelæggelse af bevoksninger og korrosion på biler.

Også på beton har skader kunnet henføres til anvendelsen af optøningsmidler.

I 1970 tog Dansk Betonforening initiativ til dannelsen af en interessentgruppe, der skulle tilvejebringe de økonomiske forudsætninger for en udredning om skadeårsager og skademekanismer ved nedbrydning af beton som følge af anvendelse af optøningsmidler.

Dette førte i december 1971 til en aftale i interessentgruppen, repræsenterende

Betonelement-Foreningen
Dansk Beton-Industri
Entreprenørforeningen
Foreningen af Rådgivende Ingeniører
Generaldirektoratet for Statsbanerne
Vejdirektoratet
Aalborg Portland-Cement-Fabrik A/S

og Teknologisk Institut om udførelse af undersøgelsen.

Denne bestod dels i en omfattende litteraturundersøgelse og dels i en indsamling af erfaringer fra praksis her i landet.

Arbejdet udførtes af en arbejdsgruppe med repræsentanter fra interessegruppen og fra Teknologisk Institut.

Resultatet forelå som arbejdsrapport i august 1972. Denne er omarbejdet i 3 rapporter, hvoraf den ene omhandler litteraturundersøgelsen, den anden registreringen af skader og den tredje - her foreliggende - sammenfatningen af hele undersøgelsen, herunder en betonteknologisk vejledning.

2. SKADEBILLEDET

De fleste af de tørsaltskader på beton, som arbejdsgruppen har registreret i forbindelse med undersøgelsen kunne henføres dels til, at betonen i kritiske perioder har været mættet med vand f.eks. på grund af utætte fuger og fugtmembraner kombineret med utilstrækkelig dræning og dels til, at betonen ikke har opfyldt de krav, som normalt bør stilles til en beton, der skal være frostbestandig; især har mængden af indblandet luft været for ringe.

Mange af de registrerede skader er netrevner i eller afskalninger af det slamlag, der kan dannes i betonens overflader ved u hensigtsmæssig komprimering. Mangelfuld beskyttelse af betonen mod udtørring i begyndelsen af hærtningsperioden har i enkelte tilfælde været medvirkende til drastiske ødelæggelser i løbet af mindre end et år af de mere udsatte dele af betonkonstruktioner, bl.a. bjælkevederlag på en gangbro.

Bedømmelsen af et skadestilfælde kompliceres ofte af, at skadebilledet kan variere en del fra konstruktion til

konstruktion, ja, fra sted til sted i samme konstruktion afhængig især af forskelle i mulighederne for vands indtrængen i betonen.

Skadebilledet kan ændre sig, efterhånden som nedbrydningen skrider frem og kompliceres af, at de her nævnte påvirkninger ofte vil overlejres af eller vil overlejre andre påvirkninger f.eks. svind- og temperaturkræfter og alkalikiselreaktioner.

På trods af de store forskelle i skadebillederne er det dog muligt at inddele dem groft i 2 hovedtyper, se fig. 1, 2 og 3

1. afskalninger
2. revner

skader fra de 2 hovedtyper vil ofte forekomme sammen.

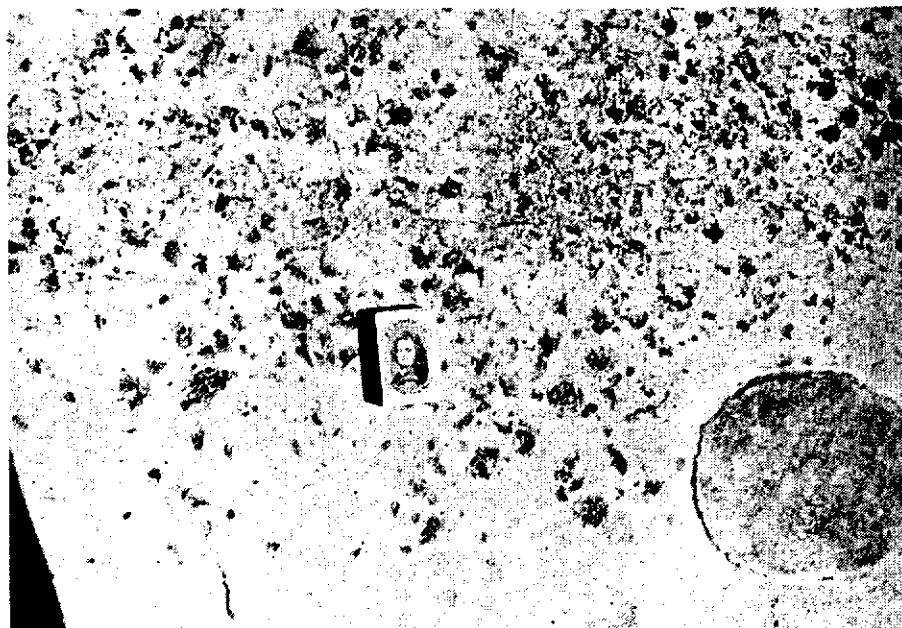


Fig. 1 Afskalninger af slamlag over overvejende tætte partikler.



Fig. 2 Revner i fortovsflade af brokantelement, mest udtalt ved hjørner.



Fig. 3 Fremskreden nedbrydning af kant og hjørner mod kørebane, i fortovsflade af brokantelementer.

Afskalninger vil normalt begynde som afskalninger eller afsprængninger over enkelte gruspartikler for senere at brede sig over større områder.

Afskalninger kan undertiden optræde i forbindelse med almindelige "frostspringere" i porøse stenpartikler, men vil normalt forekomme som afsprængninger af slamlaget over tætte partikler.

Afskalninger er de hyppigst forekommende skader, men har ofte en sådan karakter, at nedbrydningen kan standses, hvis reparation foretages hurtigt, idet betonen under afskalningen normalt er intakt og sund.

Revner har derimod i højere grad tilbøjelighed til at udvikle sig fra overfladiske krakeleringsrevner til mere dybtgående revner og i værste fald til total nedbrydning af betonen.

Det er tænkeligt, at skadebilledet vil afhænge af det anvendte tørsalt, men da NaCl stort set har været enerådende herhjemme har der ikke kunnet skaffes grundlag for at anstille sammenligninger, der har gyldighed under danske forhold.

3. ØDELÆGGELSESMEKANISMER

Når beton beskadiges af tørsalte, vil der i reglen være tale om fysisk nedbrydning af strukturen. Ganske vist kan beton nedbrydes kemisk, men dette forårsages meget sjældent af optøningsmidler, idet brugen af de stoffer, der har vist sig aggressive over for beton er bragt til ophør. Blandt de gængse optøningsmidler er kun CaCl_2 i koncentreret opløsning - og en sådan opstår kun undtagelsesvist ved normal brug - i stand til at angribe beton kemisk. Analogt gælder, at alkalisalte vil kunne

fremkalde eller forstærke skadelige alkalikiselreaktioner i beton med alkalireaktivt tilslag. Både dette forhold og visse stoffers kemiske aggressivitet er imidlertid specifikke virkninger ved bestemte salte. Den ødelæggelsesmekanisme, der er fælles for alle tørsalte, er af fysisk natur.

Fysisk nedbrydning opstår, når den fysiske påvirkning overstiger den mekaniske sammenhængsevne; denne sidste er en funktion af materialestrukturens træk- og forskydningsstyrke. Gennem studier af betons holdbarhed er det klarlagt, at en ødelæggende påvirkning kan fremkomme ved krystallisationstryk, alkalikiselreaktioner og frost samt muligvis termiske og svindbetingede spændinger. Der kan argumenteres overbevisende for den opfattelse, at tørsaltes virkning i det væsentlige består i en ændring af den normale frostpåvirkning, i nogle tilfælde muligvis forstærket ved overlejring af temperaturspændinger.

I holdbarhedsmæssig henseende er minimumskravet til betonen, at den skal være frostsikker, d.v.s. såvel cementpasta som tilslag skal være frostsikker. Tilslaget skal derfor - i hvert fald i stenområdet - bestå af tætte korn og er dermed heller ikke følsomt for den forstærkning af frostpåvirkningen, der forårsages af saltningen.

Vand udvider sig ved frysning ca. 9%, og omdannes al vandet til is, må vandmætningsgraden ikke overstige 0,917, hvis beskadigelse skal undgås. Cementpastaens porestruktur og væskefasens indhold af opløste stoffer bevirker imidlertid, at isdannelsen sker gradvist ned til -78° C, således at vandmætningsgraden i praksis kan tillades at være noget højere end den teoretiske grænse. Det er imidlertid ikke tilstrækkeligt, at den gennemsnitlige vand-

mætningsgrad er tilstrækkelig lav; der må også stilles krav vedrørende fordelingen af de luftfyldte hulrum, der skal give plads for volumenforøgelsen. Den snævre porevidde bevirker nemlig, at strømmingen af vand fra isdannelsesstedet til undvigelsesstedet sker under betydelig modstand, og er strømningsvejen for lang, vil der foran isfronten opbygges et så stort overtryk i vandet, at strukturen overbelastes. Overtrykket har to årsager: For det første resulterer isdannelsen i en rent mekanisk sammenpresning af det endnu ufrosne vand; det heraf frembragte overtryk betegnes hydraulisk tryk. For det andet resulterer udkrystalliseringen af ren is fra en væskefase, der som cementpastaens indeholder opløste stoffer, en lokal koncentrationsforøgelse, således at kapillar- og gelvand ikke længere er i ligevægt. Diffusion af vand fra cementgel til kapillarporer sker hurtigere end diffusion af opløste stoffer den modsatte vej, hvorfor der i cementgelen opstår et svind og i kapillarporerne et overtryk; dette sidste betegnes osmotisk tryk.

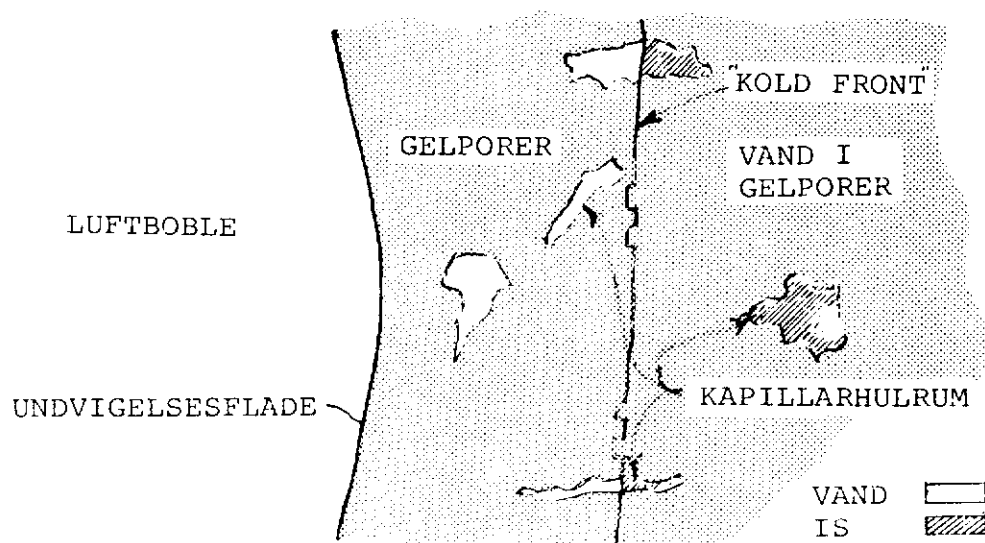


Fig. 4 Skematisk billede af cementpastas porestruktur.

For at aflastningen af overtrykket kan blive tilstrækkelig stor, må afstanden fra et vilkårligt punkt i cementpastaen til den nærmeste undvigelsesflade, den såkaldte afstandsfaktor, ikke overstige en vis værdi, den såkaldte kritiske afstand. Sidstnævnte størrelse kan ikke beregnes kvantitativt, men dens afhængighed af de bestemmende faktorer - cementpastaens styrke og permeabilitet, vandets viskositet, mængden af fryseligt vand og afkølingshastigheden - kan vurderes kvalitativt.

Brug af kemiske optøningsmidler forrykker den rene frostpåvirkning på flere punkter:

1. Den mængde is, der dannes ved en given temperatur, nedsættes, hvilket under i øvrigt lige vilkår reducerer både hydraulisk og osmotisk tryk.
2. Potentiallet for osmotisk tryk svarende til en given frostpåvirkning forøges, hvilket under i øvrigt lige vilkår forøger det osmotiske tryk.
3. Afkølingshastigheden forøges (termisk chok), hvorved såvel hydraulisk som osmotisk tryk øges.
4. Vandmætningsgraden forøges, fordi saltet dels omdanner is og sne til vand, dels fastholder vand, så udtørring af betonen forsinkes eller forhindres. Højere vandmætningsgrad vil under i øvrigt lige forhold give kraftigere påvirkning.

Det må desuden anses for muligt og sandsynligt, at nedbrydning som følge af stedvis kraftig termisk kontraktion kan være en medvirkende ødelæggelsesmekanisme. Generelt vil NaCl give større termisk chok end CaCl_2 .

4. VEJLEDNING I FREMSTILLING AF BETON, DER ER BESTANDIG OVER FOR TØSALTE

Det er muligt at angive regler, der i praksis giver god sikkerhed mod saltskader. Det vil imidlertid også gå godt

i mange tilfælde, hvor disse regler ikke er overholdt.

Betonkonstruktioner, der påvirkes af frost og tørsalte, må henregnes til miljøklasse A i DS 411's definition og nærværende vejledning kan derfor betragtes som en uddybning og udvidelse af de krav og rekommendationer, som er angivet i normen og den tilhørende vejledning for betonen i denne miljøklasse.

Følges vejledningen som en helhed og iøvrigt almindelig god betonpraksis, vil man normalt opnå en tilstrækkelig modstandsdygtig beton.

Dog forudsætter dette, at betonkonstruktionen er udformet og udført sådan, at vand fra nedbør m.v. bortledes effektivt for at undgå vandmætning af betonen, og at betonen ikke overbelastes af andre påvirkninger i konstruktionen, f.eks. fra svind, temperaturvariationer, mekaniske belastninger o.s.v.

Undertiden kan sådanne andre påvirkninger eller andre særlige forhold gøre det nødvendigt eller ønskeligt at fravige nogle af de givne krav. Det skal i sådanne tilfælde erindres, at vejledningen må betragtes som en helhed, og at fravigelse - også på enkelte punkter - kun bør foretages efter en nøje vurdering.

De skader på beton og betonkonstruktioner, man stilles overfor i praksis, vil - som nævnt - oftest være et resultat af et kompleks af ødelæggelsesmekanismer. En mekanisme, f.eks. svind, kan begynde nedbrydningen, og andre, f.eks. frost, fortsætte den, og de kan arbejde i stadig vekslende hinanden.

En betons modstandsevne over for frost og tørsalte afhænger derfor også af, om der er opstået revner på grund af f.eks. udtørringssvind, alkalikiselreaktioner, statisk o-

verbelastning o.s.v.

Når det iøvrigt gælder, at

INGEN BETON KAN TÅLE FRYSNING I
FULDSTÆNDIG VANDMÆTTET TILSTAND

bliver betingelserne for, at en beton skal kunne opnå tilstrækkelig modstandsevne, at den

1. er så tæt over for vand eller en vandig opløsning af optøningsmidler, at vandmætning af betonen vil forsinkes tilstrækkeligt.
2. har så stort et indhold af små fintfordelte luftporer, at der ikke opbygges større hydrauliske eller osmotiske tryk end betonens indre struktur kan optage, når det tages i betragtning, at strukturen i forvejen kan være belastet af f.eks. svind og mekaniske påvirkninger.

Det er især vigtigt, at betonen i overfladen opfylder disse krav, da det først og fremmest er den, der skal modstå påvirkningerne. Desværre er det netop overfladebetonen, der - f.eks. som følge af lokal overvibrering med deraf følgende vandudskillelse og dannelse af slamlag, eller af utilstrækkelig beskyttelse under hærdeningen - er længst fra at opfylde kravene.

4.1 Betonens delmaterialer og sammensætning

Udover kravene i DS 411 til betonens delmaterialer, pkt. 8.2. og sammensætning, pkt. 8.3.2. til beton i miljøklasse A, skal nedenstående krav opfyldes.

De angivne talstørrelser skal opfattes som gennemsnitsværdier for en ensartet god beton, svarende til en omhyg-

gelig udførelse af hele betonarbejdet efter DS 411, kontrolklasse 1 eller 2.

Luftindblanding må i praksis anses for nødvendig; under danske forhold skønnes følgende luftindhold, der for hver enkelt kombination af tabelindgangene ligger henholdsvis 1 og 2% over dem, som anses for nødvendige til beskyttelse mod ren frostpåvirkning, at være passende:

Cementindhold kg/m ³	Maksimalkornstørrelse - mm	
	16	32 og 64
350	5,0 - 6,0%	4,5 - 5,5%
400	5,5 - 6,5%	5,0 - 6,0%
450	6,0 - 7,0%	5,5 - 6,5%

I jordfugtig beton til betonvarer kan det ikke lade sig gøre at indblande luft i sådanne mængder, men det må tilrådes, at også sådanne betoner tilsættes et luftindblandingsmiddel, da også mindre mængder indblandet luft giver en mærkbar forbedring af modstandsevnen over for frost og tørsalte.

Om betonsammensætning iøvrigt kan følgende retningslinier angives:

	almindelig beton		jordfugtig beton til betonvarer
	$d_{\max} = 16 \text{ mm}$	$d_{\max} \geq 32 \text{ mm}$	
C/V-forhold	$\geq 2,0$		$\geq 2,5$
Cementindhold	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$	$\geq 350 \text{ kg/m}^3$	$\geq 450 \text{ kg/m}^3$
Tilslag	1) frostsikkert 2) hensigtsmæssigt graderet 3) højst 5% < 0,25 mm		

Ved jordfugtige betoner til fremstilling af betonvarer stiller selve produktionsudstyret som oftest helt specifikke krav til bl.a. v/c-tal og cementindhold. Erfaringen for anvendelsen af disse betontyper viser, at hvor bøjningstrækstyrken har været større end 50-60 kp/cm^2 , har der ikke været konstateret skader.

4.2 Betonens komprimering

For at betonen skal opnå bestandighed mod frost og tøsulte, er det absolut nødvendigt at komprimere den effektivt, således at den opnår tilstrækkelig kompakthed samtidig med, at alle former for separation undgås, særlig i de udsatte overflader. Normalt vil det være nødvendigt at komprimere betonen ved vibrering. I så tilfælde er det vigtigt at sikre sig, at der ikke ved overvibrering trækkes finmørtel ud som et slamlag på overfladen eller uden på stenene. Risikoen for sidstnævnte effekt aftager med stenstørrelsen.

Anvendelse af ikke-sugende, tætte og glatte formmateriale vil særlig ved formvibrering forøge risikoen for dannelse af slamlag.

Omvendt vil risikoen for slamlagsdannelser reduceres ved anvendelse af sugende formmaterialer eller ved vakuumbehandling.

Er der ved afretningen og glitningen af betonens opside dannet et slamlag, må dette fjernes f.eks. med en gummi-skraber.

Det kan undertiden være nødvendigt at fjerne slamlaget ved slibning eller sandblæsning efter betonens hærkning.

4.3 Betonens hærkning og efterbehandling

Det er vigtigt, at betonen holdes våd den første tid under hærningen, f.eks. ved 20°C i ca. 2 uger og ved 5 °C i ca. 6 uger. Ligeledes er det afgørende, at betonen i den første tid beskyttes mod pludselige ændringer i temperatur og udtørring, især er tiden omkring afformningen og flytningen af evt. varme elementer til lager kritisk.

Det er afgørende, at betonen efter hærningen får tid til virkelig at tørre ud inden den første frostpåvirkning og saltning og derefter får mulighed for lejlighedsvis udtørring.

Mange anser det derfor for risikabelt at udsætte betonveje for saltning den første vinter.

Såfremt konstruktionens afvanding ikke er tilstrækkelig effektiv, kan det være nødvendigt at beskytte betonen mod vandmætning ved en imprægnering af den tørre overflade.

Det mest anvendte imprægneringsmiddel har hidtil været kogt linolie blandet med terpentiner eller petroleum. Denne behandling er normalt kun holdbar 1-2 år. Behandlingen giver en vis misfarvning af betonen.

Det må forudses, at de nærmeste år vil bringe produkter frem på markedet, som dels vil kunne beskytte betonen lige så effektivt og dels vil have en længere holdbarhed.

Afvaskning af betonens overflade efter saltningsæsonens afslutning vil reducere saltophobningen fra år til år og dermed skaderne.

- - - - -

Arbejdsgruppen har som nævnt besigtiget en lang række skader, der i henhold til indberetningen skulle være forårsaget af tørsalte. En meget stor del af skaderne ville imidlertid være opstået også uden medvirken af tørsalte, idet de simpelthen kunne henføres til forsyndelser mod almindelig god betonpraksis. Det må derfor understreges, at de anførte forskrifter for tørsaltbestandig beton er et supplement til de regler, der generelt gælder for fremstilling af holdbar beton.

Specielt kan peges på, at det er illusorisk at forestille sig, at den ønskede kvalitet kan påregnes at være tilstede, hvis ikke det gennem en effektiv kontrol er sikret, at de opstillede krav er overholdt.

Aage D. Herholdt

BETON OG TØSALTE

LITTERATURUNDERSØGELSE

FORORD

Det her foreliggende skrift om "BETON OG TØSALTE" er en videreudvikling af en rapport med titlen "Litteraturundersøgelse vedrørende SALTSKADER PÅ BETON". Den nævnte rapport blev udarbejdet i foråret 1972 som et led i det arbejde, der på initiativ af Dansk Betonforening blev iværksat i slutningen af 1971 med det formål at klarlægge forholdene omkring betons holdbarhed over for kombineret påvirkning af kemiske optøningsmidler og frost.

Litteraturundersøgelsens resultater er bekræftet af en skadesregistrering, der sideløbende blev udført som en del af projektet, og for hvilken der ligeledes blev udarbejdet en rapport. De to rapporter er drøftet på to møder: den 17. august 1972 med repræsentanter for de interessenter, der havde finansieret undersøgelsen, og den 15. januar 1973 med en indbudt kreds af sagkyndige. De dér fremsatte kommentarer blev tillige med resultatet af mit videre arbejde med sagen indarbejdet i rapporten med henblik på benyttelse af denne som kompendium i et valgfrit kursus om specielle betontyper, afholdt på DIA-B i Aalborg i foråret 1973. De erfaringer, der er indvundet ved den forsøgsvis brug af materialet i undervisningen, har givet anledning til enkelte, især rent sproglige justeringer, resulterende i den her foreliggende tekst.

Fremstillingen sigter på en læserkreds med almen betonteknologisk viden. Således forudsættes det læseren bekendt, hvad der forstås ved hensigtsmæssig gradering, effektiv komprimering, gunstige hærdningsvilkår og skadelige alkalikiselreaktioner - for blot at nævne nogle få af de betonteknologiske begreber, der optræder i teksten uden nærmere forklaring.

Aalborg i juni 1973

Aage D. Herholdt

INDHOLD

	side
INDLEDNING	1
SORTERING AF OPLYSNINGER	3
ALMENT GRUNDLAG	4
Opløsningers forhold	4
Osmotiske effekter	4
Varmemæssige fænomener	7
Cementpastas struktur	8
LITTERATURGENNEMGANG – HYPOTESER OG DISKUSSION	11
Principielle overvejelser	11
Et fundamentalt problem	11
Strukturnedbrydning	11
Strukturelle ødelæggelsesmekanismer	12
Kemisk nedbrydning	12
Fysisk nedbrydning	13
Fænomenologiske forklaringer	23
Frysningforløbet	23
Kemiske forhold m.v.	25
Diverse	27
Empiriske regler	29
Divergerende meninger	29
Betonteknologiske foranstaltninger	30
Konstruktive foranstaltninger	40
Andre foranstaltninger	43
Skadesbeskrivelse	43
OVERSIGT OVER KONKLUSIONER	44
EFTERSKRIFT: OM PROBLEMETS STATISTISKE SIDE	49
LITTERATUR	53

INDLEDNING

Litteraturen om emnet er enorm i omfang; en forhåndsundersøgelse afslørede, at litteraturmængden mest hensigtsmæssigt kunne måles i vognlæs. Lidt mindre malende, men med samme reelle indhold, udtrykkes det i en af de benyttede kilder (21): "Der findes næppe inden for betonteknologien noget emne, der er undersøgt i et omfang som dette."

De refleksioner, der naturligt følger, når man stilles over for en sådan oplysning, kan resumeres i følgende punkter:

1. Den fortsatte strøm af litteratur om emnet tyder på, at det trods talrige og omfattende undersøgelser ikke er lykkedes at trænge ind til problemets kerne. Større eller mindre indbyrdes modstrid må forventes, hvilket giver grund til pessimisme med hensyn til mulighederne for at skabe en syntese.
2. Emnet er grundigt belyst både gennem eksperimentelt arbejde og gennem observationer og registrering i marken. Der vil derfor næppe være særligt behov for indsats på dette felt - dog med skadesregistrering som en mulig undtagelse, idet lokale klimaforhold sandsynligvis spiller ind. De fornødne oplysninger må forventes at eksistere i litteraturen; problemet er udvælgelsen og fortolkningen.
3. Det kolossale kildemateriale gør det oplagt urealistisk at ville forsøge at dække al den eksisterende litteratur om emnet.

Ved formuleringen af opgaven har de ledende synspunkter derfor været, at det måtte tilstræbes

1. at ingen væsentlig hypotese overses, og
2. at der ikke spildes unødigt megen tid med forsøg på at løse den muligvis uløselige opgave at skabe en syntese af de i litteraturen beskrevne resultater.

På denne baggrund blev de implicerede parter enige om at definere opgaven som følger:

Udarbejdelse af en oversigt over hypoteser vedrørende skademekanismer og bearbejdning af nævnte oversigt ved at sammenholde og vurdere de forskellige mekanismer ud fra den benyttede litteratur og almen betonteknologisk viden.

Om muligt udarbejdelse af en syntese med hensyn til skadesmekanismer samt betontekniske, konstruktive og andre foranstaltninger.

Arbejdet udføres på grundlag af:

- 1) den hos CtO registrerede litteratur om emnet
- 2) et antal artikler m.v., leveret af civilingeniør S. H. Sloth
- 3) et antal artikler m.v., leveret af civilingeniør U. Romby Nielsen
- 4) sådanne artikler m.v., som Aa. D. H. efter gennemgang af de under 1), 2) og 3) nævnte publikationer finder det rimeligt at supplere med

dog under hensyntagen til den fastlagte udgifts- og tidsramme.

En samlet oversigt over den benyttede litteratur er anført side 53.

Listen er som forudsat i opgavedefinitionen fremkommet som en sum af fire bidrag, nemlig

- 1) registreret hos CtO: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 51, 52, 53, 56, 59, 60, 62, 74, 75, 76.
- 2) leveret af S. H. Sloth: 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42.
- 3) leveret af U. Romby Nielsen: 70, 71.
- 4) suppleret af Aa. D. H.: 49, 50, 54, 55, 57, 58, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 72, 73, 77.

* * *

Det er tilstræbt, at alle væsentlige oplysninger er studeret i originalarbejdet. I konsekvens af det ovenfor anførte om litteraturmængden og på grund af de ret snævre tidsmæssige rammer for løsningen af opgaven har det ikke været muligt fuldt ud at efterleve dette princip. I et vist omfang har andenhåndsuplysninger derfor måttet inddrages, især naturligvis til afrunding og supplerings, altså i mindre centrale dele af arbejdet. For at give læseren mulighed for selv at vurdere, hvilken vægt der bør lægges på dette forhold, er kildehenvisninger, der angår sådanne oplysninger, som i de pågældende arbejder har karakter af referat fra andre, i denne undersøgelse ikke direkte benyttede kilder, forsynet med en stjerne.

SORTERING AF OPLYSNINGER

Den samling oplysninger, der er undersøgelsens objekt, er stor, broget, ujævn i lødighed og vanskelig at overskue. Når de mange resultater og påstande skal sammenholdes og vurderes - og eventuelt sammenfattes - er det uomgængeligt nødvendigt, at man råder over en fælles referenceramme, der kan benyttes til at skabe et mønster i brikkerne. Til dette formål har jeg fundet det hensigtsmæssigt at definere nogle kategorier til grovsortering af de enkelte oplysninger.

Den første kategori indeholder erfaringsmæssige observationer knyttet til betonteknologiske parametre af arbejdspladsgrovhed. Eksempelvis har man konstateret, at en nødvendig betingelse for holdbarhed over for tørsalte og frost er et vist mindste C/V-forhold, at luftindblanding er gavnlig, og at linolieimprægnering af overfladen virker beskyttende. Taget under et kan indholdet i denne kategori karakteriseres som empiriske regler.

Medens den første kategori i det store og hele er præget af konstateringer uden forsøg på forklaringer, er den anden kategori kendetegnet ved, at observationerne søges korreleret med forskellige fysiske parametre - dog stadig i makroskopisk målestok. Et typisk eksempel er forklaringen på afisningsskaderne som resultat af det termiske chok, der fremkommer, når smeltevarmen trækkes ud af betonen. Nogen dyberegående forklaring er der sjældent tale om - det anførte eksempel tager bl.a. ikke hensyn til, at det netop er beton, der udsættes for den omhandlede påvirkning - og en rimelig betegnelse for denne kategori vil nok være fænomenologiske forklaringer.

Skal man gøre sig håb om at nå til bunds i problemet, må man imidlertid gøre sig klart, at holdbarhedsskader består i en nedbrydning af strukturen, og at den struktur, der er tale om, er betons. Den tredje og fundamentale kategori er derfor de strukturelle ødelæggelsesmekanismer.

Da kategori 3 er nøglen til de to andre, vil det være naturligt at behandle den først. Til støtte for forståelsen er indledningsvis som alment grundlag fremdraget nogle forhold af særlig betydning i den foreliggende sammenhæng inden for emnerne opløsningers forhold og cementpastas struktur.

ALMENT GRUNDLAG

Dette kapitel indeholder en kortfattet fremstilling af de almene forhold vedr. opløsninger og cementpastas struktur, hvortil der er refereret i de følgende kapitler.

OPLØSNINGERS FORHOLD

En opløsning adskiller sig på en lang række punkter fra det rene opløsningsmiddel; de forandringer, der er relevante i den foreliggende sammenhæng, hører alle til kategorien osmotiske effekter. Af betydning for saltets virkemåde som optøningsmidler er desuden de varmemæssige fænomener, der ledsager dannelsen af opløsningen ud fra dens komponenter.

Osmotiske effekter

De osmotiske effekter er damptryksformindskelsen, det osmotiske tryk, frysepunktsdepressionen og kogepunktsforhøjelsen; sidstnævnte er her uden interesse. De osmotiske effekter hænger indbyrdes sammen, idet det osmotiske tryk, frysepunktsdepressionen og kogepunktsforhøjelsen er konsekvenser af damptryksformindskelsen, hvilket igen har til følge, at de osmotiske effekter alle afhænger af det opløste stofs koncentration på samme måde.

Damptryksformindskelsen

For en fortyndet vandig opløsning gælder Raoult's lov:

$$- \frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{55,5} m,$$

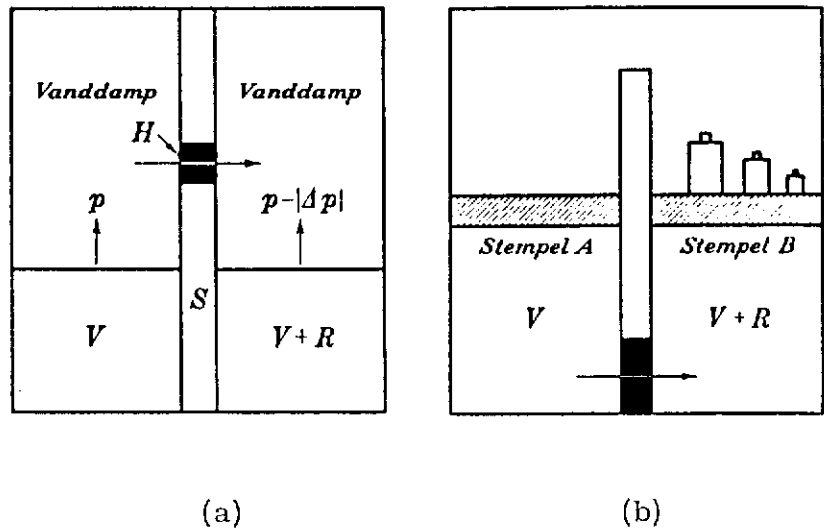
hvor m er opløsningens molalitet (63).

Det osmotiske tryk

Figur 1 er hentet fra (63), og Asmussens forklaring til figuren lyder: "Figur 1 a illustrerer et modelforsøg, hvor vand V og rørsukkeropløsning $V + R$ er rumligt adskilt ved hjælp af skillevæggen S , som hverken tillader vand- eller rørsuktermolekyler at passere. Ved den

Figur 1.
Modelforsøg
til illustra-
tion af osmo-
tiske fæno-
mener.

Efter (63)

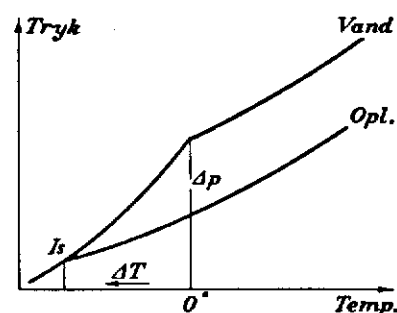


givne temperatur er det rene vands damptryk p , og opløsningens vanddamptryk er $p - |\Delta p|$. Når vi åbner ved H , vil dampen overføres fra venstre til højre i trykfaldets retning, d.v.s. vand transporteres fra den flydende vandfase til venstre gennem dampfasen over i den fortyndede rørsukkeropløsning (isoterm destillation). Vandets naturlige tendens til at blande sig med rørsukkeropløsningen kommer således til udfoldelse gennem dampfasen, der så at sige virker som semipermeabel (halvgennemtrængelig) "membran" for vand. Denne proces er irreversibel ligesom den spontane blandingsproces, der forløber, når 2 flydende faser er i direkte kontakt. Den nævnte reaktionstendens består også, selv om processen ikke realiseres. I figur 1 b er vist et andet modelforsøg, hvor dampfasen er udelukket. På hver af de flydende faser er anbragt et stempel (skraveret), og de 2 væsker er adskilt fra hinanden ved hjælp af en semipermeabel membran, som tillader passage af vand, men ikke af rørsukker. Vi antager, at stemplerne A og B er lige tunge, og at de bevæger sig gnidningsfrit. Vandmolekylerne går gennem membranen i pilens retning, hvorved stemplet B hæves og A sænkes. Processen vil fortsætte, indtil rørsukkeropløsningens koncentration er aftaget til praktisk talt værdien nul. Dette fænomen kaldes osmose. Når forsøget udføres som her beskrevet, er blandingsprocessen irreversibel. Vi kan imidlertid også lede processen reversibelt. Ved hjælp af lodder anbragt oven på stemplet B, er vi i stand til at eksperimentere os til en belastning af dette, som netop forhindrer stemplet i at bevæge sig. Hvis vi belaster B med en vægt, som er uendelig lidt mindre,

Figur 2. Damptrykskurver for is, vand og vandig opløsning.

Figuren illustrerer, at frysepunktsdepressionen er en konsekvens af damptryksformindskelsen.

Efter (63)



vil B bevæge sig op efter med uendelig lille hastighed. Opløsningsmidlet blandes reversibelt og isotermt med opløsningen. Belaster vi B med en vægt, som er uendelig lidt større end ligevægtsbelastningen i det første forsøg, vil B bevæge sig uendelig langsomt nedad. Opløsningsmidlet transporteres nu isotermt og reversibelt fra opløsningen over i rummet med rent vand. Ligevægtsbelastningen pr. arealenhed af stemplet angiver et tryk. Det tryk, som opløsningen skal underkastes, for at der skal være ligevægt mellem rent opløsningsmiddel og opløsning, kaldes det osmotiske tryk."

Frysepunktsdepressionen

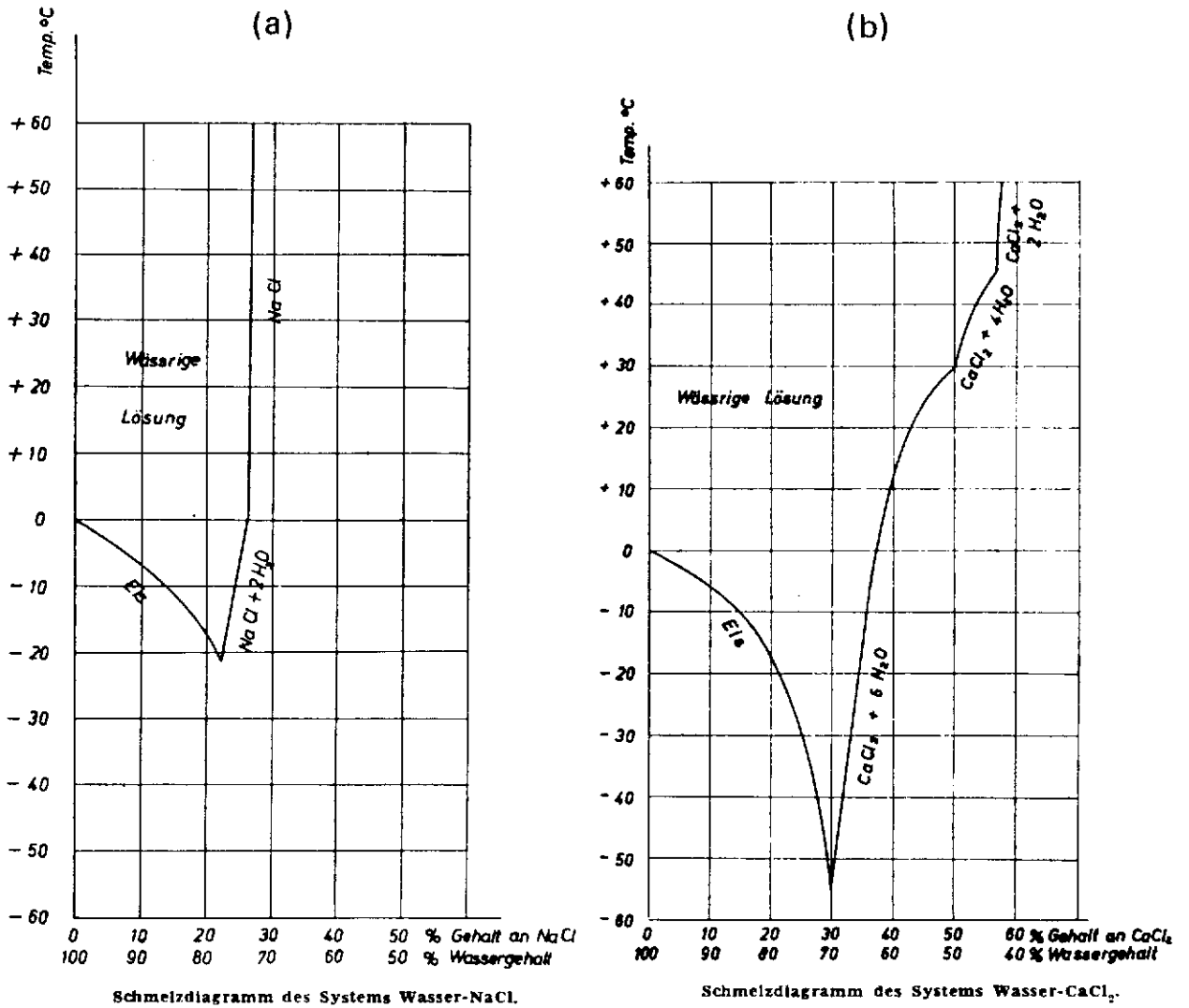
Figur 2 er ligeledes hentet fra (63), og den tilhørende forklaring lyder: "Ved en vandig opløsnings frysepunkt er der ligevægt mellem is og opløsning. En betragtning af damptrykkurverne i figur 2 viser, at opløsningen fryser ved en lavere temperatur end opløsningsmidlet. Frysepunktsformindskelsen er desto større, jo større det opløste stofs koncentration er."

For en fortyndet vandig opløsning gælder

$$- \Delta T_{\text{frpt}} = 1,86 m,$$

hvor m er opløsningens molalitet (63).

For ikke-fortyndede opløsninger gælder den lineære sammenhæng ikke, og man er da henvist til at benytte fuldstændige fasediagrammer. Sådanne er for de almindeligst benyttede optøningssalte NaCl og CaCl_2 vist som figur 3.



Figur 3. Temperatur-blandingsdiagrammer for systemerne NaCl-H₂O (a) og CaCl₂-H₂O (b).

Efter (58)

Varmemæssige fænomener

Optøningsmidlernes virkning beror på, at de sammen med is danner systemer, hvis frysepunkter er lavere end rent vands, således at blandingen opløsningsmiddel-is er termodynamisk instabil, jf. fase-diagrammerne figur 3. En del af isen vil derfor smelte, og med det praktisk forekommende klima er det muligt at afpasse saltmængden, så al isen smelter.

Omdannelse af is til vand kræver 79,6 cal/g. Imidlertid vil dannelsen af en opløsning ud fra komponenterne også være ledsaget af en

varmetoning, for NaCl sker opløsningen eksempelvis under varmetofbrug, for CaCl₂ under varmeudvikling. Det samlede varmeregnskab er naturligvis koncentrationsafhængigt, men for de nævnte to salte vil altid gælde, at smeltning ved hjælp af NaCl kræver flere kalorier end smeltning ved hjælp af CaCl₂. Da kalorierne i det væsentlige trækkes ud af betonen og kun i ubetydeligt omfang kan tages fra luften og opløsningen selv, vil NaCl altså i princippet udsætte betonen for et større "kuldechok" end CaCl₂ (7, 58).*)

CEMENTPASTAS STRUKTUR

I henhold til (46) er det til det aktuelle formål tilstrækkeligt at beskrive cementpastaen som en struktur bestående af cementgel, hulrum (kapillarporer) og eventuelt rester af uhydratiseret cement. Den dominerende bestanddel i cementgelen er et urent kalcium-silikat-hydrat af kolloide dimensioner, almindeligvis betegnet tobermoritgel. Partikelfasen i cementgelen udgør ca. 72 volumenprocent, medens de sidste 28% er porer, de såkaldte gelporer, der er tilgængelige for vand, det såkaldte gelvand. Dette sidste hører til det fordampelige vand, d.v.s. det bortgår ved tørring ved 105°C. Gelporerne har en gennemsnitlig porevidde på 15 Å - d.v.s. ca. 5 x diameteren af et vandmolekyle - men varierer fra nul til en ukendt værdi større end 15 Å.

Udover gelporer indeholder cementpastaen altid kapillarporer, d.v.s. oprindeligt vand- eller luftfyldte hulrum, der ikke under hydratiseringen er blevet udfyldt med cementgel. Tværmålet skønnes at ligge fra 2 til $50 \cdot 10^{-6}$ cm (58*).

Ved hjælp af særlige tilsætningsstoffer kan det lade sig gøre at indblande luft i cementpastaen i form af små, tætliggende bobler, der i modsætning til de stærkt uregelmæssige gel- og kapillarporer har kugleform. For diameteren af sådanne bobler angiver (58*) 0,02 mm og 0,5 mm som ydergrænser, 0,05 til 0,2 mm som det sædvanligvis opnåede i praksis.

Poreforholdene i cementpasta er illustreret i figur 4. Der er ikke tale om noget egentligt billede af cementpastaens struktur, men om

*) Dette forhold er nærmere omtalt side 26.

Figur 4.
Model af
cement-
pastas
struktur.
Efter (77)

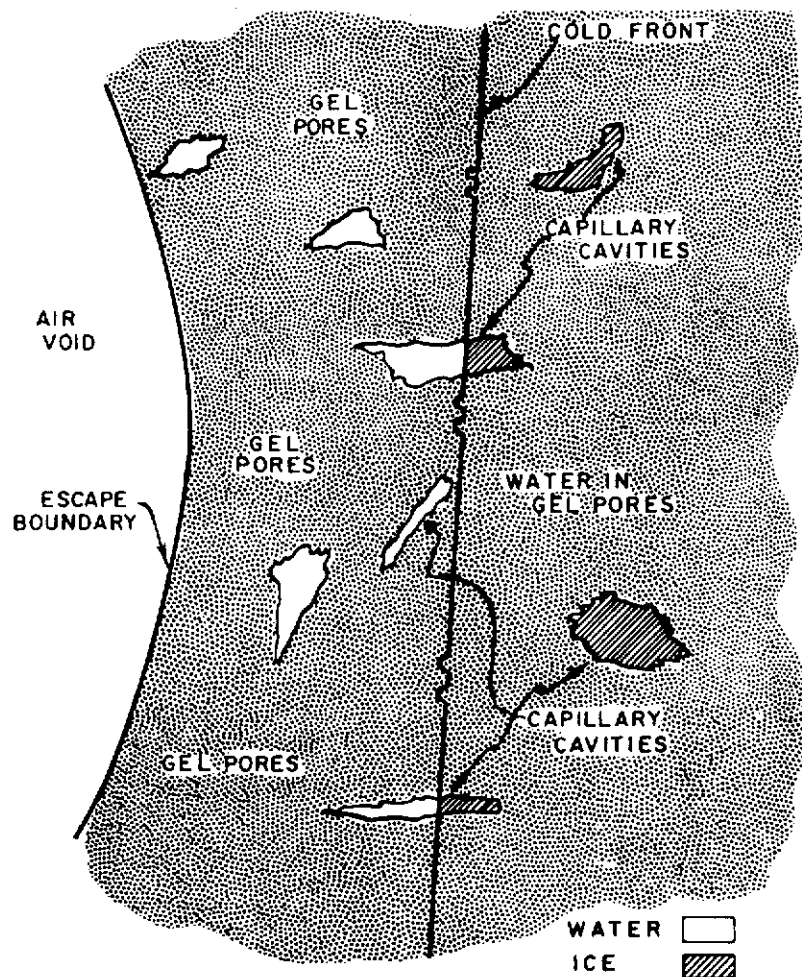


Figure 4.1—Diagram of the pore structure of portland cement paste, based on studies by Powers. If the air void (left) were of average size and drawn to scale, curvature would hardly be discernible in a diagram of this size.

Gelporer:	15 Å i middel	$15 \cdot 10^{-10}$ m
Kapillarporerer:	$2 - 50 \cdot 10^{-6}$ cm	$1.500 \cdot 10^{-10}$ m
Indblandede luftbobler:	0,02 - <u>0,05</u> - 0,2 - 0,5 mm	$1.500.000 \cdot 10^{-10}$ m

en model, hvoraf de enkelte bestanddele og deres indbyrdes størrelsesforhold fremgår.

Som begrundelse for at fremhæve porestørrelsen angiver (46), at denne faktor er vigtig med henblik på vands omdannelse til is. En almindelig isklump kan under atmosfæretryk eksistere ved 0°C , men et meget lille krystal smelter ved denne temperatur. Jo mindre krystal des lavere er den temperatur, der skal til for at forhindre det i at smelte. Det viser sig, at det krystalstørrelsesinterval, for hvilket smeltepunktet er en funktion af størrelsen, ligger inden for det

Tabel 1.
Efter (46)

Calculated relationship between size of ice crystal and melting point, and size of capillary able to contain the crystal (Helmuth)			
Melting point		Crystal size, A	Capillary size, A
$^{\circ}C$	$^{\circ}F$		
- 2	28.4	180	208
- 6	21.2	58	83
-10	14.0	36	59
-15	5.0	24	44
-20	-4.0	18	35

porestørrelsesområde, der findes i cementpastaen. Ved $0^{\circ}C$ kan isdannelsen efter teoretiske beregninger kun finde sted i kapillarporer, der kan indeholde krystaller på $0,1 \mu m$ og derover. Sammenhængen mellem temperatur, krystalstørrelse og kapillarstørrelse fremgår i øvrigt af tabel 1.

* * *

Det skal sluttelig nævnes, at væskefasen i cementpasta ikke består af rent vand, men af en opløsning, fortrinsvis af alkalier (46), således at osmotiske effekter kan optræde i cementpasta, også uden at den har været udsat for saltning.

LITTERATURGENNEMGANG - HYPOTESER OG DISKUSSION

PRINCIPIELLE OVERVEJELSER

Et fundamentalt problem

Powers har engang udtalt følgende: "De af os, som studerer beton, har måske i en eller anden grad tilladt vore perspektiver at blive fortegnede, muligvis gennem beskæftigelse med frysning- og optøningsforsøg i laboratoriet. Skønt sådanne forsøg næsten altid forårsager skader på eller ødelæggelse af laboratorieprøvelegemerne, behøver vi blot at se os om udendørs for at finde utallige bygværker og tusinder af kilometer vejbelægning, som ikke viser tegn på ødelæggelse ved frysning." (46).

Man kan således næppe gøre sig større forhåbninger om at få laboratorieresultater og markobservationer til umiddelbart at forliges, og de to kategorier af oplysninger må derfor udnyttes under hensyn til deres respektive stærke sider. Laboratorieforsøgenes force er den nøje kontrol med de indgående faktorer, og resultaterne må derfor anses for egnede som grundlag for udredning af de enkelte skademekanisters årsagsforhold. Til gengæld er markobservationerne at foretrække, når det gælder om at belyse, hvad det er, der bevirker, at det så forbløffende ofte går godt. En almengyldig konklusion herom er dog naturligvis betinget af, at markobservationerne vurderes på baggrund af en klar teori vedr. de strukturelle ødelæggelsesmekanismer.

De disponible kilder er søgt udnyttet i overensstemmelse med disse synspunkter.

Strukturnedbrydning

Beskadigelse er det samme som nedbrydning af strukturen. Nedbrydningen kan være kemisk, fysisk eller kombineret kemisk og fysisk, i hvilket sidste tilfælde de to former sandsynligvis vil virke gensidigt forstærkende.

Den kemiske nedbrydning er karakteristisk ved, at et aggressivt stof reagerer med en eller flere af betonens bestanddele, og at selve reaktionen foregår uafhængigt af de mekaniske spændingstilstande.

Den fysiske nedbrydning opstår, når den fysiske påvirkning overstiger den mekaniske sammenhængsevne; nedbrydningen sker uden kemisk ændring af bestanddele i betonen.

Da fysisk nedbrydning er et spørgsmål om påvirkningens størrelse i forhold til styrken, kan det uden videre slås fast, at faktorer, der påvirker holdbarhedsegenskaberne, enten giver et bidrag til påvirkningen - positivt eller negativt - eller har indflydelse på styrken. Det skal bemærkes, at den styrkeparameter, der er tale om, næppe kan måles, men at den må tænkes at være en funktion af træk- og forskydningsstyrken i cementgelens partikelskelet.

STRUKTURELLE ØDELÆGGELSESMEKANISMER

Kemisk nedbrydning

Det er en kendt sag, at en række salte er aggressive i forhold til cementpasta (19). Eksempler er nævnt bl.a. i (7), (19) og (29), men brugen af sådanne salte som optøningsmidler er bragt til ophør i takt med erkendelsen af deres aggressivitet (7, 29). Et almindeligt benyttet salt som CaCl_2 er ikke aggressivt i fortyndet opløsning, men en mættet opløsning angriber cementpastaen kemisk (1, 19); dette hænger sammen med, at den fortyndede opløsning er basisk, den mættede sur ($\text{pH} = 5,5$) (1), og at opløsninger med $\text{pH} < 6,5$ skader betonen (19). NaCl udviser derimod en pH -værdi på 7,0 ved enhver koncentration (1).

Der er imidlertid bred enighed om, at kemiske angreb hører til de sjældne undtagelser, og at skader fra optøningsmidler må tilskrives fysiske eller fysisk-kemiske virkninger. De tre vigtigste argumenter herfor er følgende:

1. Samme skadebillede kan fremkaldes af kemisk set vidt forskellige stoffer (67, 46).
2. Skaderne er for alle salte størst ved koncentrationer på omkring 2-4%. En sådan koncentrationsafhængighed er utænkelig som generel regel, omend ikke for det enkelte salt (58*, 61, 46).

3. Luftindblanding ændrer ikke betonens kemiske reaktionsforhold, men modstandsevnen over for optøningsmidler forbedres markant (21).

Argumentationen støttes af oplysninger i (5), hvor skadesgraden for beton lagret i forskellige opløsninger (uden frost og tøj) er sammenholdt med henholdsvis anion-, kation- og samlet koncentration. Kun den samlede koncentration gav nogen korrelation, hvilket taler imod skaderne som resultat af specifikke kemiske reaktioner og peger i retning af en eller flere osmotiske effekter som forklaringen.

Det må derfor konkluderes, at langt den overvejende del af de skader, der af optøningsmidler forårsages på beton, ikke er af kemisk natur.

Fysisk nedbrydning

Problemstilling

Problemet består i at finde ud af, på hvilken måde optøningsmidler skader beton, når sagen ansues på mikrostrukturniveau. Det første spørgsmål, der melder sig, er, om det skulle være muligt at forklare saltpåvirkningen som en forstærkning - evt. i modificeret form - af en af de øvrige påvirkninger, der vides at kunne skade beton. Man kan her tænke på ødelæggelsesmekanismer som krystallisationstryk, alkalikiselreaktioner og frost samt muligvis termiske og svindbetingede spændinger.

Krystallisationstryk

Muligheden for ødelæggelse på grund af tryk fra krystaller, der udfældes under volumenforøgelse, nævnes i (1) og (58). For at påvirkningen skal kunne blive større end ved frysning, må imidlertid volumenforøgelsen ved saltkrystalliseringen være større end ved iskrystallisering for alle anvendte salte, hvilket ikke er tilfældet. Hertil kommer, at udkrystallisering af salte kræver overeutektiske opløsninger (smlg. f. eks. figur 3), og da saltningen af økonomiske grunde sker sparsomt, vil sådanne koncentrerede opløsninger kun undtagelsesvis forekomme. Muligheden for saltkrystaldannelse ved afkøling kan derfor udelukkes (58).

(58) nævner "retningsbestemt krystallisation" som en teoretisk mulighed, men modbeviser den selv.

Alkalikiselreaktioner

Anvendelse af natrium- (eller for den sags skyld kalium-) salte til optøningsformål skaber teoretisk mulighed for, at alkalikiselreaktioner opstår eller forværres. Muligvis kan den større skadesintensitet ved NaCl end ved CaCl_2 i visse tilfælde og i nogen grad henføres hertil, men som generel skadesmekanisme må alkalikiselreaktioner forkastes med ord til andet samme begrundelse som den, hvormed kemisk nedbrydning blev det, se side 12.

Frysning og optøning

Betons holdbarhed over for optøningsmidler kan ikke bedømmes ud fra dens opførsel under frost og tø. Denne påstand fremsættes bl. a. i (2), og ingen af kildematerialets forfattere antaster den. Ikke desto mindre synes frostpåvirkningens mekanisme at være det udgangspunkt, der tillader flest muligt af de observerede fænomener ved påvirkning af optøningsmidler bragt ind under en fælles tolkning. En særlig overbevisende argumentation herfor er givet af Powers, og nedenstående gennemgang er i det væsentlige bygget op over hans ideer, sammenholdt med enkelte andre oplysninger i litteraturen.

Brug af optøningsmidler er ifølge sagens natur nøje knyttet til forekomsten af temperaturer under frysepunktet. I holdbarhedsmæssig henseende er minimumskravet til betonen derfor, at den skal være frostsikker. Dette indebærer, at såvel cementpasta som tilslag skal være frostsikre. For tilslaget vil dette i realiteten være ensbetydende med, at kornene - i hvert fald i stenområdet - skal være tætte, og sådanne korn er heller ikke følsomme for de forstærkninger af frostpåvirkningen, der forårsages af saltningen. Opmærksomheden kan derfor koncentreres om cementpastaen.

Vands omdannelse til is sker under en volumenforøgelse på ca. 9%. Såfremt denne volumenforøgelse ikke kan finde plads i den beholder, vandet er indesluttet i, opstår et tryk, der ved fuldstændig hindret udvidelse når op på en størrelse af 2000 kp/cm^2 (17). Dette oversti-

ger langt, hvad cementpastaen kan optage, og indledningsvis kan det derfor konstateres, at ingen beton kan tåle frysning i fuldstændig vandmættet tilstand.

Tænker man sig, at al vandet omdannes til is, og negligeres cementpastaens (ringe) evne til elastisk udvidelse, må vandmætningsgraden være mindre end $1:1,09 = 0,917$, hvis isdannelsen skal kunne finde sted uden skadelig påvirkning af strukturen. Denne teoretisk begrundede øvre grænse for bruttovandmætningsgraden er imidlertid af flere grunde utilstrækkelig som frostsikkerhedskriterium.

For det første er vands frysepunkt en funktion af porevidden (jf. tabel 1, side 10), således at omdannelsen til is sker gradvist over intervallet 0 til -78°C (69). Det vil derfor være meget sjældent, at al vandet fryser til is, hvortil kommer, at den allerede dannede is har en 5 x så høj varmeudvidelseskoefficient som beton og følgelig undergår en tilsvarende større kontraktion under afkølingen. Alt i alt kan den gennemsnitlige vandmætningsgrad derfor tillades at være noget højere end den teoretiske grænse; (69) anfører, at den kritiske vandmætningsgrad empirisk er påvist at måtte ligge over 0,96 - heri indbefattet hensyntagen til cementpastaens evne til at tåle en vis beskedne trækspænding.

For det andet er det ikke tilstrækkeligt, at den gennemsnitlige vandmætningsgrad er tilstrækkelig lav; der må også stilles krav vedrørende fordelingen af de hulrum, hvori det ved frysningen frembragte overskudsvolumen skal optages. Omdannelsen af vand til is finder sted, efterhånden som frosten trænger frem gennem betonen; dette sker med en hastighed, der er bestemt ved samspillet mellem varmeafgivelsen til omgivelserne og den ved afkølingen frigjorte varme, hvortil isens størkningsvarme giver et væsentligt bidrag, d. v. s. virker forsinkende. Den først dannede is i en kapillarpore vil ved sin ekspansion sammentrykke det endnu ufrosne vand, hvori der følgelig vil opstå et overtryk, det såkaldte hydrauliske tryk. Overtrykket vil presse vandet i retning af steder i strukturen, hvor der er plads, og derved selv reduceres. For en cementpasta med given permeabilitet gælder det, at jo længere vej der er til det nærmeste undvigelsessted, desto større vil strømningsmodstanden være, og desto mindre bliver aflastningen af det hydrauliske tryk. En betingelse for, at det

hydrauliske tryk bringes ned under den grænse, der svarer til, hvad cementpastaen kan optage i form af elastiske deformationer, er følgende, at afstanden fra et hvilket som helst punkt i pastaen til en undvigelsesflade er mindre end en vis kritisk størrelse, også kaldet den kritiske afstand.

Frostsikkerhedskriteriet kan i henhold til (69) udtrykkes ved

$$f(D) < \frac{K \cdot B}{\eta \cdot 0,09 \cdot w_f \cdot \frac{dm}{dN} \cdot \frac{dN}{dt}}$$

hvor D er et mål for den maksimale værdi af afstanden fra et vilkårligt punkt til den nærmeste undvigelsesflade ("afstandsfaktoren")

$f(D)$ er en monotont voksende funktion af D

K er cementpastaens permeabilitet

B er en styrkeparameter for cementpastaen (jf. side 12)

η er vandets viskositet

w_f er vandets rumfang

m er den brøkdel af vandet, der fryser til is

N er temperaturen

t er tiden

d. v. s. $\frac{dm}{dN}$ er tilvæksten i den frosne brøkdel af vandet pr. grads temperaturfald

$\frac{dN}{dt}$ er afkølingshastigheden

Størrelsen $w_f \cdot \frac{dm}{dN} \cdot \frac{dN}{dt}$ er således isdannelsehastigheden.

Kriteriet udtrykker betingelsen for, at frysning ikke fører til beskadigelse af cementpastaen. Da funktionen f er monotont voksende, er den opskrevne ulighed ensbetydende med $D < D_{\text{krit}}$. Frostsikkerhedskriteriet kan ikke benyttes til beregning af D_{krit} , men det tillader en vurdering af de enkelte faktorerens betydning, herunder specielt hvilken virkning der må forventes på frostsikkerheden ved indgreb, der ændrer de indgående parametre.

* * *

De hidtil anstillede betragtninger har alene haft at gøre med følgerne af volumenforøgelsen ved vands omdannelse til is, altså en rent fysisk effekt. Imidlertid kompliceres sagen af, at væskefasen i ce-

mentpastaen ikke består af rent vand, men en vandig opløsning af en række stoffer bl.a. alkalier, jf. s. 10. Da isens evne til at optage sådanne stoffer i fast opløsning er bogstavelig talt nul, vil frysningen resultere i udkrystallisering af ren is, således at koncentrationen af opløste stoffer i den endnu ufrosne del af væsken stiger. Koncentrationsforhøjelsen skabes selvsagt i den del af væsken, der grænser op til den dannede is, og vil følgelig starte - og i de fleste tilfælde begrænse sig til - kapillarporerne, hvis væskeindhold derved kommer ud af ligevægt med gelvandet.

Koncentrationsforskellen mellem kapillar- og gelvand vil søges udlignet gennem diffusion, derved at vand diffunderer fra gelporer til kapillarporer og opløste stoffer den modsatte vej. Slutfacit vil naturligvis blive fuldstændig koncentrationsudligning, men som Powers anfører i (46), vil de to diffusionsprocesser være tidsmæssigt forskudt i forhold til hinanden, fordi det vandvolumen, der er i stand til at bevæge sig ind i kapillarporerne, er langt større end det volumen opløste stoffer, der kan bevæge sig den modsatte vej. Der sker derfor en nettotransport af stof fra gel- til kapillarporer, således at der udvikles et osmotisk tryk af en sådan størrelse, at det holder ligevægt med diffusionstrykket fra gelen. Det osmotiske tryk afhænger altså af koncentrationsforskellen mellem opløsningerne i kapillar- og gelporer.

Der kan måske være grund til at gøre opmærksom på, at osmotisk og hydraulisk tryk kun adskiller sig fra hinanden i deres årsag, ikke i deres virkning, idet denne sidste i begge tilfælde hidrører fra, at et bestemt porevolumen er bragt til at rumme mere væske, end der er plads til.

* * *

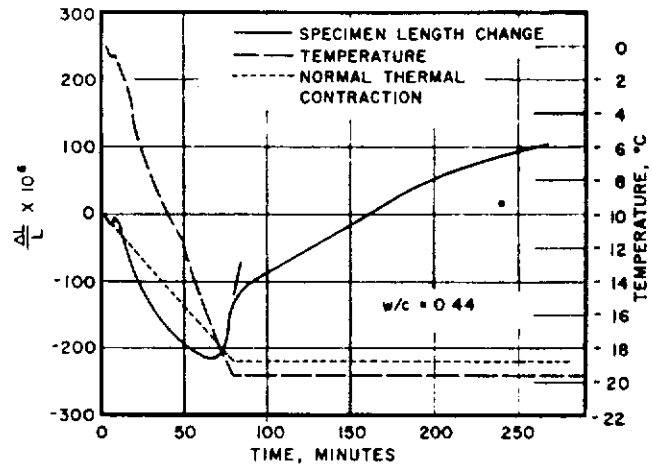
Såvel hydraulisk som osmotisk tryk vil få cementpastaen til at ekspandere. Hvis kapillarporerne ikke er vandmættede, vil der ikke udvikles noget overtryk, og frysningen vil dermed ikke resultere i ekspansion, men tværtimod i kontraktion. Det vandoverskud, der opstår enten ved isens tryk eller ved tilførsel gennem osmose, kan umiddelbart finde plads, og den samlede virkning bliver derfor alene bestemt af de forandringer, cementgelen undergår. Gelvandet har højere damptryk end både den mere koncentrerede opløsning og selve isen, og i

Figur 5. Sammenhørende kurver for det tidsmæssige forløb under frostpåvirkning af længden af en cementpastaprøve (fuldt optrukket)

temperaturen i prøven (punkteret)

den normale termiske kontraktion af prøven (prikket)

Efter (46)



begge tilfælde vil resultatet blive en transport af vand bort fra cementgelen, hvilket igen resulterer i svind.

De komplicerede forhold omkring frysning af cementpasta er illustreret i figur 5, der er hentet fra (46). Powers' kommentar til figuren lyder: "Figuren viser forløbet af temperatur- og længdeændringer i et prøvelegeme af cementpasta, der var næsten vandmættet ved forsøgets start. Den punkterede kurve viser, at temperaturen blev bragt til at falde med konstant hastighed de første 75 minutter efter passage af frysepunktet, hvorefter den blev holdt konstant omkring -20°C *) i de næste fire timer. Den fuldt optrukne kurve viser de tilsvarende længdeændringer af prøvelegemet. Den prikkede linie viser, hvad længdeændringen ville have været ved normal termisk kontraktion alene.

Frysningen begyndte, da temperaturen nåede -1°C , som angivet ved den svage temperaturstigning forårsaget af frigivelsen af størkningsvarmen i prøven; der var ligeledes en svag og midlertidig tilvækst i prøvens længde. Igennem den næste time, mens temperaturen faldt til omkring -17°C , udviste prøven kontraktion snarere end ekspansion; da temperaturen faldt endnu mere, begyndte så en relativt hurtig ekspansion af prøven.

Den hurtige ekspansion i perioden med faldende temperatur antages at hidrøre fra hydraulisk tryk, der udvikles i kapillarlulrum, hvor vandet var ude af stand til at fryse ved højere temperaturer. Den

*) I originalen står $^{\circ}\text{F}$, hvilket tydeligvis er en skrive- eller trykfejl.

fortsatte ekspansion med lavere hastighed, der optrådte, mens temperaturen forblev konstant ved omkring -20°C , forklares ved det osmotiske tryk, der frembringes, når vandet transporteres til de frosne hulrum, i det væsentlige fra cementgelen."

Senere i samme artikel (46) forklarer Powers de ved brug af optøningsmidler hidførte ændringer af den sædvanlige frysningmekanisme på følgende måde:

"Efter at islaget på belægningen er smeltet, vil noget af saltet i smelten langsomt diffundere ind i porerne i betonen. Hastigheden af en sådan diffusion er i cementgel yderst lav; følgelig vil saltkoncentrationen bygges op langt hurtigere i kapillarporerne end i den tætte cementgel. Eftersom diffusionshastigheden er meget lav, skal der hengå meget lang tid mellem frysningerne, hvis det indtrængende salt skal blive jævnt fordelt.

Det er næsten sikkert, at i optøningssæsonen vil frysning indtræffe, mens saltkoncentrationen er højere i kapillar- end i gelporerne. Efter saltning vil en given frostpåvirkning derfor frembringe et større potential for osmotisk tryk end før, men for en given minimumstemperatur vil der dannes mindre is end før.

Således har et optøningsmiddel to modsat rettede virkninger:

1. Det nedsætter den mængde is, der kan dannes ved en given temperatur, en effekt, der har tendens til at reducere det tryk, frysningen fremkalder, hvadenten det er osmotisk eller hydraulisk.
2. Det forøger potentialet for osmotisk tryk svarende til en given frostpåvirkning, en effekt, der har tendens til at forøge det maksimale tryk, der kan udvikles ved hydraulisk strømning og osmotisk tryk.

Disse modsatte virkninger forklarer smukt, at det observerede maksimum for den destruktive virkning ligger ved en middelhøj saltkoncentration på overfladen og en tilsvarende middelhøj koncentration i kapillarporerne." (Jf. side 12 og side 26).

I sine konklusioner taler Powers om "en given temperatur" og "en given frostpåvirkning" og ser således - formentlig for at tydeliggøre

selve mekanismerne - bort fra saltningens indflydelse på de nævnte faktorer. Imidlertid vil saltningen medføre et kraftigt temperaturfald (jf. side 21), og en forøget afkølingshastighed vil i henhold til formelen side 16 medføre en kraftigere påvirkning - dog naturligvis under forudsætning af tilstedeværelsen af ufrosset kapillarvand.

Powers diskuterer også den gunstige virkning af indblandede luftbobler, men dette spørgsmål er her behandlet i anden sammenhæng (se side 30).

* * *

Det foran anførte synes at pege i retning af osmose som en fundamental årsag til betonskader forårsaget af optøningsmidler, et resultat, der harmonerer udmærket med det side 4 nævnte om osmotiske effekter som noget karakteristisk for opløsninger. Powers bemærker i (46), at det osmotiske tryk kan blive stort nok til at forårsage brud. Heroverfor står Hartmann's påstand i (58), at det osmotiske tryk ikke er større, end at porevæggene kan modstå det. For en 1% NaCl-opløsning finder hun nemlig et regningsmæssigt tryk på ca. 4 kp/cm^2 , hvilket er mindre end cementpastaens trækstyrke. Hertil skal bemærkes, for det første at koncentrationen ifølge (43) ender med at være af en størrelsesorden på 4% gennem hele belægningen (artiklen handler om veje), hvortil kommer, at frysemekanismen jo som resultat bl. a. har, at koncentrationen lokalt øges ud over det gennemsnitlige. For det andet er et træk på 4 kp/cm^2 vel ikke så lille, at det uden videre kan lægges oven i en hvilken som helst allerede tilstedeværende påvirkning. En beton, der i forvejen er udsat for frost, vil jo som følge heraf være påført en trækspænding, der afhængigt af omstændighederne kan ligge med større eller mindre afstand til brudgrænsen. Selv en relativt beskeden forøgelse af påvirkningen kan derfor meget vel tænkes i nogle tilfælde at bringe den samlede trækspænding op over denne grænse.

Endnu et indicium for osmosens centrale placering i problemkredsen er det side 13 nævnte forhold, at beskadigelse kan forårsages uden frost og tø af opløsninger, der ikke reagerer kemisk med betonen (5).

* * *

Frostsikkerhed er som flere gange nævnt et spørgsmål om balancen mellem påvirkning og modstandsevne. I det foregående har opmærk-

somheden været samlet om påvirkningen, idet modstandsevnen, repræsenteret ved en passende styrkeparameter, har været inddraget i overvejelserne som en for den givne beton til det givne tidspunkt uforanderlig størrelse. I virkeligheden afhænger den pågældende styrkeparameter af betonens tilstand, og her er især indholdet af fordampeligt vand af betydning. En undersøgelse omtalt i (1) viser, at styrken aftager i rækkefølgen ovntør tilstand, vandmættet tilstand, delvis ovntør tilstand, d.v.s. både det gennemsnitlige vandindhold og dets fordeling spiller en rolle. Samme kildes oplysninger om den sammenhæng, der under forsøgets betingelser er fundet mellem vandindhold og saltopløsning, er noget uklare; men det turde være indlysende, at når optøningsmidlet omdanner is til væske, øges betonens mulighed for vandoptagelse, ligesom man vel heller ikke kan se bort fra den mulighed, at saltet binder en del vand, således at udtørring af betonen forsinkes eller forhindres. Brug af optøningsmidler må derfor påregnes at kunne øge vandmætningsgraden i betonen, hvilket virker til ugunst både på påvirkningssiden og modstandsevnesiden.

* * *

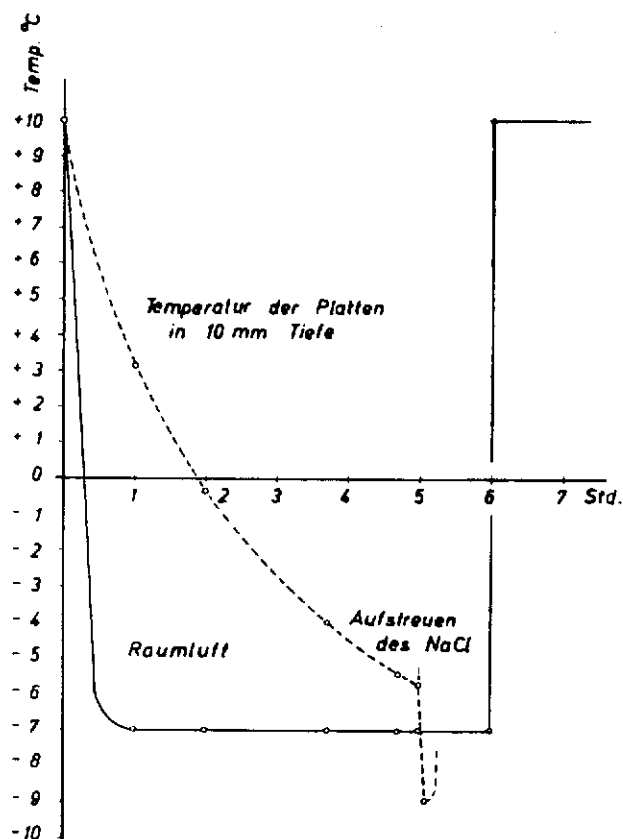
Konklusionen bliver, at tørsaltes indvirken på beton i det store og hele kan forklares som en ændring af den normale frostpåvirkning. Det centrale er forstærkningen af potentialet for osmotisk tryk, medens indflydelsen på det hydrauliske tryk ikke kan angives som nogen generel tendens, da der er tale om såvel forstærkende som svækkende momenter. Af helt afgørende betydning er vandmætningsgraden, idet immunitet ikke kan opnås, medmindre denne holdes under en vis grænse. Også fordelingen af de luftfyldte hulrum, hvori volumenforøgelsen kan optages, er vigtig, idet intet punkt må være fjernere fra en undvigelsesflade end den såkaldte kritiske afstand, der er en funktion af pastastruktur, væskefase og afkølingsforhold; spørgsmålet behandles nærmere i afsnittet om luftindblanding (se side 30).

Termiske spændinger

I (58) angives termiske forhold som årsag til optøningsskader. Ved saltning smeltes isen, og den fornødne varme hertil tages fra betonen, som følgelig afkøles. Afkølingen har karakter af et regulært termisk chok, jf. figur 6, og dette kan som omtalt side 20 give et

Figur 6. Temperaturforløbet i luften og i en dybde af 10 mm under betonoverfladen, dels under frysning, dels under og efter smeltning af et islag med NaCl.

Efter (58)



bidrag til ændringen i den ved frysningen fremkaldte påvirkning. Det kan også betragtes som en fænomenologisk forklaring, sådan som det fremgår af side 24.

Den raske afkøling af betonens overflade giver imidlertid også mulighed for en ny og selvstændig strukturel ødelæggelsesmekanisme. Der opstår nemlig et brat temperaturfald, i hovedsagen vinkelret på grænsefladen is-beton, men parallelt med denne flade også lokalt omkring de enkelte saltkorn. De store temperaturgradienter ledsages af tilsvarende store tøjningsgradienter, hvad der kan føre til overskridelse af cementpastaens træk- eller forskydningsstyrke. Her spiller det også ind, at frossen, vandmættet cementpasta har højere elasticitetsmodul end tilsvarende umættet pasta, således at spændingerne af denne grund bliver særlig store. Hvis den nævnte mekanisme faktisk er virksom, må afskalningerne ventes fortrinsvis at opstå over sådanne tilslagspartikler, hvis varmeudvidelseskoefficient er tydeligt forskellig fra cementpastaens. I (58) er dette forhold undersøgt, og resultatet er nærmest bekræftende, selv om der tages forbehold, på grund af at billedet sløres af forskelle i vedhæftning.

Teorien støttes af, at det har kunnet lade sig gøre at fremkalde salt-skader, uden at salt og beton har været i direkte kontakt med hinanden, således at kemiske og osmotiske effekter kan udelukkes (58).

Teorien er efterprøvet i (1); her er det ikke lykkedes at fremkalde afskalninger ved hjælp af termisk chok.

Det er ikke muligt på det foreliggende grundlag at afgøre definitivt, om den nævnte skadesmekanisme faktisk optræder. Da den imidlertid er tænkelig i princippet, da den hviler på et sundt fysisk grundlag, og da den, omend den muligvis ikke som selvstændig årsag er tilstrækkelig til at ødelægge betonen, kan tænkes at adderes til en ellers uskadelig påvirkning, så det samlede resultat bliver skadeligt (jf. det side 20 anførte om osmose), bliver konklusionen: Det må anses for muligt og sandsynligt, at nedbrydning som følge af stedvis kraftig termisk kontraktion kan være en medvirkende ødelæggelsesmekanisme.

Afsluttende bemærkninger

Det samlede skadebillede kan indeholde træk, der hverken skyldes frost eller optøningsmidler. Svækkelse af betonstrukturen kan være fremkaldt af fugtighedsændinger ved temperaturer over 0°C eller gennem temperaturændringer i betonen. Sådanne skader kan enten optræde i form af synlige revner og vil da ofte fejlagtigt blive tydet som "frostskader", eller også træder de ikke synligt frem, men virker dog befordrende på dannelsen af frostskader (58). I denne forbindelse kan også nævnes det svind, der ledsager frysning af beton (se side 17).

FÆNOMENOLOGISKE FORKLARINGER

Frysningsforløbet

Optøningsmidler influerer på frysningsforløbet i betonen af to grunde:

1. Varme flyttes fra beton til is.
2. Væskefasens frysepunkt sænkes.

Virkningerne heraf er dels et termisk chok i betonoverfladen, dels en ændring af isdannelsesfrontens placering og bevægelse. Når disse

forhold benyttes som forklaring på optøningsmidlers skadevirkning, ligger der altså bagved en - stiltiende eller udtrykt - accept af, at skaderne i deres natur er frostska-der.

Termisk chok

Termisk chok er uden nærmere begrundelse nævnt som skadesårsag i (3) og (5), medens en lidt fyldigere omtale er givet i (21*). Grundigst er disse forhold behandlet i (58), der efter en imponerende omhyggelig gennemgang af de i 1957 foreliggende hypoteser kommer til den konklusion, at skaderne alene skyldes termiske påvirkninger.

I henhold til (58) har den hurtige afkøling (jf. figur 6) to virkninger. For det første vil der opstå en kraftig termisk kontraktion af overfladen med deraf følgende risiko for afsprængning (se side 22). For det andet vil det termiske chok fremkalde en pludselig frysning af kapillarvandet i en dybereliggende zone, hvad der kan føre til afsprængning. Sidstnævnte ødelæggelsesmåde er betinget af, at lufttemperaturen kun ligger lidt under nulpunktet og kun har været negativ i kortere tid. I så fald vil der i gennemvåd beton under det øverste, frosne lag være et parallelt med overfladen forløbende lag, i hvilket kapillarporerne er fyldt med ufrosset vand. Den her gengivne forklaring bringer ikke noget egentlig nyt i forhold til det side 20 anførte, at en forøget afkølingshastighed under i øvrigt givne omstændigheder vil resultere i en forstærket påvirkning. Dog må det siges at være af værdi, at de klimatiske forudsætninger er beskrevet, således at man kan se, at de med stor sandsynlighed vil forekomme i praksis.

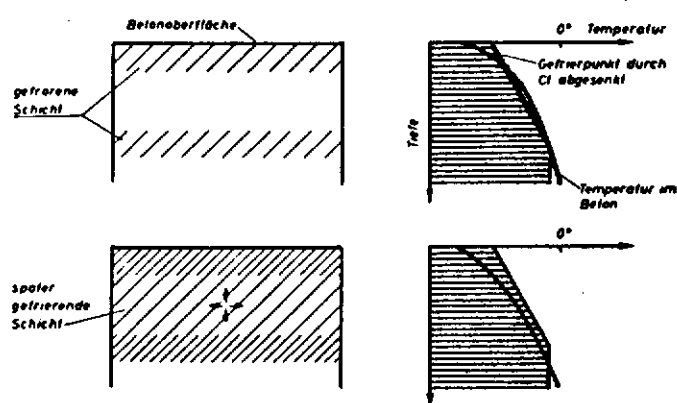
Isdannelsefronten

Isdannelsen starter i reglen på overfladen og breder sig derfra til det indre af betonen. (1*) refererer en mekanisme foreslået af Snyder, gående ud på, at tilstedeværelsen af salt på betonoverfladen bevirker, at frysningen starter i det indre af betonen, hvor der ikke er noget salt. Herfra bevæger isdannelsezonen sig mod overfladen under udvikling af et hydraulisk tryk, der ligefrem "løfter" overfladen af betonen. En efterprøvning af hypotesen er omtalt i (1), der konkluderer, at selv om fryseretningsmekanismen skulle udøve nogen indflydelse på overfladebeskadigelsen, er den ubetydelig i sammenligning med de skader, der forårsages af optøningsmidler under frysning og optøning.

Figur 7. Eksempel på variationen med dybden af betonens temperatur og væskefasens smeltepunkt efter saltning.

I det viste tilfælde vil frysningen starte i overfladen og et dybereliggende lag, medens et mellemliggende lag først fryser ved yderligere afkøling.

Efter (18)



I familie med fryseretningsmekanismen er følgende hypotese, frem-sat i (18): "Man antager i dag, at ved udstrøning af tørsalte (NaCl , CaCl_2) trænger små mængder chlor ind i et meget tyndt lag af beton-overfladen, hvorved porevandets frysepunkt nedsættes. I det tynde overfladelag dannes et koncentrationsfald udefra og indefter, hvilket kan bevirke, at betonen først fryser i overfladen og i et dybereliggende lag (figur 7). Først ved videre afkøling fryser derefter vandet i det mellemliggende lag. Det kan derved ikke afgive frysningstryk- ket gennem de tilgrænsende frosne lag og afsprænger derfor det yderste lag."

I begge tilfælde hænges forklaringen op på den manglende mulighed for aflastning af det hydrauliske tryk. Forklaringen virker ikke sær- lig overbevisende, idet de blokerede aflastningsmuligheder befinder sig i betydelig større afstand fra isdannelsestedet end den kritiske, der efter (46) er af størrelsesordenen 0,1 mm. Hermed er naturlig- vis intet sagt om det, der i hypoteserne anføres om isdannelsefron- tens beliggenhed og bevægelse, der meget vel kan være som påstået.

Kemiske forhold m.v.

I det følgende er fra litteraturen gengivet nogle spredte oplysninger vedrørende sammenhængen mellem forskellige optøningsmidlers ska- devirkning og deres kemiske sammensætning og koncentration. Oplys- ningerne er ikke underkastet nogen økonomisk vurdering, men i prak- sis vil man selvfølgelig helst benytte et billigt middel og små mængder.

Kemisk sammensætning

De i (67) refererede laboratorieforsøg har bl.a. vist, at kemisk set forskellige stoffer, hvadenten det er uorganiske eller organiske, salte eller ikke-salte, benyttet som optøningsmidler kan forårsage "salt"-afskalning. (Jf. side 12).

I (58) er iagttaget, at NaCl skader mere end CaCl₂ (og MgCl₂). Som forklaring angives den tilsvarende forskel i termisk chok, idet der i en dybde af 3 mm er målt følgende temperaturfald:

med NaCl : 4-8°C efter 1-3 min.

med CaCl₂: 2-5°C efter 5-8 min.

I (4) er omtalt nogle forsøg, hvor urea har vist sig mindre skadeligt for luftindblandet beton end sædvanlige tørsalte; for almindelig beton er ikke konstateret nogen forskel. Urea gav desuden et andet skadebillede end almindeligt salt. Forfatteren indrømmer afslutningsvis, at resultaterne vanskeligt kan overføres på virkelige forhold, eftersom der ved forsøgene er anvendt ca. 25-30 gange så meget optøningsmiddel pr. arealenhed som i praksis.

Det specielle forhold, at en koncentreret CaCl₂-opløsning reagerer surt og dermed aggressivt, er nævnt tidligere (side 12). Det samme gælder risikoen for ved brug af alkalisalte at fremkalde eller forværre skadelige alkalikiselreaktioner i beton med alkalireaktivt tilslag (side 14).

Koncentration

Størst skade forvoldes ved middelhøje koncentrationer. (67) angiver 2-4% som det interval, hvori den skadeligste koncentration vil ligge. (58*) omtaler en svensk undersøgelse, hvor den hurtigste ødelæggelse for alle salte optrådte ved den koncentration, som gav en frysepunktssænkning på ca. 3°C. Powers' forklaring på de middelkoncentrerede opløsningers særlige ødelæggelsesevne er citeret side 19.

(1) beskriver en undersøgelse af tørsaltopløsningers egenskaber; stigende koncentration giver faldende frysepunkt og aftagende ekspansion ved frysning.

Afsluttende bemærkninger

Det er vanskeligt at se, hvordan ovenstående skulle kunne føre til en almengyldig, teknisk betonet konklusion - for så vidt angår de kemiske forholds indflydelse på beskadigelsen af betonen. Andre kriterier må derfor tages i brug ved valg af optøningsmiddel: risiko for andre skadevirkninger (plantevækst, motorkøretøjer), økonomiske forhold, optøningsevne (NaCl's smeltevirkning er i praksis begrænset til -5°C , CaCl_2 er virksom helt ned til -25°C (54)) etc.

Muligvis kunne man være fristet til under danske forhold at lægge vægt på NaCl's evne til at reagere med flinten i tilslaget og derfor anbefale andre midler. Synspunktet er betonteknologisk sundt nok, men af økonomiske grunde bør en kategorisk forkastelse af NaCl dog nok afvente en nærmere undersøgelse af, i hvilken grad alkalikiselreaktioner er den egentlige årsag til tørsaltskader. (At alkalikiselreaktioner er påvist i en del tørsaltbeskadiget beton, er ubestrideligt; men det kan være et sekundært fænomen). Ligeledes bør man nok også erindre sig, at brug af tørsalt især vil være aktuel for beton, der i det hele taget er udsat for relativt hård klimatisk påvirkning, og som derfor i mange tilfælde vil være fremstillet med granitskærver.

Diverse

Klimatiske forhold

De klimatiske faktorerers medvirken ved saltskader er i et vist omfang inddraget i undersøgelserne i (1). Det viste sig her, at temperatursvingninger forstærker virkningen af en svag CaCl_2 -opløsning på mørtelprøvelegemer. Trækstyrken svækkes tydeligt i sammenligning med prøvelegemer, der er lagret ved konstant temperatur, stærkest naturligtvis, hvis temperatursvingningen indbefatter frysepunktspassage, i hvilket tilfælde også synlige skader optræder. (Der var ikke tale om forskelle i indholdet af fordampeligt vand, så den på side 21 nævnte afhængighed mellem trykstyrke og vandindhold og -fordeling ligger ikke bag de fundne resultater.)

Hartmann har undersøgt de skader, der opstår, når beton overhældes med en koncentreret saltopløsning, som atter hældes af, hvorefter

betonen henstår til udtørring - alt ved stuetemperatur. Hun fandt, at skaderne (på beton med almindelig portlandcement) var desto større, jo højere luftens fugtindhold var under udtørringsfasen (58).

En sammenlignende undersøgelse af svingninger i luftens relative fugtighed og frysning-optøning (1) gav til resultat, at fugtsvingninger ikke i sig selv har nogen indflydelse på skadesgraden af beton og mørtel, der er udsat for optøningsmidler. Kun i forbindelse med CaCl_2 -opløsninger af høj koncentration viste prøverne tegn på ødelæggelse, og dette kunne føres tilbage til det flere gange tidligere nævnte forhold, at koncentrerede opløsninger af CaCl_2 er kemisk aggressive (se side 12).

Markobservationer (52, 66) bekræfter betydningen af de lokale klimatiske forhold, men er i øvrigt ikke direkte sammenlignelige med ovennævnte laboratorieforsøg.

Der kan ikke af ovenstående drages konklusioner med henblik på praksis, da klimatiske faktorer jo normalt unddrager sig kontrol. Med henblik på undersøgelser i laboratoriet er konklusionen den, at styring af de klimatiske variable er nødvendig, enten i form af fastholdte, realistiske gennemsnitsværdier eller - bedre - i form af systematisk varierede faktorer.

Tilslaget

Verbeck og Klieger har undersøgt, hvordan skadesintensiteten afhænger af tilslagets porøsitet, og fundet, at det mindst porøse tilslag (laveste vandabsorption) gav den alvorligste beskadigelse (67). Resultatet er efterprøvet i (1), hvor man ikke fandt nogen korrelation.

Tilslagets termiske udvidelse i forhold til cementpastaens er også bragt i forslag som en mulig parameter (58), se side 22.

Konklusion: Tilslaget spiller næppe den store rolle, men det må dog nok som begrundet side 14 kræves, at det er frostsikkert.

Korrosion af armering

I (10) omtales en inspektion foretaget i 1960, hvor man fandt frem

til, at "det alvorligste problem på daværende tidspunkt var, at betonkonstruktioner i kontakt med omgivelser med højt chloridindhold havde korroderet armering." Denne skadesårsag er for så vidt selvstændig i forhold til de allerede nævnte, der angår selve betonen, men de kan naturligvis samvirke, derved at de baner vej for og forstærker hinanden. Den vigtigste modforholdsregel er tilstrækkelig dæklagstykkelse - og sikring af dette gennem forholdsregler til bevarelse af selve betonen.

EMPIRISKE REGLER

Divergerende meninger

I (3) hedder det: "Det er muligt i laboratoriet at reproducere de nedbrydninger, der forårsages af vinterbehandling af betonvejbælægninger. Metoden er simpel og hurtig, og den tillader en à priori bedømmelse af, om en ny betonsammensætning vil modstå påvirkning af afisningsmidler."

I (47) hedder det: "Da simple prøvningsmetoder, hvis resultater kan overføres på praktiske forhold, ikke står til rådighed, må der til sikring af høj modstandsevne over for frost og tørsalte iagttages retningslinier for betonens sammensætning, fremstilling og efterbehandling."

I (46) hedder det: "Den opførsel, der i et strengt klima udvises af udendørs beton i kontakt med jord, afhænger ikke af betonens karakteristika alene." Og senere: "Ud fra den relative opførsel af forskellige betoner under ét sæt omstændigheder er det ikke muligt præcist at forudsige den relative opførsel under andre omstændigheder."

(Disse udtalelser er fremsat i samme forbindelse som den på side 11 citerede udtalelse.)

Da ovenstående påstande fra (47) og (46) i øvrigt underbygges af kildematerialet, kan de tages som udtryk for, at det på den ene side er muligt at angive regler, som i praksis giver en høj grad af sikkerhed mod saltskader, men at det på den anden side vil gå godt i en lang række tilfælde - måske endda de fleste - hvor disse regler ikke er overholdt. Eller sagt på en anden måde: det vil som regel

være muligt ved en ekstraordinær indsats at undgå saltskader, men en sådan vil ikke i alle tilfælde være økonomisk rimelig. *)

De mange empiriske regler i litteraturen må anskues i lyset af de indledningsvis skitserede divergenser og vurderes på baggrund af det teknisk-økonomiske skisma. Det må dertil påregnes, at lokale forhold og materialer i endog betydeligt omfang kan have præget de registrerede erfaringer. Hovedmålet med det følgende er at indkredse de erfaringer, der nogenlunde sikkert kan tillægges almen gyldighed, og til dette formål kan de i det pågældende afsnit (s. 12 ff) formulerede anskuelser om strukturelle ødelæggelsesmekanismer tjene som prøvesten. I anden række søges sådanne forhold fremdraget, som specielt har gyldighed under de her i landet herskende vilkår.

Betonteknologiske foranstaltninger

Betonsammensætning

Luftindblanding

Den eneste betonteknologiske faktor, Powers uden betænkelighed tør fremhæve som ubetinget gavnlig, er indblandet luft (46). I samklang hermed er følgende erklæring fra (18): "Man ved derfor heller ikke, hvordan en beton skal være sammensat, for at den også uden kunstige luftporer skal kunne holde stand i årtier over for tøsaltangreb. Af denne grund vil man i praksis stedse tilstræbe en luftindblandet beton."

Blandt de mange andre markobservationer, der er på linie med de allerede nævnte, er en undersøgelse af brodæks holdbarhed, foretaget i USA i 1970. I rapporten bemærkes, at afskalning ikke er et specielt alvorligt problem, og at det kan holdes under kontrol - omend ikke elimineres - ved brug af luftindblandet beton (11). Et helt analogt resultat er (67) kommet til, idet konklusionen her går ud på, at erfaringer fra praksis viser, at luftindblanding er et effektivt middel mod afskalning; dog tages her det forsigtige forbehold, at laboratorieforsøg tyder på, at under visse ekstremt hårde betingelser giver indblandet luft ikke fuldstændig beskyttelse.

*) Se også side 49-52.

At beton med et passende højt indhold af indblandet luft udviser god bestandighed over for tørsalte, og at beton uden indblandet luft ikke gør det, rapporteres i (4), (5), (8), (11), (12), (50), (51) og (52). Flere af de nævnte kilder angiver desuden, at indblandet luft er den eneste - eller i hvert fald den væsentligste - faktor i spørgsmålet om holdbarhed over for kombineret frost og kemisk afisning. Betydningen af indblandet luft anfægtes intetsteds i litteraturen og turde således være en fastslået kendsgerning.

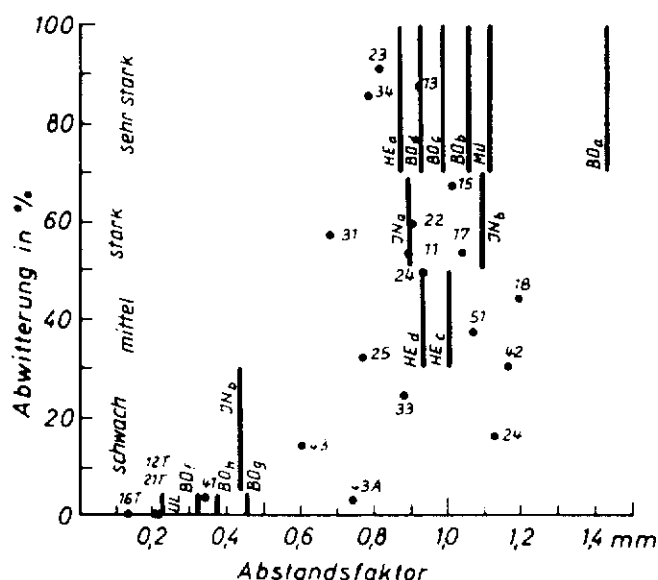
De indblandede luftboblers beskyttende virkning ligger i, at de skaber mulighed for optagelse af det overskudsvolumen, der opstår ved isdannelse og osmose (jf. side 14 ff). Denne virkning er igen betinget af, at boblerne i det væsentlige er luftfyldte og ikke vandfyldte, hvilket erfaringen viser som oftest vil være tilfældet. Luftboblernes tilstedeværelse mindsker nemlig betonens evne til vandoptagelse ved kapillarsugning, idet deres tværmål som anført side 8 er mange gange større end kapillarporerne. (Kapillarkraften er omvendt proportional med porevidden.) Under normale forhold kan transport af vand gennem en luftboble derfor kun ske i dampfasen, således at der må finde fordampning sted fra meniskerne i kapillarporerne på den ene side af boblen og tilsvarende kondensation på den anden side (58*). Kun under ekstreme vilkår vil boblerne kunne fyldes med vand - og den beskyttende virkning går naturligvis dermed tabt (46, 58*) - men flere forskere fremhæver værdien af, at betonen også i fredeligere miljøer lejlighedsvis får mulighed for udtørring (11, 21, 43, 46, 52) eller beskyttes ved en overfladeimprægnering (8).

Gyldigheden af det anførte om luftboblernes virkemåde i henseende til beskyttelse og vandtransport står og falder med den forudsætning, at boblerne ikke er lukkede, men står i forbindelse med kapillarporerne. Det er ad mikroskopisk vej eftervist, at denne forudsætning er opfyldt, hvilket også fremgår af, at luften i boblerne reagerer på ydre trykændringer (58*).

Frostsikkerhedskriteriet er formuleret side 16. Den deraf afledte betingelse $D < D_{krit}$, der udtrykker, at afstanden fra et vilkårligt punkt i cementpastaen til den nærmeste undvigelsesflade skal være mindre end en vis kritisk værdi, kan benyttes som rettesnor for, hvad der skal til-

Figur 8. Sammenhængen mellem forvitring på grund af tørsaltangreb og afstandsfaktor ved amerikanske 20-års forsøg (punkter) og ved observationer på tyske betonveje (streger).

Efter (16)



stræbes med hensyn til luftboblernes størrelse og indbyrdes afstand. Imidlertid indeholder frostsikkerhedskriteriet både variable, der angår betonens egenskaber, og variable, der angår påvirkningen, hvilket bl. a. vil sige klimaet. Førstnævnte forhold bevirker, at luftindblandingen må ses i sammenhæng med betonens egenskaber i det hele taget, sidstnævnte, at bl. a. den geografiske beliggenhed spiller ind. Oplysningerne i litteraturen kan derfor ikke give noget universelt svar på spørgsmålet om den optimale boblegeometri, men derimod nok på spørgsmålet om, hvilke målelige parametre det er værd at interessere sig for.

Den fundamentale variable er afstandsfaktoren. Figur 8 viser en sammenstilling af amerikanske og tyske resultater, hvoraf det fremgår, at ved værdier for afstandsfaktoren på 0,40 mm og derunder optræder ingen skader. Af sikkerhedsgrunde bør dog værdien 0,25 mm ikke overskrides - en værdi, som også Powers går ind for (16*, 18*).

Afstandsfaktoren lader sig ikke måle direkte, men under passende simplificerende antagelser kan den beregnes. De ovenfor angivne værdier er således regningsmæssige størrelser, baseret på et simpelt kubisk arrangement af lige store kugleformede bobler. Metodens grundlag er kvantitative observationer i mikroskop, og som mellemregninger optræder det samlede luftindhold, boblernes specifikke over-

flade og deres antal pr. volumenenhed (72). Sidstnævnte tre parametre fremdrages i (21) og (29) som særlig betydningsfulde for boblesystemets funktionsduelighed. Flere andre parametre er nævnt rundt om i kildematerialet, bl. a. boblernes fordeling efter diameter, men der er naturligvis grænser for, hvor mange indbyrdes uafhængige variable der kan hittes på i et sådant system. Dog kan der måske være grund til at nævne, at bobler med diameter over 0,2 (21) à 0,3 (60) mm ikke er effektive i beskyttelsesmæssig henseende.

* * *

I praksis er kun betonens samlede luftindhold egnet som objekt for rutinemæssig kontrol. Om en sådan kontrol har nogen værdi, afhænger af, om det samlede luftindhold giver tilstrækkelig og tilstrækkelig pålidelig oplysning om boblegeometrien. Det er let at indse, at dette kun er tilfældet, hvis man på forhånd ved, at boblerne har en passende størrelse og er ensartet fordelt i cementpastaen, d. v. s. hvis man råder over et luftindblandingsstof med kendt, egnet og konstant virkning. Men selv i så tilfælde er problemet ikke løst; ifølge sagens natur er det cementpastaen, der skal beskyttes, men luftindholdet måles i forhold til betonens volumen. Da pastaen langt fra udgør nogen konstant andel, burde omregning strengt taget foretages i hvert enkelt tilfælde. Det er urealistisk at forestille sig noget sådant, og i stedet er det blevet gængs at angive det nødvendige luftindhold som funktion af nogle få faktorer, hvis gennemsnitsvirkning på pastaandel (eks.: maksimalcornstørrelse) og pastakvalitet (eks.: C/V-forhold, evt. cementindhold) kan udregnes. Endnu simplere - men selv sagt uøkonomisk i en række tilfælde - er at angive en enkelt, nedre grænse, som under alle omstændigheder sikrer fornøden holdbarhed.

Tyske kilder (5, 16, 21, 47, 48, 50, 57, 71) angiver i reglen det nødvendige gennemsnitsluftindhold til omkring 3,5%, svenske (4, 21*, 52*) til 4 à 5% og amerikanske (11, 21*, 29, 67) til 5 à 8%. (59) foreskriver, at luftindholdet skal ligge i intervallet 4,5 - 6,0%, hvilket i henhold til (60) - der er bilag til (59) - synes at dække i hvert fald hollandske forhold. Sammenholdt med, at luftindholdet i mørtelfraktionen efter (29) og (58*) skal være 9%, tyder de anførte værdier på, at det under danske forhold vil være rimeligt at tilstræbe luftindhold, der ligger 1 à 2% over dem, der anses for nødvendige til beskyttelse mod ren frostpåvirkning; disse fremgår af tabel 2.

Tabel 2. Det gunstigste luftindhold i % af betonrumfanget for opnåelse af frostsikker beton i afhængighed af cementindhold C og største kornstørrelse d_{max} .

cementindhold C kg/m ³	storste kornstørrelse d_{max} i mm				
	4	8	16	32	64
150	8,5	7,0	6,0	5,0	4,5
200	7,5	6,0	5,0	4,5	4,0
250	6,5	5,0	4,5	4,0	3,5
300	6,0	4,5	4,0	3,5	3,5
350	6,5	5,0	4,0	3,5	3,5
400	7,0	5,5	4,5	4,0	4,0
450	7,5	6,0	5,0	4,5	4,5

Efter (73)

C/V - forhold

C/V-forholdet er som i så mange andre betonteknologiske sammenhænge en nøgelfaktor i spørgsmålet om modstandsevne over for frost og kemisk afisning. Det er direkte bestemmende for såvel styrke som permeabilitet, de to faktorer, der tilsammen udgør tælleren i udtrykket på højre side af ulighedstegnet i frostsikkerhedskriteriet (se side 16), og det har indflydelse på mængden af fryseligt vand w_f , der indgår i nævneren. For stigende C/V-forhold vil styrken vokse og permeabiliteten aftage, og det kan derfor ikke umiddelbart ses, hvordan det vil gå med deres produkt - udover at variationen med C/V-forholdet vil være mindre udtalt end for de to faktorer hver for sig. Det har imidlertid vist sig, at højt C/V-forhold giver større frostbestandighed end lavt (69), og talværdierne i litteraturen er derfor altid minimumsværdier.

(48) angiver for jordfugtig beton til fliser^{*)} en nedre grænse på 2,5 for C/V-forholdet, medens (59) til jernbetonformål kræver 2,0. I (47) er det nødvendige C/V-forhold gradueret efter påvirkningen - der er tale om beton til vejbelægning - inden for intervallet 1,8 - 2,2. Alt i alt vil det nok være det klogeste, ikke at gå under 2,0.

Cementindhold

For at betonen kan opnå fornøden kompakthed, må dens indhold af cementpasta være tilstrækkelig stort til at udfylde hulrummene mellem tilslagspartiklerne. Dette er formentlig baggrunden for de krav, der

*) Se også side 40.

undertiden stilles om et vist mindste cementindhold pr. m^3 . (48) anbefaler for jordfugtig beton til fliser^{*)} mindst 450 kg cement pr. m^3 , medens (59) til jernbetonformål foreskriver 350 kg cement pr. m^3 , hvilket ikke forekommer urimeligt.

Det vil dog nok være på sin plads at graduere kravet efter maksimal-kornstørrelsen, således at den nedre grænse for cementindholdet fastsættes til $350 \text{ kg}/m^3$ for $d_{\text{max}} = 32 \text{ mm}$ og $400 \text{ kg}/m^3$ for $d_{\text{max}} = 16 \text{ mm}$.

(59) fastlægger også cementtypen, nemlig portlandcement.

Tilslag

De fleste af kildematerialets forslag til blandingssammensætning indeholder en passus om, at tilslaget skal være hensigtsmæssigt graderet, og ofte henvises til et kornkurveområde, der i det pågældende land er normfæstet som "gunstigt" evt. "særlig gunstigt". Da den optimale beliggenhed af kornkurven imidlertid afhænger af en lang række faktorer, først og fremmest vedrørende tilslaget selv, kan disse erfaringer ikke med tillid benyttes under danske forhold. Det skulle vel også være tilstrækkeligt at gøre opmærksom på betydningen af en god gradering - og så henviser til almindelig god betonpraksis.

* * *

Et enkelt forhold, der har noget at gøre med graderingen, fortjener dog nok at omtales, nemlig betonens indhold af det, der i den tyske litteratur betegnes "melfine" bestanddele. Sådanne defineres som partikler med kornstørrelse $< 0,2 \text{ mm}$, d.v.s. cement + den fineste del af tilslaget. (5), (47), (48) og (57) angiver, at indholdet af sådanne partikler bør begrænses, og (47) giver den forklaring på nødvendigheden heraf, at det er finmørtelen på betonens overflade, der skaller af, og at dens mængde derfor bør være så lille som muligt. Walz og Schäfer har iagttaget, at flisers følsomhed for tørsaltpåvirkning falder sammen med tilstedeværelsen af en stærkt sugende zone på gåfladen, og at sådanne stærkt sugende lag for det meste er meget rige på finsand og stenmel (48). Muligvis kan kravet om begrænsning af finpartikelmængden opfattes som en foranstaltning, der skal

*) Se også side 40.

bidrage til at modvirke dannelsen af det på side 37 nævnte dårligt hæftende slam- eller mørtellag på overfladen. (47) sætter 400 kg/m^3 som øvre grænse for vejbeton med $d_{\text{max}} = 30 \text{ mm}$, medens (48) for jordfugtig beton til fliser^{*)} angiver $500 - 550 \text{ kg/m}^3$ som passende. Jeg er ikke i stand til at vurdere hverken kravet som sådant eller de tilhørende talværdier; men den i (47) angivne grænse vil i forbindelse med et krav om mindst 350 kg cement pr. m^3 beton være ensbetydende med, at tilslagets gennemfald på $0,25 \text{ mm}$ -sigten aldrig må overstige 2-3%.

En passus i (47) kan muligvis lægges til grund for tydningen af kravet om en øvre grænse for indholdet af finstof. I forbindelse med en diskussion af det nødvendige luftindhold hedder det: "Da luftporerne kun gør betonens finmørtel frost-tøsaltbestandig, behøver beton med mindre maksimal Kornstørrelse, og dermed i reglen med større melkorn- og finmørtelmængde, mere indblandet luft end beton med 30 mm maksimal Kornstørrelse." I tilslutning hertil gives en tabel over det nødvendige luftindhold, afstemt efter finmørtelmængden i henhold til det skitserede princip. De på side 33 foreslåede retningslinier for, hvordan man kommer frem til et passende luftindhold, tager imidlertid sit udgangspunkt i værdier, der ikke forudsætter restriktioner m.h.t. finstofindholdet, og som under danske forhold erfaringsmæssigt giver tilfredsstillende holdbarhed ved ren frostpåvirkning. Hvis ovenstående betragtninger holder stik, skulle det altså være unødvendigt at overføre det tyske krav - i hvert fald i fuld streng-
hed. En vis begrænsning kan imidlertid nok have sin berettigelse, da som ovenfor anført et stort finstofindhold befordrer tendensen til slamlagsdannelse. Skønsmæssigt vil udover cementindholdet kunne tolereres $50-100 \text{ kg}$ finstof pr. m^3 beton, hvilket svarer til 3-6% af tilslaget. Som generelt krav foreslås: Gennemfaldet på $0,25 \text{ mm}$ -sigten må for det samlede tilslag ikke overstige 5%.

* * *

Tilslagets fysiske egenskaber spiller ingen større rolle, jf. side 28. Som også der nævnt skal dog kornene - i hvert fald i stenområdet - være frostsikre.

*) Se også side 40.

Diverse

(59) foreskriver en terningstyrke på mindst 300 kp/cm^2 ; (3) anfører, at der ikke er nogen snæver sammenhæng mellem betonens mekaniske styrke og dens opførsel over for tørsalte, og (66) udtaler sig på linie hermed. I betragtning af, at det med de øvrige krav til betonen (C/V-forhold etc.) vil være meget vanskeligt at undgå betydelig højere styrker, er kravet overflødigt.

(5) og (6) omtaler forsøg med et betontætningsmiddel, der ved at gøre porevæggene vandafvisende nedsætter kapillarsugningen.

Udstøbning

God kompakthed er generelt en afgørende forudsætning for, at betonens potentielle egenskaber realiseres. Hvad specielt frost- og tørsalt-påvirkning angår, vil en mangelfuld komprimering resultere i dels svagere struktur, dels forhøjet kapacitet for fryseligt vand og forøget evne til vandopsugning. Alle disse forhold virker i retning af at gøre betonen mere sårbar. En effektiv komprimering, helst ved vibrering, er derfor et ufravigeligt krav (57, 59).

(59) påpeger i forbindelse med komprimeringskravet, at det især er vigtigt at få komprimeret det lag, der ligger nærmest den fri overflade, idet der dog samtidig skal drages omsorg for, at koncentration af finpartikler fra tilslaget undgås. Lignende betragtninger er anstillet i (21), (58) og (66), der alle på den ene eller anden måde er inde på risikoen for, at der på overfladen dannes et slam- eller mørtellag med dårlig vedhæftning til og afvigende egenskaber fra den underliggende beton.

Et par af artiklerne har taget det spørgsmål op, hvori forskellen mellem overfladelaget og selve betonen består. (11) foreslår den forklaring, at overfladelaget er fattigere på indblandet luft end resten af betonen. Det er derfor mindre holdbart og skaller af ned til det niveau, hvor luftindholdet er tilstrækkelig stort. At luftindholdet rent faktisk er lavere i overfladen, er eftervist i (66); luftboblerne er til gengæld mindre, således at afstandsfaktoren ikke er reduceret i forhold til det indre af betonen.

Omend årsagen altså ikke skal søges i luftindblandingen, står det i henhold til (66) fast, at kraftigt og langvarigt arbejde med overfladen under afretning medfører forringet evne til at tåle frost og afisning. Også (60) fraråder, at afretningen gøres for omstændelig.

Ved støbning af elementer kan man opnå, at den flade, der indeholder det svækkede lag, ikke er den samme som den, der udsættes for is og salt, idet man sørger for, at sidstnævnte flade vender mod formen; i konsekvens af det ovenfor anførte om afretning må det nok frarådes at benytte formvibrering. En vis yderligere forbedring kan opnås ved brug af absorberende form, der i henhold til (60) skulle give en bedre struktur i overfladen; uhøvlet træ kan ikke i denne forbindelse betragtes som absorberende - men dog som en smule bedre end glat form. Måske er det i virkeligheden det forhold, at en vakuummåtte virker som en ekstremt absorberende form, der ligger bag den erfaring, at vakuumbehandlet beton ikke lider skade ved behandling med tørsalte.

Om udstøbningen kan konkluderes: Komprimeringen må ofres særlig omhu, hvis betonen kan blive udsat for frost og optøningsmidler. Afretningen skal foretages med forsigtighed, således at der så vidt muligt ikke dannes et slamlag på overfladen.

Hærdning

To temaer går igen i litteraturen, når talen er om perioden, fra betonen udstøbes, til den første gang udsættes for salt. Det første er, at betonen må sikres fornøden tid og gunstige vilkår for hærdningen. Det andet er, at der efter fuld hærdning skal være lejlighed for betonen til mindst én gang at tørre ud inden første saltning (1, 21, 50, 66, 67).

Med hensyn til, hvad der nærmere skal forstås ved fornøden hærdning, synes opfattelserne at gå i to forskellige retninger. Det ene hovedsynspunkt går ud på, at betonen i sig selv skal være således beskaffen, at den efter normal hærdning kan afises med salt uden risiko. Det andet går ud på, at betonen ikke umiddelbart kan tåle frost og kemisk afisning, men at den ved brug undergår sådanne forandringer, at den efterhånden bliver i stand til det.

Som repræsentanter for den første opfattelse står (12), (18), (21), (28), (50) og (68) samt muligvis flere andre, hvis holdning er mindre klar. (18) anfører, at fejlfrit fremstillet, luftindblandet beton allerede efter 14 døgns hærdning ved ca. 20°C - og efter mindst én gang at have haft lejlighed til overfladeudtørring - har en så høj bestandighed, at man uden betænkelighed kan bestrø den med salt. (43) anbefaler en forhærdningstid på 6 uger ved $+5^{\circ}\text{C}$, hvilket er ækvivalent med 2 uger ved 20°C . Klieger har under laboratorieforhold fundet, at den nødvendige forhærdningstid er op til 14 dage ved 40°F ($4,5^{\circ}\text{C}$) (68, 50^*), og han foreslår en tredobling under praktiske vilkår (68), hvilket også ACI går ind for (50^*); dette krav er altså i realiteten identisk med de foregående. Der hersker således i denne gruppe enighed om, at betonen som sådan efter 2 uger ved ca. 20°C - og under i øvrigt forskriftsmæssige hærdningsbetingelser - har opnået fuld hærdning efter praktisk målestok.

Heroverfor står en anden gruppe, som opererer med tidsrum af en ganske anden størrelsesorden. (43*) omtaler, at det i Forbundsrepublikken Tyskland frarådes at anvende smeltesalte på betonveje, der ikke er et år gamle. Ravn angiver i (7), at betonvejbælægninger meget dårligt tåler saltning de første vintre efter bygningen, og samme forfatter præciserer i (32) og (56) den med henblik på saltning nødvendige alder for luftindblandet beton til ca. 2 år. I (32) nævnes som en mulig forklaring på den forbedring, der efterhånden indfinder sig, at den sandsynligvis skyldes en vis forseglingseffekt fra oliespild, støv m.v. efter et vist tidsforløb. Denne tanke føres også frem i (45^*), (32) og flere andre, bl.a. (45) - der dog sætter grænsen ved 2 måneder, ikke 2 år - peger på muligheden af kunstig forsegling (imprægnering) af overfladen, hvis der ikke er tid til at afvente den naturlige. Disse forhold er omtalt selvstændigt side 42.

Det ovenfor refererede synspunkt, at enhver beton har behov for imprægnering, naturlig eller kunstig, rejser det spørgsmål, om det simpelthen skulle være umuligt at fremstille en beton, som i sig selv kan tåle kemisk afisning, eller om de pågældende erfaringer vedrører beton af utilstrækkelig kvalitet. Et entydigt svar kan ikke uddrages af kildematerialet, men den på side 40 gengivne bemærkning, at beton, som til stadighed forbliver våd og dog udsættes for frysning, ikke står til at redde, kan måske opfattes som et svar.

Betonvarer

For almindelig beton er luftindblanding hovedmidlet til sikring af frost- og tørsaltbestandighed, men for betonvarer, der fremstilles af jordfugtig beton, kan dette middel ikke umiddelbart tages i anvendelse. Walz og Schäfer anbefaler ikke desto mindre, at også blandinger af denne art tilsættes et luftindblandingsmiddel, idet selv det beskeden indhold af luftbobler, det er muligt at opnå, giver en mærkbar forbedring af holdbarheden (48).

I konsekvens af at et tilstrækkeligt luftindhold ikke lader sig indblende, må betonkvaliteten på anden vis forbedres. Følgende retningslinier fremgår af (47) og (48), der begge understreger, at det er særlig vigtigt at følge dem ved forsatsbeton:

- | | | |
|---|---------------------------------|-----------|
| a. C/V-forhold | $\geq 2,5$ | (47, 48) |
| b. Cementindhold | $\geq 450 \text{ kg/m}^3$ | (47, 48) |
| c. "Melfine" bestanddele
(defineret side 35) | $\leq 500 - 550 \text{ kg/m}^3$ | (48) |
| d. Tilslagets gradering | gunstig/særlig gunstig | (48)/(47) |
| e. Fuldstændig komprimering og beskyttelse mod
udtørring i mindst 7 dage | | (47) |

Desuden henviser begge de citerede kilder til muligheden for at forbedre modstandsevnen ved imprægnering, se side 42.

De i (47) studerede tørsaltskader på betonfliser kunne i øvrigt fortrinsvis føres tilbage til uegnet betonsammensætning og måske utilstrækkelig efterbehandling. Betonen var for sandrig og udviste i nogle tilfælde for højt indhold af "melfine" bestanddele.*⁾ Det skal i denne forbindelse bemærkes, at krav c uden videre kan erstattes med det på side 36 foreslåede krav.

Konstruktive foranstaltninger

Sikring af lav vandmætningsgrad

"Hvis situationen er sådan, at betonen til stadighed forbliver våd og dog udsættes for frysning, kan intet redde den fra til sidst at blive ødelagt af frost. Se blot til visse vandbygningskonstruktioner og især

*) Se også side 35.

til frostforsøg i laboratoriet." (Powers i 46). (67) angiver, at afskalninger ikke forekommer, medmindre der står frit vand på overfladen, når frysningen sætter ind. I tråd med dette er observationer i (52), der viser, at skader på betonveje optræder på de steder, hvor betonen har størst mulighed for at optage vand; som eksempel nævnes de afsnit af vejen, der forløber i afgravning, og den side af vejen, der ligger i den høje side af profilet, hvor dette har ensidigt fald. Endelig er i (48) konstateret en vis sammenhæng mellem forvitringsgrad og den gennem den øvre flade optagne vandmængde. (Derimod har der sammested ikke kunnet erkendes nogen relation mellem forvitringsgrad og naturlig vandoptagelse, henholdsvis totalporevolumen.)

Som supplement til det foranstående kan også henvises til den af mange forfattere påpegede nødvendighed af, at betonen får lejlighed til at tørre ud, inden den første gang udsættes for salt, jf. side 38.

At en lav vandmætningsgrad er fordelagtig, er umiddelbart forståeligt. Midlerne til at sikre den er - foruden luftindblanding, der er omtalt tidligere (se side 30) - afvanding ved hjælp af en hensigtsmæssig konstruktiv udformning, overfladeforsegling (imprægnering) eller kombinationer af disse forholdsregler.

Afvanding

Omend det i (11) gøres gældende, at utilstrækkelig udførelsespraksis har spillet en hovedrolle i udviklingen af mange aktuelle holdbarhedsskader, fremgår det dog af samme artikel at konstruktionsmæssig forsømmelighed, når det gælder afvanding, må bære sin store del af skylden. I (43) hedder det om betonvejes konstruktion og vedligeholdelse: "Konstruktøren skal begrænse vands indtrængen i betonen. Han skal således sørge for, at beton-overfladen får en sådan profilering, at vandet kan løbe fra uden at danne pytter, ligesom han skal forudse god dræning af regnvand og smeltet sne." Og senere: "Konstruktøren skal således tegne arbejdet på en sådan måde, at antallet af samlinger reduceres til det strengt nødvendige minimum, og at revnedannelse forhindres. Yderligere skal han i de eksisterende samlinger forudse en god tætningsanordning." (59) foreskriver afvandingen taget under overvejelse ved den konstruktive udformning af brodæk og konkretiserer en række punkter, man herunder skal have for øje.

Overfladeforsegling

Det er tidligere nævnt (side 39), vejbelægnings af beton i tidens løb opnår en vis brugsfremkaldt overfladeforsegling, ligesom muligheden for at påføre en kunstig forsegling blev nævnt. Litteraturen om dette emne er meget omfattende (1, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 16, 25, 27, 30, 32, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 47, 48, 50, 51, 53, 56, 58, 59, 60, 71) og udtaler sig overvejende til gunst for imprægnering, Kun en enkelt af de mange kilder er decideret negativ, idet (12) rent ud anbefaler, at imprægnering af betonoverflader bringes til ophør. Stort set bekræfter de eksperimentelle undersøgelser altså det, man intuitivt ville vente, nemlig at det er nyttigt at lægge hindringer i vejen for vandets adgang til betonen. Ikke alene nedbringes derved vandmætningsgraden, skurken i så mange holdbarhedsaffærer, men det er også en gevinst, at salt i opløst form hindres i at trænge ind i betonen, således at potentialet for osmotisk tryk ikke øges ud over det, der er betinget af de opløste stoffer i cementpastaens egen væskefase.

Undersøgelser omfattende såvel overfladeforsegling som luftindblanding viser, at i forening har de to forholdsregler en større effekt end summen af de to enkeltfaktoreres virkninger (8 og til en vis grad 5), eller luftindblanding tages simpelthen som en given og nødvendig forudsætning (32, 59, 60).

En lang række midler er afprøvet, og følgende typer har fundet praktisk anvendelse: linolie, mineralolie og epoxy- eller silikoneharpix. Linolie er billig, men virkningen holder sig kun et års tid, således at behandlingen må gentages. Epoxy- eller silikoneharpix er dyrere, men her er til gengæld en enkelt behandling tilstrækkelig til at sikre betonen frem til det tidspunkt, hvor den kan klare sig selv^{*)} (32, 59, 60).

Om danske erfaringer udtaler Statens Vejlaboratorium i (32): "Som kunstigt forseglingsmiddel har det vist sig, at kogt linolie blandet med terpentin eller andre opløsningsmidler er det mest økonomiske middel, når imprægneringen kun skal holde et års tid. Skal imprægneringen holde længere, skal påsprøjtningen gentages hvert år eller man kan anvende andre imprægneringsmidler."

 *) Sammenlign side 39.

Til slut skal bemærkes, at i stedet for overfladeforsegling kan en egentlig vandtætning komme på tale (20, 31, 59, 60).

Beskyttelse af armering

Korrosion af armering kan fremkaldes eller forstærkes af visse tø-salte, især chlorider, og det er derfor vigtigt at forhindre, at så-danne når frem til overfladen af armeringsjernene. Disse forhold er allerede berørt side 29, og som også der nævnt er den vigtigste modforholdsregel tilstrækkelig tykkelse af dæklaget og sikring af dette gennem forholdsregler til bevarelse af selve betonen.

Andre foranstaltninger

Forsaltning

Kemiske isfjerningsmidler vil i reglen have mindre skadevirkning, hvis de udstrøs, før betonen er belagt med is eller sne (1*). Herved bliver det termiske chok mindre (52), ligesom det må formodes, at koncentrationsgradienten bliver mindre, hvorved også svækkelsen i styrkemæssig henseende bliver det (1). Det er dog værd at notere sig, at forsaltning ifølge sagens natur medfører, at der omkring det enkelte saltkorn i starten vil dannes en koncentreret opløsning i direkte kontakt med betonen; forsaltning med CaCl_2 bør derfor ikke finde sted, idet dette salts koncentrerede opløsning er kemisk aggressiv (se side 12).

Afvaskning

Ved afvaskning af betonoverfladen om foråret kan man mindske den gradvise ophobning år for år af salt i betonens porer. Dette er en fordel med hensyn til potentialet for osmotisk tryk, og af særlig vigtighed er denne forantsaltning i forbindelse med brug af CaCl_2 , der som ovenfor nævnt er aggressivt i koncentreret opløsning (1).

Skadesbeskrivelse

Mange af de benyttede publikationer indeholder beskrivelse af skader, ofte med tilhørende forslag til klassifikation og gradsbedømmelse. Disse forhold er ikke medtaget i den foreliggende litteraturundersøgelse, da de i det samlede projekt behandles i en særskilt rapport, hvortil der henvises.

OVERSIGT OVER KONKLUSIONER

Strukturelle ødelæggelsesmekanismer

Når beton beskadiges af tørsalte, vil der i reglen være tale om fysisk nedbrydning af strukturen. Ganske vist kan beton nedbrydes kemisk, men dette forårsages meget sjældent af optøningsmidler, idet brugen af de stoffer, der har vist sig aggressive over for beton, er bragt til ophør. Blandt de gængse optøningsmidler er kun CaCl_2 i koncentreret opløsning - og en sådan opstår kun undtagelsesvist ved normal brug - i stand til at angribe beton kemisk. Analogt gælder, at alkalisalte vil kunne fremkalde eller forstærke skadelige alkalikiselreaktioner i beton med alkalireaktivt tilslag. Både dette forhold og visse stoffers kemiske aggressivitet er imidlertid specifikke virkninger ved bestemte salte. Den ødelæggelsesmekanisme, der er fælles for alle tørsalte, er af fysisk natur.

Fysisk nedbrydning opstår, når den fysiske påvirkning overstiger den mekaniske sammenhængsevne; denne sidste er en funktion af materialestrukturens træk- og forskydningsstyrke. Gennem studier af betons holdbarhed er det klarlagt, at en ødelæggende påvirkning kan fremkomme ved krystallisationstryk, alkalikiselreaktioner og frost samt muligvis termiske og svindbetingede spændinger. Der kan argumenteres overbevisende for den opfattelse, at tørsaltes virkning i det væsentlige består i en ændring af den normale frostpåvirkning, i nogle tilfælde muligvis forstærket ved overlejring af temperaturspændinger.

* * *

I holdbarhedsmæssig henseende er minimumskravet til betonen, at den skal være frostsikker, d.v.s. såvel cementpasta som tilslag skal være frostsikre. Tilslaget skal derfor - i hvert fald i stenområdet - bestå af tætte korn og er dermed heller ikke følsomt for den forstærkning af frostpåvirkningen, der forårsages af saltningen.

Vand udvider sig ved frysning ca. 9%, og omdannes al vandet til is, må vandmætningsgraden ikke overstige 0,917, hvis beskadigelse skal undgås. Cementpastaens porestruktur og væskefasens indhold af opløste stoffer bevirker imidlertid, at isdannelsen sker gradvist ned til

-78°C, således at vandmætningsgraden i praksis kan tillades at være noget højere end den teoretiske grænse. Det er imidlertid ikke tilstrækkeligt, at den gennemsnitlige vandmætningsgrad er tilstrækkelig lav; der må også stilles krav vedrørende fordelingen af de luftfyldte hulrum, der skal give plads for volumenforøgelsen. Den snævre porevidde bevirker nemlig, at strømmingen af vand fra isdannelsestedet til undvigelsesstedet sker under betydelig modstand, og er strømningsvejen for lang, vil der foran isfronten opbygges et så stort overtryk i vandet, at strukturen overbelastes. Overtrykket har to årsager: For det første resulterer isdannelsen i en rent mekanisk sammenpresning af det endnu ufrosne vand; det heraf frembragte overtryk betegnes hydraulisk tryk. For det andet resulterer udkrystalliseringen af ren is fra en væskefase, der som cementpastaens indeholder opløste stoffer, en lokal koncentrationsforøgelse, således at kapillar- og gelvand ikke længere er i ligevægt. Diffusion af vand fra cementgel til kapillarporer sker hurtigere end diffusion af opløste stoffer den modsatte vej, hvorfor der i cementgelen opstår et svind og i kapillarporerne et overtryk; dette sidste betegnes osmotisk tryk.

For at aflastningen af overtrykket kan blive tilstrækkelig stor, må afstanden fra et vilkårligt punkt i cementpastaen til den nærmeste undvigelsesflade, den såkaldte afstandsfaktor, ikke overstige en vis værdi, den såkaldte kritiske afstand. Sidstnævnte størrelse kan ikke beregnes kvantitativt, men dens afhængighed af de bestemmende faktorer - cementpastaens styrke og permeabilitet, vandets viskositet, mængden af fryseligt vand og afkølingshastigheden - kan vurderes kvalitativt.

Brug af kemiske optøningsmidler forrykker den rene frostpåvirkning på flere punkter:

1. Den mængde is, der dannes ved en given temperatur, nedsættes, hvilket under i øvrigt lige vilkår reducerer både hydraulisk og osmotisk tryk.
2. Potentialet for osmotisk tryk svarende til en given frostpåvirkning forøges, hvilket under i øvrigt lige vilkår forøger det osmotiske tryk.
3. Afkølingshastigheden forøges (termisk chok), hvorved såvel hydraulisk som osmotisk tryk øges.

4. Vandmætningsgraden forøges, fordi saltet dels omdanner is og sne til vand, dels fastholder vand, så udtørring af betonen forsinkes eller forhindres. Højere vandmætningsgrad vil under i øvrigt lige forhold give kraftigere påvirkning.

* * *

Det må desuden anses for muligt og sandsynligt, at nedbrydning som følge af stedvis kraftig termisk kontraktion kan være en medvirkende ødelæggelsesmekanisme.

Fænomenologiske forklaringer

Fænomenologiske forklaringer baseret på termisk chok og på isdannelsefrontens beliggenhed og bevægelse er foreslået i litteraturen. Udover det allerede nævnte om det termiske chok som en forstærkning af frostpåvirkningen har det ikke været muligt at udlede noget brugbart af de nævnte forklaringer.

Forskelle i den skadelige virkning af NaCl og CaCl₂ kan generelt henføres til forskelle i termisk chok. Under specielle forhold kan skadelige alkalikiselreaktioner virke i samme retning, d.v.s. til ugunst for NaCl. Alt i alt kan der imidlertid ikke på det foreliggende grundlag angives noget sikkert om, hvilket middel der bør foretrækkes af hensyn til betonen, og andre kriterier - økonomi, bivirkninger, smelteevne etc. - må derfor lægges til grund.

Det er ved laboratorieforsøg og gennem markobservationer slået fast, at klimatiske faktorer har indflydelse på skadesintensiteten. Resultaterne er dog for få og spredte til at kunne indpasses i noget mønster.

Korrosion af armering kan være en selvstændig skadesmekanisme, forårsaget af især chloridholdige optøningsmidler.

Empiriske regler

Det er muligt at angive regler, der i praksis giver god sikkerhed mod saltskader. Det vil imidlertid også gå godt i en lang række tilfælde, hvor disse regler ikke er overholdt.

Luftindblanding er et ubetinget gode; under danske forhold skønnes følgende luftindhold, der for hver enkelt kombination af tabelindgan-

gene ligger henholdsvis 1 og 2% over dem, som anses for nødvendige til beskyttelse mod ren frostpåvirkning, at være passende:

Cementindhold kg/m ³	Maksimalkornstørrelse - mm	
	16	32 og 64
350	5,0 - 6,0%	4,5 - 5,5%
400	5,5 - 6,5%	5,0 - 6,0%
450	6,0 - 7,0%	5,5 - 6,5%

I jordfugtig beton til betonvarer kan det ikke lade sig gøre at indblende luft i sådanne mængder, men det må tilrådes, at også sådanne betoner tilsættes et luftindblandingsmiddel, da også mindre mængder indblandet luft giver en mærkbar forbedring af modstandsevnen over for frost og tørsalte.

Om betonsammensætningen i øvrigt kan følgende retningslinier angives:

	almindelig beton		jordfugtig beton til betonvarer
	$d_{\max} = 16 \text{ mm}$	$d_{\max} \geq 32 \text{ mm}$	
C/V-forhold	$\geq 2,0$		$\geq 2,5$
Cementindhold	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$	$\geq 350 \text{ kg/m}^3$	$\geq 450 \text{ kg/m}^3$
Tilslag	1) frostsikkert 2) hensigtsmæssigt graderet 3) højst 5% < 0,25 mm		

Komprimeringen må ofres særlig omhu, hvis betonen kan blive udsat for frost og optøningsmidler. Afretning skal foretages med forsigtighed, således at der så vidt muligt ikke dannes et slamlag på overfladen. Vakuumbehandling har erfaringsmæssigt en gunstig virkning.

Betonen som sådan kan efter forskriftsmæssig hærkning i 2 uger ved 20°C - eller en dermed ækvivalent hærkning - anses for efter praktisk målestok at have opnået sine slutegenskaber. Når den derpå har

haft mulighed for udtørring, vil den i de fleste tilfælde kunne tåle at bestrøs med salt; dog må man være opmærksom på nedenstående forbehold.

De anførte foranstaltninger med hensyn til betonens sammensætning, udstøbning og hærkning vil som hovedregel give god sikkerhed mod saltskader. Hvis betonen imidlertid i medfør af sin funktion eller på grund af en mindre heldig konstruktiv udformning ikke får mulighed for lejlighedsvis at tørre ud, er alle anstrengelser forgæves. Det er derfor af afgørende vigtighed at have afvandingsspørgsmålet for øje, når konstruktionen udformes. Det kan også bidrage til at holde vandmætningsgraden passende lav, at vands adgang til betonen hindres ved overfladeforsegling. Under danske forhold er kogt linolie blandet med terpentiner eller andre opløsningsmidler et teknisk og økonomisk egnet middel til imprægnering af betonveje, når imprægneringen kun behøver at holde et års tid. Dette vil ikke sjældent være tilfældet, da der i løbet af 1 til 2 år dannes en vis brugsfremkaldt imprægnering.

Armering må beskyttes mod korrosion ved tilstrækkelig dæklagstykkelse og sikring af dæklaget gennem foranstaltninger til bevarelse af selve betonen.

Tøsalte vil i reglen have mindre skadevirkning, dersom de udstrøs, inden betonen er belagt med is eller sne. Afvaskning af betonens overflade efter saltningsæsonen mindsker saltophobningen år for år i betonens porer og forlænger dermed levetiden.

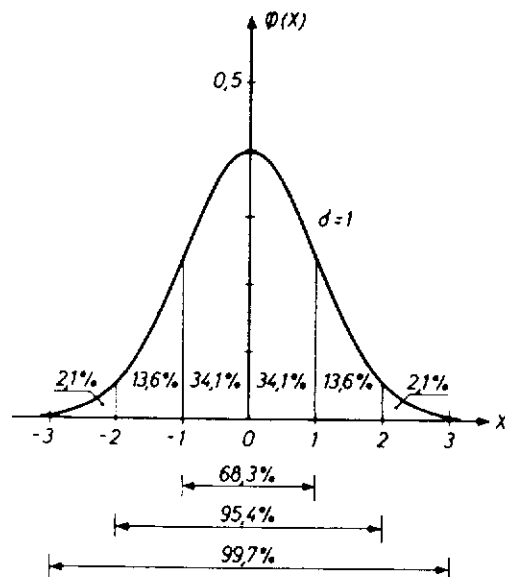
EFTERSKRIFT: OM PROBLEMETS STATISTISKE SIDE

Udsendelsen af den første version af rapporten gav anledning til enkelte reaktioner. Den første kom fra en af landets fremtrædende betonteknologer og lød: "De foreslåede luftindhold er for små." Ved det påfølgende møde i arbejdsgruppen udtalte et af medlemmerne - der vel at mærke ikke kendte ovennævnte kommentar: "De foreslåede luftindhold er for store; det er urealistisk at forestille sig, at de kan overholdes."

De to citerede udtalelser kan tages som eksponenter for de bemærkninger, der senere er fremsat om andre dele af kravene eller om kravene som helhed: af nogle karakteriseres de som utilstrækkelige, af andre som alt for vidtgående.

Det pudsige er, at de strengt taget godt kan have ret allesammen.

Den sidste påstand rummer ikke noget paradoks, men bygger på en simpel erkendelse af, at betons evne til at modstå kombineret påvirkning af frost og optøningsmidler også er et statistisk problem. Den statistiske side af et materialeproblem kan ofte behandles ud fra normalfordelingen, hvis tæthedsfunktion har det i figur 9 viste grafiske billede. Det er ikke på forhånd sikkert, at denne fordeling vil gælde i det foreliggende tilfælde, men det er også mindre væsentligt, da figuren primært skal tjene som støtte for tanken i de følgende ræsonnementer.



Figur 9. Tæthedsfunktionen for den standardiserede normalfordeling.

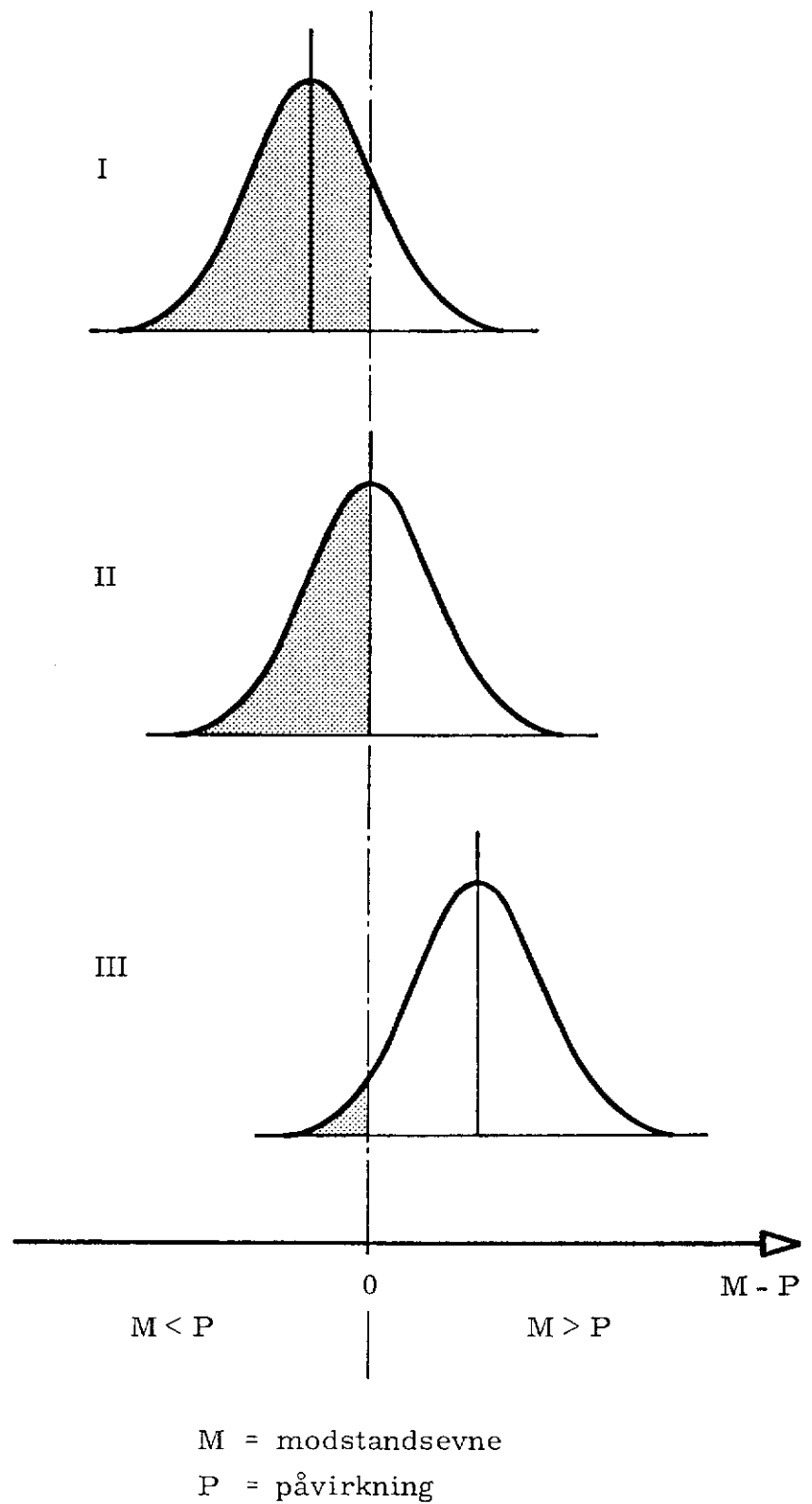
Det første spørgsmål, der melder sig, er: Hvad er det for en egenskab, vi søger fordelingen af? Det er vel klart, at den må have noget at gøre med betons evne til at tåle frost og afisning, og det er vel lige så klart, at man næppe kan gøre sig håb om at finde en målelig variabel. Jeg kunne tænke mig følgende kvalitative definition:

En abstrakt variabel, der angiver et mål for evnen hos beton, fremstillet efter de i nærværende skrift opstillede regler, til at tåle den påvirkning, som betonen udsættes for i den konstruktion og det miljø, hvor den er anvendt.

Den nævnte variabel må udtrykke MODSTANDSEVNEN i forhold til PÅVIRKNINGEN. Tænker man sig indrettet en målestok for differensen mellem modstandsevne og påvirkning, vil negative værdier svare til, at påvirkningen er større end modstandsevnen, d.v.s. betonen ødelægges, medens positive værdier analogt svarer til holdbar beton. Beliggenheden af denne målestoks nulpunkt i forhold til den relevante fordelings tæthedsfunktion vil da afgøre, hvor stor en del af betonen der holder, og hvor stor en del der skades. I figur 10 er vist 3 eksempler på den indbyrdes position af målestok og tæthedsfunktion; I svarer til, at ca. 85% af betonen beskadiges, II svarer til, at 50% af betonen beskadiges, og III svarer til, at kun 5% af betonen beskadiges.

Bemærk, at spørgsmålet om beskadigelse ikke er et "enten-eller", men et "hvor stor en del". Derfor kan det med rette hævdes, at reglerne i de allerfleste tilfælde er - langt - på den sikre side - og med lige så stor ret, at der ikke er 100% sikkerhed. (Synspunkterne i denne sag kan vel også tænkes at være farvet af, om man i sit daglige virke ser et repræsentativt udsnit af den beton, der fremstilles, eller om man fortrinsvis beskæftiger sig med betonskader.)

Sagen bliver ikke bedre af, at spredningen er ekstremt stor, fordi alle influerende faktorer tages i betragtning som stokatiske, selv om man så udmærket kan sige sig selv, at de har en systematisk virkning. Et blik på figur 11, hvor nogle af disse faktorer er opregnet, vil umiddelbart bekræfte dette. En graduering af kravene under hensyn til den systematiske indflydelse fra de nævnte faktorer ville givet-



Figur 10. 3 eksempler på betonkvalitetens fordeling i forhold til påvirkningen.

MODSTANDSEVNEN	PÅVIRKNINGEN
<p>Betonens struktur</p> <ul style="list-style-type: none"> - sammensætning - udstøbning - hærdning - historie - beskadigelser <p>Betonens tilstand</p> <ul style="list-style-type: none"> - klima - konstruktive forhold - historie <p>Andre faktorer</p>	<p>Klimafaktorer</p> <p>Betonens tilstand</p> <ul style="list-style-type: none"> - klima - konstruktive forhold - historie <p>Andre faktorer</p>

Figur 11. Nogle faktorer, som har indflydelse på modstandsevnen eller påvirkningen og dermed på deres indbyrdes forhold, d.v.s. betonens holdbarhed.

vis kunne nedbringe spredningen; noget sådant er imidlertid urealistisk tale - i hvert fald i øjeblikket og velsagtens i det hele taget.

Hvor man vil lægge sig med betonkvaliteten, altså dens modstandsevne, i forhold til påvirkningen, er i sidste ende et økonomisk anliggende. Er kravene for milde, vil for stor en del af betonen blive skadet, er de for strenge, vil den gennemsnitlige overbeskyttelse blive urimelig stor. Ethvert sæt regler, der opstilles, indeholder - hvad enten man gør sig det klart eller ej - et forsøg på afvejning af disse modstridende hensyn; det er min opfattelse, at et fornuftigt mål at sætte sig ville være følgende:

Mindst 95% af den beton, der fremstilles efter disse regler, bør kun give anledning til ubetydelige reparationsomkostninger.

LITTERATUR

1. Deicer Scaling Mechanisms in Concrete.
Pennsylvania State University, dec. 1970.
2. A. F. Inderwick: The freeze-thaw durability of pressed slabs under severe conditions.
Precast Concrete, 1971:9, s. 537-41 + s. 544-46.
3. P. Dutron & P. Van Ael: Dégradations superficielles causées par les sels de déneigement aux routes en béton de ciment - Etude de laboratoire.
CRIC 1968.
4. A. Johansson: Urea som avisningspreparat.
Cement och Betong 1970:3, s. 299-308.
5. H. Behrendt & E. Würth: Verbesserung der Frost-Tausalzbeständigkeit von Beton.
Betonstein-Zeitung 1971:3, s. 133-140.
6. Rolf Köneke: Frost- und Tausalzbeständiger Waschbeton.
Betonstein-Zeitung 1971:3, s. 141-145.
7. H. H. Ravn: Saltning og saltskader.
Dansk Vejtidskrift 1971:11, s. 205-212.
8. R. L. Davies: A Discussion of Laboratory and Field Experience With Portland Cement Concrete Sealers.
Highway Research Record 173, 1967, s. 1-12.
9. Orrin Riley: Development of a Bridge Deck Protective System.
Highway Research Record 173, 1967, s. 13-24.
10. Donald L. Spellmann & Richard F. Stratfull: Chlorides and Bridge Deck Deterioration.
Highway Research Record 328, 1970, s. 38-49.
11. Clifford L. Freyermuth, Paul Klieger, David C. Stark & Harry N. Wenke: Durability of Concrete Bridge Decks - A Review of Cooperative Studies.
Highway Research Record 328, 1970, s. 50-60.
12. J. Ryell & B. Chojnacki: Laboratory and Field Tests on Concrete Sealing Compounds.
Highway Research Record 328, 1970, s. 61-76.
13. Sea-dredged Aggregates for Concrete.
Proceedings of a Symposium held at Fulmer Grange Slough Buckinghamshire on 9. December 1968.
Sand and Gravel Ass. of Great Britain, 1969.
14. Nils Odemark & Sven Engman: Ytskador på svenska betongvägar 1955-57.
Statens Vägintitut, Stockholm, 1958.
15. Ruth D. Terzaghi, D. McHenry & H. W. Brewer, A. R. Collins & Author: Discussion of a paper by T. C. Powers: A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete.
Portland Cement Ass. Bull. 5A, 1946.

16. Rupert Springenschmied: Imprägnierungen von alten und neuen Betondecken.
Strassen- und Tiefbau 1967:11, s. 739-746.
17. Bert Romer: Analytische Frostwiderstandsbeurteilung mittels der Porenstruktur in porösen Baustoffen, Beton, Grobkeramik.
Strassen- und Tiefbau 1969:5, s. 474-479.
18. O. W. Blümel & R. Springenschmied: Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton.
Strassen- und Tiefbau 1970:2, s. 92-98.
19. R. Stolba: Betonangreifende Bestandteile in Wasser, Boden und Zuschlagstoffen.
Strassen- und Tiefbau 1970:2, s. 100-103.
20. J. Schöttgen: Abdichtungen, Kappen und Fahrbahnbeläge auf Betonbrücken aus der Sicht der Unterhaltung.
Strassen- und Tiefbau 1971:6, s. 471-480.
21. Kurt Walz & Rupert Springenschmied: Betonstrassen und Tausalzeinwirkung.
Beton 1962:11, s. 507-512.
22. E. Hartmann: Frostprüfverfahren von Beton.
Beton, 1964, s. 543-549.
23. Vorläufiges Merkblatt für die Ausbesserung von Oberflächen- und Kantschäden an Betonfahrbahnen mit Kunsthartz-mörteln.
Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen e.V. 405-1968.
24. Hinweise für die Ausführung durchgehend bewehrter Fahrbahndecken aus Beton im Hocheinbau auf alten Betondecken.
Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen e.V. 406-1968.
25. Vorläufiges Merkblatt für das Imprägnieren von Betonfahrbahnen.
Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen e.V. 407-1968.
26. The Elimination of Pavement Scaling by Use of Air-Entraining Portland Cement.
Portland Cement Ass., 1945.
27. Protection of Existing Concrete Pavements from Salt and Calcium Chloride.
Portland Cement Ass.
28. Curing Concrete Pavements.
Portland Cement Ass.
29. Air-Entrained Concrete.
Portland Cement Ass., 1967.
30. Effect of Various Substances on Concrete and Protection Treatments, Where Required.
Portland Cement Ass., 1968.
31. Carl Johan Wöhlk: Notat efter Brückenreferententagning i Bad Harzburg 6-8 oktober 1971.
Statens Vejlaboratorium, 1971.
32. Imprægnering af nystøbte betonveje.
Statens Vejlaboratorium, Skr. nr. 574, 1968.
33. N. Thuesen: Behandling af vinterveje. De kemiske smeltemidlers fordele fremfor grus.

34. N. Thuesen: Korroderer Vinterbehandlingen af Vejene med Salt og Klorkalcium Automobileerne?
35. N. Thuesen: Sammenligning mellem Natriumklorid og Kalciumklorid (Klorkalcium) som Midler til Smeltning af Sne og Is.
36. Moderne veje ... Moderne snefjerningsmetoder.
Solvay & Cie, Bruxelles.
37. Stop Concrete Damage with Linseed Anti-Spalling Compound.
National Flaxseed Processors Ass., Wash. D.C.
38. SK anti-spalling compound stops winter-damage to concrete.
Spencer Kellog Div. of Textron Inc, Buffalo N.Y., 1966.
39. Brev + div. materiale vedr. organiske silikoneharpixer - til Statens Vejlaboratorium.
Thanner-Vestol, 20.3.1969.
40. Vandex til betonveje.
Brev til privat firma.
Vandex, 12.7.1967.
41. Guardcote-mappe.
Dansk Shell 1969.
42. Protecton.
British Paints Limited m.fl.
43. Albert Carlier: Kemiske smeltemidlers virkning på vejbelægnin-
ger.
Dansk Vejtidskrift 1966:10, s. 199-203.
44. G. Dobrolubov & B. Romer: Entwicklung eines neuen Frost-Tau-
sals-Prüfverfahrens für Beton.
Strassen- und Tiefbau 1970:8, s. 674.
45. Wolfgang Hauptmann: Tausalzschutz für Beton im Fahrbahnbe-
reich an Brücken und Strassen.
Strassen- und Tiefbau 1969:12, s. 1142-45.
46. T. C. Powers: The mechanism of frost action in concrete.
Cement, Lime and Gravel 1966:5, s. 143-48 + 1966:6, s. 181-85.
47. Justus Bonzel: Beton mit hohen Frost- und Tausalzwiderstand.
Beton 1965:11, s. 469-474 + 1965:12, s. 509-14.
48. Kurt Walz & Axel Schäfer: Untersuchungen über den Frost-
Tausalz-Widerstand von Gehwegplatten aus Beton.
Beton 1965:10, s. 429-437.
49. Heinz-Otto Lamprecht: Der richtige Strassenbeton.
Beton 1965:6, s. 240-47.
50. Kurt Walz & Herman Helms-Derfert: Schutz von jungem Strassen-
beton gegen Tausalzeinwirkung.
Beton 1965:4, s. 155-159 + 1965:5, s. 201-05.
51. Russel Brink, William E. Griel & Donald O. Woolf: Resistance
of Concrete Slabs Exposed as Bridge Decks to Scaling Caused
by Deicing Agents.
Highway Research Record 196, 1967, s. 57-74.
52. R. E. Franklin: Frost Scaling on Concrete Roads.
Road Research Laboratory RRL Report LR 117, 1967.

53. Auslegeschrift 1228179. Verfahren zur Herstellung von salzbeständigem Zementbeton. Anmelder: Strabag Bau A-G.
Deutsches Patentamt 12.8.1965.
54. Wilhelm Baum: Saltstrøing. En utførlig orientering om problemer ved saltstrøing.
Dansk Vejtiddsskrift 1968:7, s. 133-138.
55. Just Christensen: Salskader på asfalkørebaner.
Dansk Vejtiddsskrift 1968:10, s. 194.
56. H. H. Ravn: Glatføre på veje. Saltning.
Dansk Vejtiddsskrift 1968:5, s. 91-94.
57. Justus Bonzel: Über die neuere zement- und betontechnische Entwicklung.
Beton 1967:7, s. 263-267.
58. Else Hartmann: Über die Wirkung von Frost und Tausalzen auf Beton ohne und mit luftporenbildenden Zusatzmitteln.
Zement-Kalk-Gips 1957:7, s. 265-281 + 1957:8, s. 314-323.
59. Precautions to be taken against the effects of de-icing materials on bridges and other structures.
FIP Commission on Practical Construction, Draft of Recommendations, 1972.
60. De-icing salts.
STUVO-report. (Bilag til 59).
61. T. C. Powers: The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete.
Portland Cement Association, Bulletin 90, 1958.
62. J. N. Hall & S. P. LaHue: Effect of Salt on Reinforced Concrete Highway Bridges and Pavements.
Highway Research Board, Special Report 115, 1970, s. 115-128.
63. R. W. Asmussen: Almen Kemi I.
Jul. Gjellerups Forlag, København 1962.
64. W. Schulze: Der Einfluss des Feinstkorns auf die Eigenschaften des Betons.
Beton 1960:2, s. 45-52.
65. H. Pfeifer: Beitrag zur Frage der Vorgänge beim Gefrieren von Wasser in den Baustoffen.
Beton 1960:3, s. 114-116.
66. W. R. Malisch, D. A. Raecke, D. M. Fischer, J. L. Lott, T. W. Kennedy & C. E. Kesler: Physical Factors Influencing Resistance of Concrete to Deicing Agents.
Highway Research Board, Program Report 27, 1966.
67. G. J. Verbeck & P. Klieger: Studies of "Salt" Scaling of Concrete.
Highway Research Board, Bulletin 150, 1957, s. 1-13.
68. P. Klieger: Curing Requirements for Scale Resistance of Concrete.
Highway Research Board, Bulletin 150, 1957, s. 18-31.
69. J. Jessing: Beton II.
DIA-B, København, 1968.

70. A. Schäfer: Frostwiderstand und Porengefüge des Betons. Beziehungen und Prüfverfahren. Dissertation Clausthal 1964.
71. A. Schäfer: Über den Frost- und Tausalzwiderstand von Beton. Tonindustrie-Zeitung 1965:11/12, s. 241-245.
72. ASTM C 457 - 67 T: Tentative Recommended Practice for Microscopic Determination of Air-Void content, Specific Surface and Spacing Factor of the Air-Void System in Hardened Concrete.
73. Foreløbige Retningslinier for Fremstilling af Luftindblandet Beton. DIF, 1954.
74. Alan D. Buck & Bryan Mather: Deterioration of Concrete Sidewalks and Curbs. Highway Research Board, Special Report 106, 1970, s. 44-52.
75. Edward A. Abdun-Nur & Richard C. Mielenz: Scaling of Air-Entrained and Non-Air-Entrained Concrete. Highway Research Board, Special Report 106, 1970, s. 53-56.
76. Concrete Bridge Deck Durability. Highway Research Board, Program Report 4, 1970.
77. William A. Cordon: Freezing and Thawing of Concrete - Mechanisms and Control. American Concrete Institute, 1966.

Arbejdsgruppen

BETON OG TØSALTE

SKADESREGISTRERING

ALMENT

Sideløbende med litteraturundersøgelsen har arbejdsgruppen registreret en række forskellige tilfælde af skader på beton, hvor frostpåvirkninger i forening med anvendelsen af afisningsmidler er angivet som skadesårsag.

Formålet har været at få et helhedsbillede af skadessituationen for om muligt derved at kunne slutte, under hvilke forhold der er stor, henholdsvis ringe sandsynlighed for skader som følge af kombinerede påvirkninger af frost og afisningsmidler. Samtidig er søgt at få et indtryk af omfanget af skader.

Undersøgelsen er udført ved interviews af kontakter etableret gennem udsendte spørgeskemaer eller udpeget via interessentgruppen, ved besigtigelser af skadet beton og endelig gennem forskelligt materiale om skadestilfælde stillet til rådighed for arbejdsgruppen.

Herudover har gruppen søgt at indsamle praktiske erfaringer om anvendelsen af beskyttende overfladebehandlinger og har derfor bl. a. fulgt de forsøg, en gruppe i Vejdirektoratet udfører med forskellige overfladebehandlinger af betonautoværn på omfartsvejen ved Lyngby station.

REGISTRERING

Indsamlingen af praktiske erfaringer med skader på beton og udvælgelsen af eksempler på skader, som skønnedes at være typiske, baseredes på direkte kontakter - hovedsageligt i Vejdirektoratet og D.S.B. - og på kontakter fra de udsendte spørgeskemaer til producenter af beton.

Spørgeskemaer - se bilag - blev udsendt og returneret i følgende omfang:

	Spørgeskemaer		Heraf var skader <u>registreret ved</u>
	<u>udsendt</u>	<u>returneret</u>	
Betonvareproducenter	100	41	25
Betonelementproducenter	40	17	10
Entreprenører og færdigbetonproducenter	100	24	11
		5	3
I alt	<u>240</u>	<u>87</u>	<u>49</u>

Der er besigtiget eller indsamlet oplysninger om

betonbroer

betonbelægninger

betonvarer og -elementer.

BESIGTIGELSER OG INTERVIEWS

SKADER PÅ BETONBROER

Ved bistand bl. a. fra Vejdirektoratet er udvalgt og besigtiget 7 broer som værende typiske for de almindeligste skadestilfælde. Alle broer er overførsler over motorveje.

Fra disse broer kan skaderne opdeles i

- skader på insitu-støbte brokanter
- skader på præfabrikerede kantelementer
- skader på belægninger
- andre skader.

Fra D.S.B. er bl. a. stillet materiale til rådighed om skader på en fodgængerbro.

Efter besigtigelse af en række betonbroer udover disse er det arbejdsgruppens opfattelse, at de her beskrevne skadestilfælde kan betragtes som typiske for skadede brokonstruktioner.

Insitu-støbte brokanter

Eksempel: Bro fra 1956.

Skadesbillede: Den ene brokant er stort set uden skader, mens den anden er kraftigt skadet i form af store revner og afsprængninger, gennemsvivninger med udfældninger på "facade" og underside samt en del springere over større porøse sten.

Broens fortovsbelægninger er kraftigt afskallede.

Broen har ensidigt tværfald mod den skadede kant.

Insitu-støbte fortovsbelægninger

Eksempel: 2 broer fra 1957.

Skadesbillede: Kraftige, sammenhængende afskalninger, formentlig udgående fra stenpartikler. Skaderne forekommer fortrinsvis i belægningens lunger. I brofacader er konstateret fine revner med udfældninger.

Præfabrikerede kantelementer

Eksempel: 3 broer fra 1966-1969.

Skadesbilledet: De fleste kantelementer er skadede, men fordelingen af skadede og ikke-skadede elementer er tilsyneladende tilfældig.

Skadesbilledet er det samme i begge brokanter, dog med varierende intensitet fra bro til bro. Skaderne fremtræder dels som fine netrevner, dels som større revner, der hovedsageligt følger fuger eller "kredser" om rækværksseptre. På flere af disse elementer forekommer gennemsvivning med udfældninger på elementernes underside.

Videre forekommer afskalninger, pletvise eller i større felter, udgående fra overvejende tætte stenpartikler.

Større afskalninger forekommer fortrinsvis på elementernes overside. Der er iagttaget - med en vis usikkerhed - en udvikling af skaderne i løbet af en periode på 3 måneder uden frost.

Andre skader

På enkelte af de besigtigede broanlæg forekommer skader, hovedsageligt i form af større eller mindre revner, gennemsvivninger med udfældninger i partier af betonen, der på grund af mangelfuld dræning af konstruktionen har været vandmættet i perioder.

Fodgængerbro

Konstruktion: U-formede helelementer af forspændt beton, simpelt understøttet over 5 fag på insitu-støbte betonpiller.

Skader: Mindre end 1 år efter opførelsen konstateredes, at elementer og top af pille, undtagen ved det højstliggende vederlag, var så stærkt beskadigede, at reparation var nødvendig.

Formodet skadesårsag: Utætheder i fuger mellem fortovsbelægning og betonelement og mangelfuld dræning ved vederlag, samt - for pillernes vedkommende - mangelfuld beskyttelse mod udtørring af betonen umiddelbart efter udstøbningen.

SKADER PÅ BETONBELÆGNINGER

Der er for gruppen stillet materiale til rådighed om skader på tungt trafikerede betonbelægninger ved benzinlagre samt på en flyveplads. Skaderne forekommer som afskalninger og revner.

Skadesårsagen er angivet som

utilstrækkelig afvanding
for ringe vandtæthed (for lavt cementindhold)
for lavt indhold af indblandet luft
for lav styrke
slamlag i overfladen.

For flyvepladsbelægningens vedkommende, hvor skaderne opstod på en gammel betonbelægning, efter at man var begyndt at anvende urea til afisning, har ikke kunnet oplyses om skadesårsager.

SKADER PÅ BETONVARER m.v.

Besvareelserne på de udsendte spørgeskemaer fra ca. 20 betonvare- og betonelementfabrikker og betonværker, er sammenfattet således:

Fliser

Skader i form af afskalninger og revner er hovedsageligt konstateret på fliser med en bøjningstrækstyrke på 30-40 kp/cm² og/eller med stor porøsitet som følge af utilstrækkelig komprimering.

Anvendelsen af pudslag eller afretningslag påvirker ikke som sådan flisernes holdbarhed. Der er ikke registreret skader på fliser, som er fremstillet under kombineret tryk og vibrering og med en bøjningstrækstyrke på 50-60 kp/cm².

Altan- og trappelementer m.v.

På andre præfabrikerede betonkomponenter, bjælker, altan- og trappelementer, væg- og dækelementer o. s. v. er der kun oplyst om få frost- og tørsaltskader, som udelukkende er opstået på beton med almindelig "jernbetonkvalitet" d. v. s. med en terningtrykstyrke på min. 240 kp/cm² og uden luftindblanding.

PERRONFORKANTER

Fra D.S.B. er oplyst om leverancer i perioden 1966-1969 på ca. 2.300 overplader til perronforkanter.

På ca. 1.800 af disse er ikke registreret væsentlige skader, mens de ca. 500 efter 2-3 år var så nedbrudte, at de måtte udskiftes.

Disse sidstes manglende holdbarhed henførtes til et usædvanligt højt indhold af ler i gruset, delvis som klumper.

Betonen har til samtlige overplader været sammensat i forholdet 1:3 efter rumfang og uden anvendelse af luftindblanding. Pladerne er siden 1967 fremstillet på vibrationsbord med en terningtrykstyrke på 440-450 kp/cm², og før 1967 ved "blødstøbning", uden bearbejdning og med terningtrykstyrke lig 320-330 kp/cm².

OVERFLADEBEHANDLING

Beskyttelse af betonen mod frost- og tørsaltskader ved hjælp af en overfladebehandling er herhjemme af forholdsvis ny dato, hvorfor det kun har været muligt at indsamle få oplysninger om erfaringer med disse.

Blandinger af kogt linolie med petroleum eller terpentin har været anvendt, men kun i få år, tilsyneladende med acceptable resultater.

I øvrigt anses disse linolieblandinger normalt kun at kunne beskytte betonen effektivt i 1-3 år.

BILAG: SPØRGESKEMA

1. Har De inden for Deres arbejdsfelt konstateret skader på beton, som kan henføres til kombineret påvirkning af frost og afisningsmidler (f.eks. tørsalt)?

ja

nej

2. Hvilke betonkonstruktioner eller betonkomponenter drejer det sig om?

.....

3. Mener De, at De har oplysninger af interesse, og vil De være villig til at meddele os disse oplysninger ved en personlig henvendelse fra os?

ja

nej

Evt. kontaktmand

Firma, navn

adresse

telefonnr.