

70 SBI - PUBL

Sertryk af *INGENIØREN* nr. 27 og 28, oktober 1957

DK 666.97/.98.004.6

# FORELØBIG OVERSIGT OVER ALKALIREAKTIONER I BETON I DANMARK

NIELS MUNK PLUM

ERVIN POULSEN

G. M. IDORN

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT · SÆRTRYK NR. 91  
I KOMMISSION HOS TEKNISK FORLAG KØBENHAVN 1957



STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

29 JULI 1996

204 01311P

# Foreløbig oversigt over alkalireaktioner i beton i Danmark

666.97/98.004.6

af N. M. Plum, Ervin Poulsen og G. M. Idorn

Statens Byggeforskningsinstitut

## Indledning.

I de sidste årtier er der sket en rivende udvikling inden for jernbetonen, idet man takket være forbedringer af råmaterialernes kvalitet — cementens, grusets og stålets — jævnsides med en udvikling i såvel beregningsteknik som beton-teknik i forbindelse med forbedrede blande- og komprimeringsmetoder er blevet i stand til at fremstille betonkonstruktioner med højere og højere tilladelige spændinger. Disse fremskridt har umiddelbart haft store økonomiske virkninger, dels fordi dimensionerne og dermed egenvægten har kunnet reduceres, dels fordi hele denne udvikling i almindelighed har forbedret forholdet mellem konstruktionernes bæreevne og anlægspris.

De egenskaber hos beton, som især har betinget denne rivende udvikling er dens store styrke og dens holdbarhed. Af disse egenskaber er for den projekterende ingeniør styrken den, han umiddelbart interesserer sig mest for, og den han lettest kan holde sig underrettet om og kontrollere.

Anderledes med holdbarheden, den tager man i de fleste tilfælde for givet, når betonen er omhyggeligt udført.

I denne artikel redegøres for alkalireaktioner i beton, en form for nedbrydning, der under visse omstændigheder kan optræde og i de senere år er påvist her i landet. Det skal dog straks understreges, at langt den overvejende del af landets betonbygværker, herunder almindelig husbygning, fabriksbygninger, fundamenter og vejbaner, når de er rigtigt og forsvarligt udført, kan betragtes som næsten ufor-gængelige. Som bekendt findes der i syden betonbygværker bygget med gammeldags Romancement, som er årtusinder gamle, men også gamle bygværker med Portland-Cement kan findes her i landet i en tilstand, der er lige så god, som da de blev bygget, se fig. 1 samt (47 S 26), (52 M 11), (55 L 2) og (56 A 1).

Trods disse gode erfaringer må det fastslås, at betonen i en del ud-

satte bygværker efter en kortere eller længere årrække er blevet nedbrudt, se fig. 2. Man mente, og i mange tilfælde med rette, at dårlig udførelse har en væsentlig del af ansvaret for disse skader.

Utilstrækkelig frostbestandighed var indtil det tidspunkt, SBI påbegyndte sit arbejde herhjemme, almindeligt anset for at være den alvorligste mangel ved betonens holdbarhed, og forskelligt blev netop i SBI's første år fra mange sider gjort for at forbedre denne ved anvendelse af luftindblandingsmidler, bedre grusmaterialer, rigtigere prøvemethoder o. s. v.

Adskilligt tydede imidlertid på, at også andre alvorlige årsager måtte være på spil, og civilingeniør P. Nerenst, der dengang var ansat på SBI, gjorde i 1951 efter en studierejse i USA opmærksom på (52 N 1), (52 N 6), at de dengang alene i USA påviste alkalireaktioner, som oprindeligt var erkendt af professor T. E. Stanton (42 S 1), (42 S 2), antagelig også kunne tænkes at optræde her. Nerenst's iagttagelser fortjener opmærksomhed, særlig fordi mange betonteknikere både

her og i udlandet på det tidspunkt anså det for usandsynligt med de tilslagsmaterialer, der anvendes i Europa, at tilsvarende skader kunne forekomme her. Fænomenets optræden i USA er allerede beskrevet på dansk i 1947 (47 P 8). Endvidere skabte det naturligvis usikkerhed, at de forskellige forvitningsårsagers virkninger kan være ret ensartede, og at flere årsager kan virke sammen i en accelereret nedbrydning.

SBI tog derfor spørgsmålet op om en intensivering og udvidelse af den forskning vedrørende betons holdbarhed, der allerede igennem adskillige år var drevet mange steder.

Skal man ved en sådan undersøgelse nå et pålideligt resultat, der i praksis virkelig kan sikre en forbedring af holdbarheden, må man søge frem til en klarlæggelse af de fysiske, kemiske og mekaniske årsager til forvitring, og her møder man alvorlige problemer.

I (52 S 15) er givet en oversigt over de faktorer, der har indflydelse på betonens holdbarhed. Denne oversigts hovedgrupper omfatter:

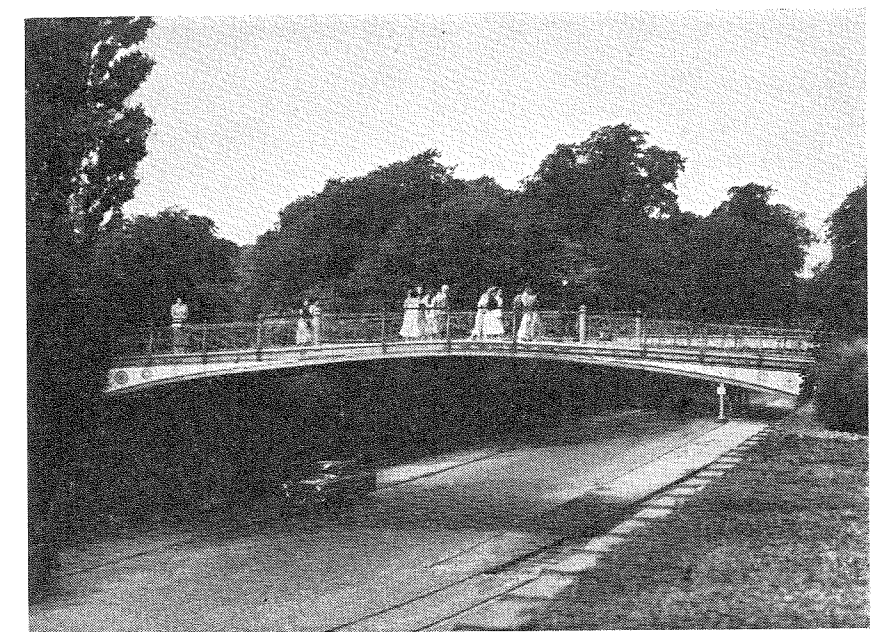


Fig. 1. Danmarks ældste jernbetonbro — Langeliniebroen — opført 1894 efter projekt af A. Ostenfeld.

1. Den hærdnede betons fysiske egenskaber.
2. Råmaterialernes egenskaber.
3. Betonarbejdets udførelse.
4. Bygværkets milieu, d. v. s. klimatiske og kemiske påvirkninger fra omgivelserne.
5. Bygværkets mekaniske påvirkninger fra belastning m. v.

En mere detaljeret oversigt er vist som fig. 3.

Det er naturligvis ikke alle de heri nævnte faktorer, der er lige betydningsfulde, men oversigten kan illustrere, hvor kompliceret forskningen på dette område let kan blive.

SBI bevilgede penge til nødvendige forundersøgelser og søgte samarbejde med C. t. O., F. L. Smidth & Co.s laboratorium og mag. scient. H. Pauly, Mineralogisk Museum.

I slutningen af 1953 kunne G. M. Idorn og Nerenst i en intern SBI-rapport (53 I 2) forelægge overbevisende argumenter for:

1. At de flinttyper, som er almindelige i næsten alle danske grusmaterialer, kan være reaktive over for alkalier, der kan komme fra cementen, fra grusmaterialer som f. eks. forvitrende feldspat eller fra omgivende jordbund og vand,
2. at disse reaktioner under særlige forhold kan bevirke udvidelser og revnedannelser i beton, og
3. at sådanne udvidelser og revnedannelser, der på afgørende måde kan nedsætte betonbygværkers levetid, faktisk forekom i nogle større bygværker her i landet, hvor meget hurtig forvitring af betonen var konstateret.

Hermed var det eftervist, at alkalireaktioner for visse typer af bygværker kunne spille en stor rolle også herhjemme, og den interesse, dette skabte i større kredse, gjorde det rimeligt, at der til at forestå den videre forskning i september 1954 nedsattes et udvalg baseret på at skaffe det bredest mulige samarbejde for løsning af opgaven. Udvalgets navn blev »Udvalget vedrørende alkalireaktioner i beton«.

Medens det er lykkedes at bekæmpe de skader, der truer betonen gennem f. eks. frost, vejrliget og havvandsangreb, kunne de forholdsgener, der kræves for at undgå de nu påviste skadelige alkalireaktioner i beton, ikke umiddelbart anvises. Udvalgets mål er at finde til bunds i problemerne og anviser veje til at undgå skadelige alkalireaktioner, således at også denne årsag til nedbrydning er elimineret.

Udvalget forestås af Statens Byggeforskningsinstitut og Akademiet for de tekniske Videnskaber i fællesskab og har følgende sammensætning:

Aalborg Portland-Cement-Fabrik A/S og Dansk Andels Cement-fabrik.

Civilingeniør, dr. techn. Erik V. Meyer, C.t.O. (M, L).

ATV, civilingeniør T. Heilmann, F. L. Smidth & Co. (L).

ATV og SBI, civilingeniør P. Kern-Jespersen, formand for udvalget.

Danmarks geologiske Undersøgelse, statsgeolog, dr. phil. H. Gry, (G).

Dansk Ingeniørforening, stadsingeniør H. Petersen, (M).

Dansk Ingeniørforening, amtsvejspektør Ivar Jørgensen, (M).

Danske Statsbaner, afdelingsinge-

nør, cand. polyt. A. Jeppesen, (M).

Danmarks tekniske Højskole, professor, dr. techn. A. H. M. Andreassen, Lab. for mørtel, glas og keramik, (L).

Danmarks tekniske Højskole, professor, dr. techn. A. Efsen, Lab. for bygningsteknik, (L).

Suppleant: laboratorieingeniør, cand. polyt. Ole Garbo.

Foreningen af Grusgrave- og Skærvefabrikker, civilingeniør C. Kähler, Nymølle Skærvefabrik, Hede-husene, (G).

Carl Nielsen A/S, civilingeniør K. Steen Kristensen, (G).

SBI, civilingeniør Niels Munk Plum, (G).

Statsprøveanstalten, afdelingsingeniør, cand. polyt. Johs. Andersen, (L).

Vandbygningsvæsenet, civilingeniør K. Otterstrøm, (M).

Civilingeniør P. Nerenst, Aktieselskabet Rockwool (M, G, L).

Mag. scient. H. Pauly, Kryolitselskabet »Øresund« A/S (M, G).

Udvalgets arbejde har været organiseret i tre underudvalg, markudvalget, grusudvalget og laboratorieudvalget. Det fremgår af de i oversigten vedføjede bogstaver M, G og L, hvorledes de forskellige parter er repræsenteret i underudvalgene.

Civilingeniørerne G. M. Idorn og Ervin Poulsen fra SBI stillede til rådighed som udvalgets faste videnskabelige medarbejdere. I perioden fra den 1.7.1955 til 1.10.1956 arbejdede endvidere civilingeniør K. E. Haulund Christensen for udvalget på laboratoriet for mørtel, glas og keramik, Danmarks tekniske Højskole.

Der blev oprettet et fælles sekretariat, som koordinerer hele arbejdet, og som har til huse i SBI.

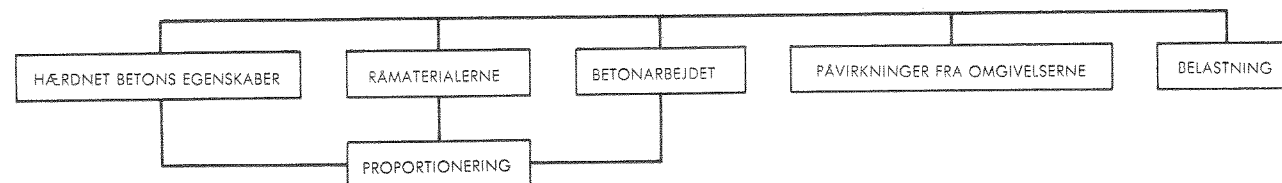
I tiden fra udvalgets nedsættelse til 1.10.1956 fungerede civilingeniør P. Nerenst og herefter civilingeniør N. M. Plum som sekretær.

Markudvalget forestår undersøgelser af betonbygværker, dels i marken, d. v. s. ved besigtigelser, målinger etc., dels i laboratoriet ved detaljerede petrografiske undersøgelser af udborede betonprøver. Dette arbejde udføres af udvalgets faste medarbejdere.

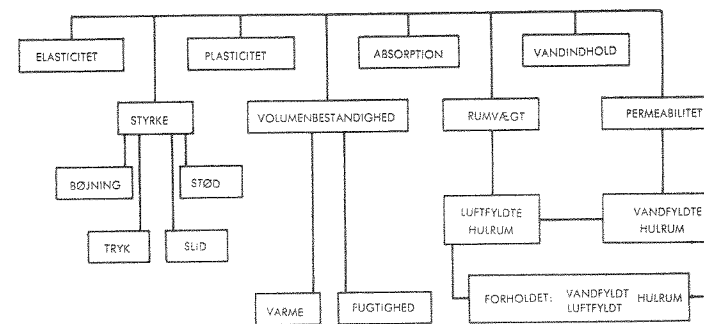
Markarbejdet foregår fra en specielt indrettet laboratievogn. Laboratoriearbejdet i lokaler, der venligst er stillet til disposition på Danmarks tekniske Højskole.

Grusudvalget forestår undersøgelser af danske grusmaterialer. Undersøgelserne foretages af Danmarks geologiske Undersøgelse og omfatter oparbejdning af undersøgte grusprøver til laboratiefor-

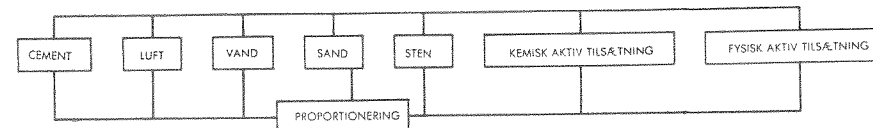
## FAKTORER SOM KAN INDVIRKE PÅ BETONENS HOLDBARHED



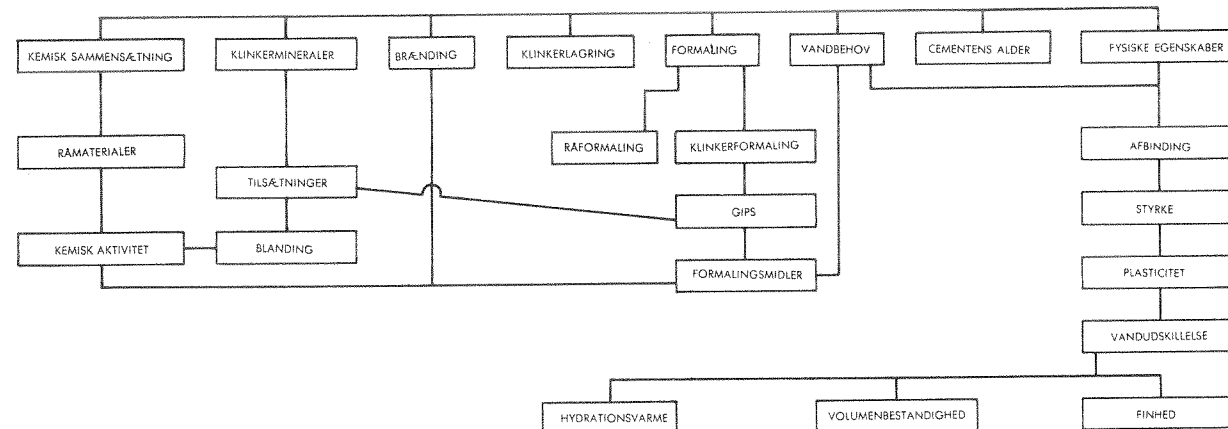
### HÆRDNET BETONS EGENSKABER



### RÅMATERIALERNE



### CEMENT



### SAND

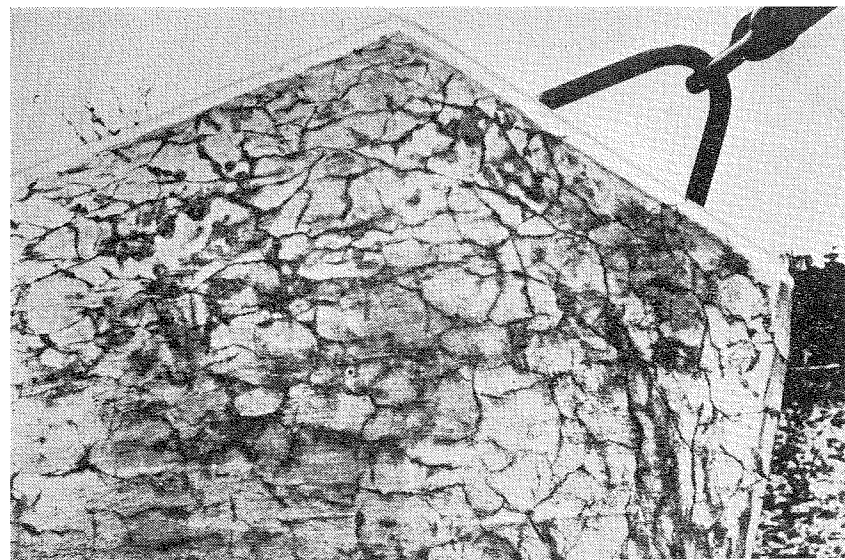
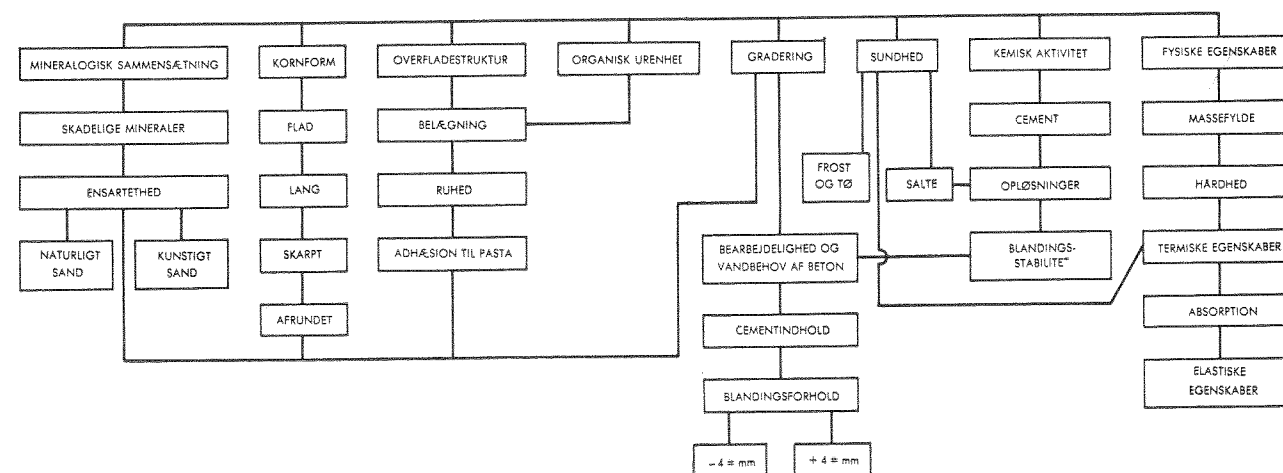
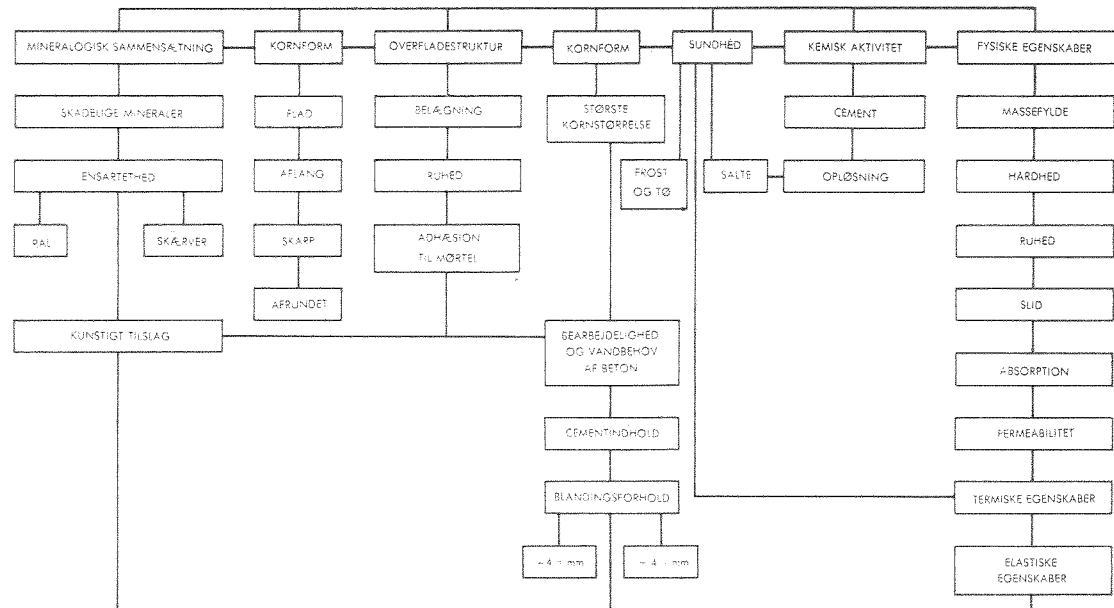


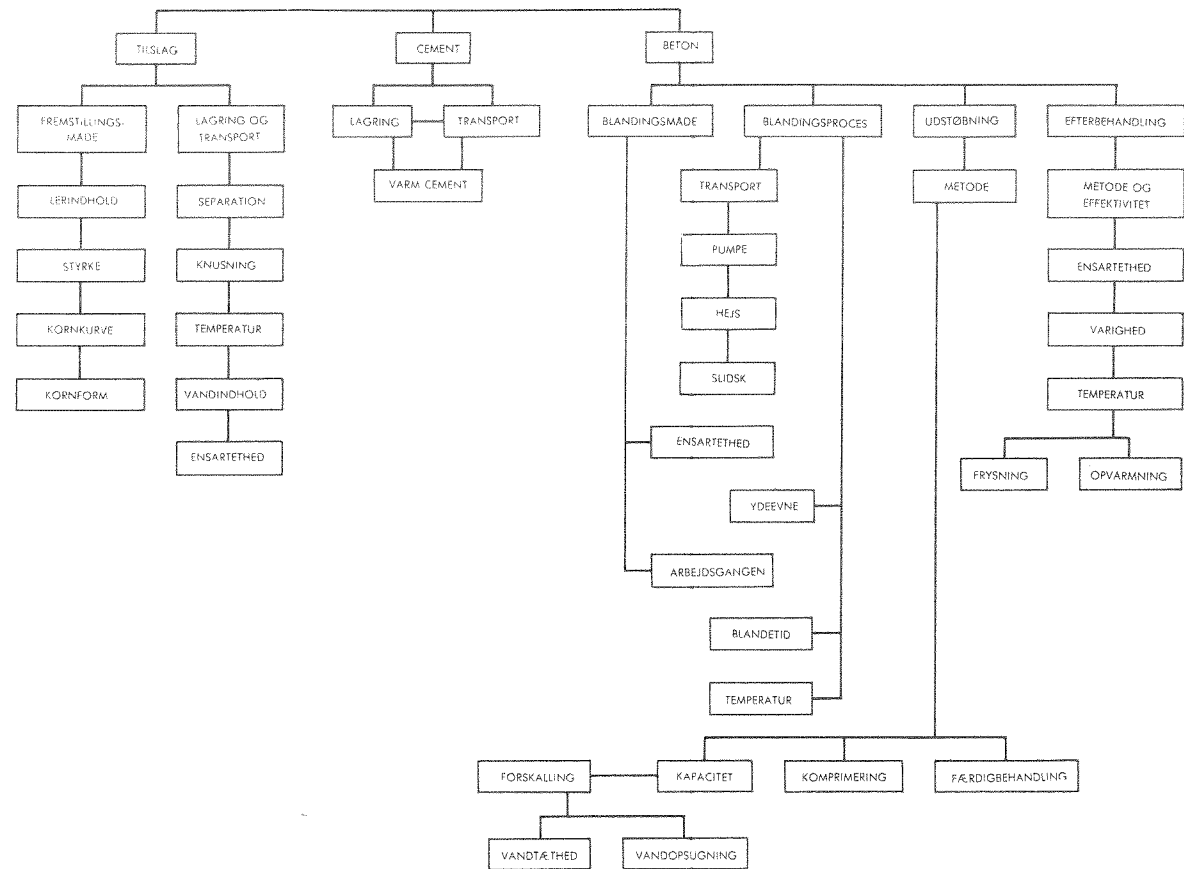
Fig. 2. Revnedannelser i betonfundament beliggende i omegnen af København. Bygværket er opført i sommeren 1954 og de første skader opstod for vinteren 1954-55.

Fig. 3 (a). Faktorer, der påvirker betons holdbarhed. Efter (52 S 15).

STEN



BETONARBEJDETS UDFØRELSE



PÅVIRKNING FRA OMGIVELSERNE

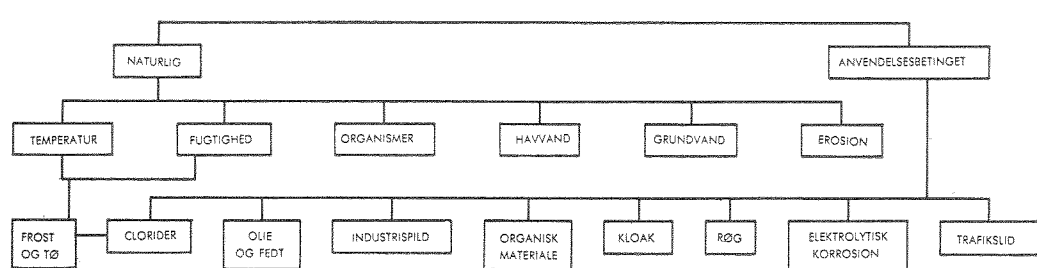


Fig. 3 (b).

BELASTNING

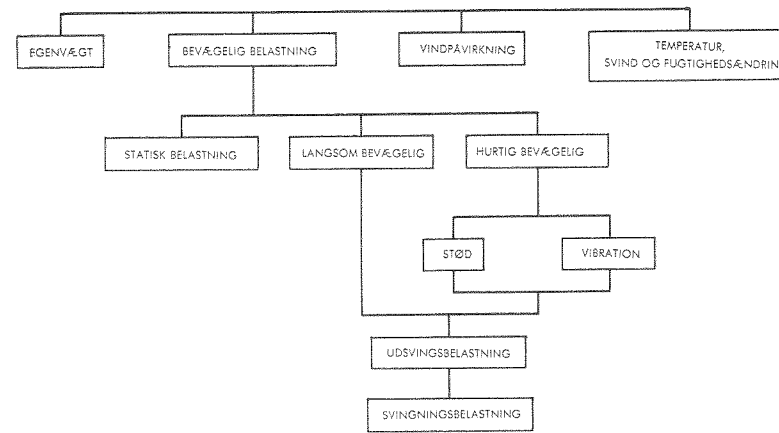


Fig. 3 (c).

søg. Endvidere har professor A. Tovborg Jensen, Landbohøjskolen, foretaget en række røntgenanalyser af forskellige flinttyper.

Laboratorieudvalget forestår laboratorieforsøg med de af grusudvalget indsamlede prøver. Dette arbejde omfatter undersøgelser af danske cementer, forsøg med mørtel- og betonprismer, kemiske undersøgelser og endvidere særlige basisundersøgelser. Laboratorieudvalgets forsøg foretages af F. L. Smidth & Co.'s laboratorium, Statsprøveanstalten, lab. for bygningsteknik, samt bl. a. med hensyn til tilsætningsmidlers virkning, på lab. for mørtel, glas og keramik. Den analytiske bearbejdning af resultaterne foretages i det væsentlige af udvalgets faste medarbejdere under medvirken af SBI's statistiske afdeling.

Udvalget har fra arbejdets begyndelse haft kontakt med forskningen vedrørende betons holdbarhed i andre lande. Civilingeniør Ervin Poulsen arbejdede i 1954 nogle måneder på forskellige amerikanske betonforskningsinstitutioner, medens civilingeniør G. M. Idorn i 1955 studerede undersøgelsesmetoder på Building Research Station i England som en direkte forberedelse til arbejdet på udvalgets petrografiske laboratorium. Ervin Poulsen har siden sit besøg i USA været medlem af den ASTM komité, der forestår udarbejdelsen af amerikanske standardbestemmelsesmetoder for grusmaterialers alkalireaktivitet.

Disse kontaktformer har i de forløbne år været suppleret med korrespondancekontakter, ligesom amerikanske og engelske specialister har været udvalgets gæster her i landet.

I den senere tid er kontakter også etableret med de skandinaviske lande, dels med den svenske Ballast-komitéen ved fil. dr. Tor Hagermann, dels med professor I. Th. Rosenqvist ved Norges geotekniske Institut, der har foretaget meget

opsigtsvækkende og betydningsfulde undersøgelser vedrørende andre former for ødelæggende kemiske reaktioner i beton.

Udvalgets undersøgelser.

Den ovenfor anvendte opdeling af underudvalgenes arbejde illustrerer, at udgangspunktet for undersøgelserne er betonbygværker. Dernæst indgår betonens råmaterialer:

1. cement
2. grusmaterialer
3. vand
4. tilsætningsmidler.

Forskellige kombinationer af disse materialer undersøges analytisk ved forsøg under definerede omstændigheder, f. eks. ved mørtelprisme- og betonprismeforsøg. Endelig indgår sådanne basisundersøgelser, f. eks. rent teoretiske udredninger, som er nødvendige for at forklare de fænomen, der iagttages eller registreres i bygværker eller ved forsøg med materialerne.

Umiddelbart efter udvalgets dannelse iværksattes en orienterende undersøgelse af godt 400 udendørs betonbygværker i Jylland, på Fyn og på Sjælland. Formålet hermed var dels at etablere en foreløbig oversigt over betonbygværkers holdbarhed i almindelighed og at konstatere, om typiske forskelle i for-

vitningsomfang og -art gjorde sig gældende fra egn til egn, dels at bedømme, i hvilket omfang typiske symptomer på alkalireaktioner forekom, og endelig herigennem at finde frem til egnede objekter for mere indgående studier, såfremt orienteringen bekræftede det foreløbige indtryk, at dybtgående undersøgelser var påkrævede.

Ved disse orienterende undersøgelser blev betonens tilstand efter en besigtigelse af bygværkerne summarisk karakteriseret ved talværdierne 0—5, idet 0 betegnede et uskadt betonbygværk, 5 alvorlig forvitring af hele bygværket, og 1—4 en graduering mellem disse yderværdier. Endvidere blev tilstedeværende forvitringssymptomer, d.v.s. revnedannelser, springer og sekundære udfældninger af alkaliselgel m. v. registreret, og bygværkets data iøvrigt noteret. Endelig blev der foretaget en omfattende fotografisk registrering.

DSB's mange betonbroer spillede en betydelig rolle i denne undersøgelse, fordi denne institution var velkendt med reparationsbehovet, og fordi DSB's detaljerede brofortegnelser i forvejen omfattede værdifulde data for samtlige disse bygværker.

Tabel 1 viser en sammenfatning af den talmæssige bedømmelse af samtlige besøgte bygværkers tilstand. Da »karaktertallet« er udtryk for en subjektiv bedømmelse, bygværkernes alder ikke er taget i betragtning o.s.v., er den anførte procentiske fordeling ikke umiddelbart tilgængelig for analytisk bearbejdning og fortolkning. Men når det tages i betragtning,

at der indgår meget få bygværker, som er ældre end 1920,

at der indgår et relativt stort antal nyopførte eller meget unge bygværker, og

at antallet af stærkt forvitrede bygværker må antages at være for lille, fordi en del allerede før besigtigelsen har været under-

Bedømmelse		Klassificering	
Tal	Betydning	Antal	%
0	Ubeskadt beton .....	110	25
1	Svag lokal forvitring .....	130	30
2	Fremskreden lokal forvitring .....	63	15
3	Svag, total forvitring .....	64	15
4	Middel, total forvitring .....	50	11
5	Fremskreden total forvitring .....	19	4
Ialt		436	100

Tabel 1. Samlet resultat af bedømmelse af betonbygværkers tilstand ved orienterende besigtigelser i 1954—55.



Betegnelse	Periode		Bestanddele	Struktur farve	
	Periode	Aflejring			
Stevnsflint .....	Senon	Primær	Kalcedon	tæt	sort
Kagstrupflint .....	Danien	Primær	Kalcedon, Kalcit	tæt	grå
Erslevflint .....	Danien	Primær	Kalcedon, Kalcit Opal	porøs	hvid
Gøttrupflint .....	Danien	Sekundær	Kalcedon, Opal	porøs	hvid
Uglevflint .....	Danien	Sekundær	Kalcedon, Opal	porøs	hvid
Pyrexglas .....	—	—	Glas	tæt	klar

Tabel 3. Udvalgte standardtyper af reaktive bjergarter i Danmark samt pyrexglas.

med formindskelsen af alkalikoncentrationen. Herved fås et punkt, og afhængig af om det ligger til venstre eller til højre for en empirisk bestemt grænselinie, karakteriseres materialet som enten alkalinaktivt eller alkalireaktivt. Forsøgets varighed er halvandet døgn.

Figur 5 viser de resultater med danske grusforekomster i naturlige blandinger og i nedknust tilstand, som er opnået ved udvalgets undersøgelser. Den vandrette akse viser mængden af opløst kisel, den lodrette viser alkalireduktionen. Det ses, at det store flertal af materialerne falder i det reaktive område. De, der falder udenfor, er særlige materialer som granit, visse former for sand- og kalksten m. m., der ikke indeholder flint.

Det må stærkt fremhæves, at metoden er empirisk. Den kan afgøre, om grusmaterialet indeholder reaktive bestanddele, men ikke om dets anvendelse i så fald vil medføre skadelige alkalireaktioner i beton, idet alene betonens blandingsforhold og milieu er afgørende herfor.

Hvis forsøg med metoden viser, at materialet er reaktivt, må derfor yderligere undersøgelser til for at

belyse denne risiko, f. eks. mørtel- eller betonprismeforsøg.

Metoden har sin betydning, hvor en petrografisk analyse af en ukendt bjergart har vist, at den indeholder visse mængder reaktive mineraler. Viser den hurtige kemiske metode, at materialet må betegnes som alkalinaktivt, vil man herefter næppe foretage de langt mere omfattende mørtel- eller betonprismemetoder.

De foretagne undersøgelser viser, at metoden ikke kan benyttes som rutineprøvning af almindelige grusmaterialer i Danmark. For det første kan man nu forudsige, at alle almindeligt forekommende grusmaterialer er alkalireaktive, idet de indeholder flint i varierende mængder. For det andet kan metoden, som nævnt, umuligt forudsige, om anvendelse af en forelagt grusprøve vil føre til skadelige reaktioner.

#### Mørtelprismeforsøg.

Når man vil undersøge visse af betons egenskaber, er det almindeligt at studere forholdene ved hjælp af små prøvelegemer. Metoden er ofte benyttet på andre områder som f. eks. sulfatprøvning, frostbestan-

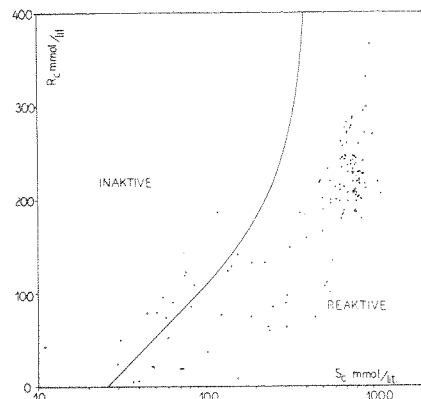


Fig. 5. Resultater af forsøg med danske grusmaterialer efter den hurtige kemiske metode. Ordinater angiver reduktion i alkalinitet, og abscisser angiver mængden af opløst kisel ( $\text{SiO}_2$ ) under forsøget. Forsøgsresultater til venstre for grænselinien mellem inaktive og reaktive repræsenterer specielle grusmaterialer uden indhold af reaktive bjergarter.

dighedsprøvning, styrkeprøvning m. m. Det var derfor naturligt, at Stanton (42 S 1), Jones (52 J 4), Vivian (47 V 5), Woolf (52 W 5) m. fl. søgte at udnytte denne metode i studiet af alkalireaktioner.

Der er siden udviklet også andre forsøgsmetoder, men disse kræver alle sammenligning med mørtelprismeresultater og petrografisk analyse.

Der har i tidens løb for mørtelprismer været anvendt mange forskellige dimensioner. Af forskellige årsager ønskede det danske udvalg at benytte dimensionerne  $25 \times 25 \times 125$  mm med en effektiv målelængde på 105 mm. Indledende forsøg viste, at dette var velegnet til forsøgenes formål.

Prismerne fremstilles af en mørtelblanding, cement: sand = 1:2. Sandet sammensættes af en blan-



Fig. 6. Blanding af mørtel ved mørtelprismeforsøg.



Fig. 7. Udstøbning (bearbejdning) af mørtelprismer.



Fig. 8. Udstøbning (afretning) af mørtelprismer.



Fig. 9. Måling af mørtelprismers længdeændring.

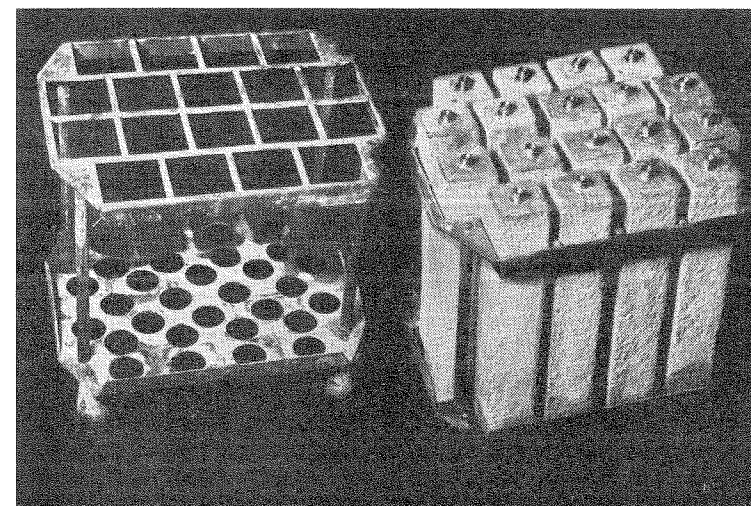


Fig. 10. Stativ for opbevaring af mørtelprismer i lagerbeholder.

ding af krystallinsk kvarts og det reaktive materiale, der ønskes undersøgt. Der tilstræbes et vand-cementforhold på ca. 0,5. Da det imidlertid har vist sig vigtigere at holde konstant bearbejdelighed end konstant v/c, tilsættes så meget destilleret vand, at blandingen får et »flow« på 100.

Figur 6 viser blandingprocessen. Der kræves meget omhyggelig blanding, og de forskellige delprocesser foregår ved hjælp af stopur. Figur 7 og 8 viser udstøbningen i rustfri stålforme. Mørtelprismerne bliver ved støbningen forsynet med måle-

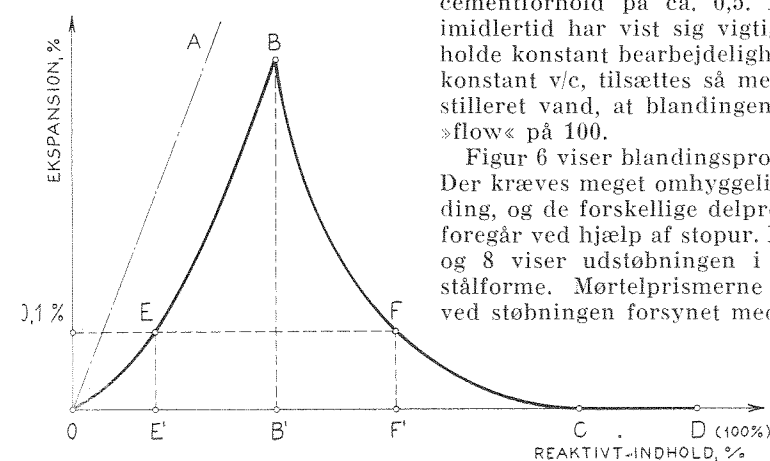


Fig. 11. Skematisk fremstilling af mørtelprismers ekspansion som funktion af mængden af reaktivt materiale i mørtelblandingen.

tappe. Efter afformningen, d.v.s. 24 timer efter udstøbningen, bestemmes prismernes såkaldte nullængde ved hjælp af det på figur 9 viste måleapparat.

Mørtelprismerne sammenstilles derefter i et stativ, se figur 10, og anbringes i en metalbeholder ved  $38^\circ \text{C}$ . og 100 % fugtighed. Med ganske bestemte tidsintervaller bestemmes længdeændringen i forhold til nulstillingen. Efter to års forløb bestemmes bøjetrækstyrken samt trykstyrken. Resterne af prismene benyttes derefter til diverse undersøgelser som f. eks. petrografiske og kemiske analyser.

Af de resultater, man indtil nu har opnået, er det muligt at uddrage nogle konklusioner til belysning af de love, der gælder for alkalireaktioner i mørtelprismer. Som variable har man i forsøgsrækken benyttet:

1. Type af reaktivt materiale, 6 forskellige typer, se tabel 3,
2. Mængde af reaktivt materiale, fra 0 til 70 % af det samlede tilslag,
3. Kornstørrelse af det reaktive materiale, fra  $\frac{1}{32}$  til 4 # mm,
4. Alkaliindholdet i cementen, fra 0,35 til 4,80 % ækv.  $\text{Na}_2\text{O}$  af cementvægten.

Som mål for alkalireaktionens skadelighed benyttes prismets længdeekspansion. På grundlag af ret omfattende undersøgelser i USA definerer man der alkalireaktionerne i mørtelprismer som *skadelige*, såfremt udvidelsen er større end 0,1% ved 12 måneders lagring og som *uskarlig*, hvis udvidelsen er min-

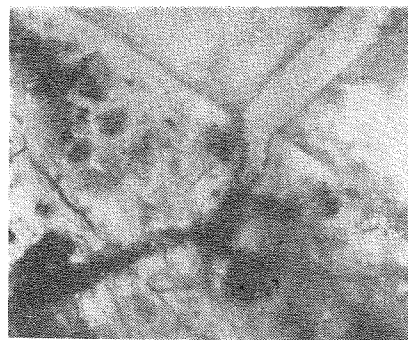


Fig. 12. Revnedannelse i flintpartikel (øverst i billedet) som følge af skadelige alkalireaktioner. Revnen indsnævres i cementpastaen som følge af plastisk deformation af denne.

dre end 0,04 %. Området fra 0,04 til 0,1 % betegnes som tvivlsomt.

Ved mørtelprismeforsøgene kan man studere de enkelte influerende faktorer hver for sig, idet man i hver af de forskellige forsøgsrækker nøjes med en variabel. I den følgende orientering forudsættes det, at alle andre faktorer end de nævnte holdes konstante.

Først betragtes et mørtelprisme med en så lille mængde af reaktivt materiale, at reduktionen i alkali-koncentrationen er så lille, at den svællende gel dannes. Der opstår følgende en ekspansion afhængig af mængden af reaktivt materiale. Såfremt mørtlen var idealelastisk, ville prismets ekspansion være lineært afhængig af mængden af reaktivt materiale, se linien OA i figur 11. Na er mørtlen imidlertid uelastisk (plastisk), d.v.s. at de reaktive partikler kan udvide sig forholdsvis meget uden tilsvarende total ekspansion, idet cementpastaen kryber lokalt rundt om partiklerne. Figur 12 viser et mikrofotografi af en tæt flintpartikel, der er revnet. Revnen fortsætter imidlertid kun et ganske kort stykke ud i pastaen, hvor den lukker sig. På grund af dette krybningsfænomen vil man i stedet for den ved OA viste afhængighed få afhængigheden OB.

Ekspansionen som funktion af den reaktive mængde tilslag er ikke stadigt voksende. Ved en større mængde end svarende til punkt B vil alkalireduktionen blive så stor, at alkalireaktionen forbliver uskadelig indtil en vis indtrængningsdybde. Når mængden af reaktivt materiale bliver større end svarende til punkt C, vil den hertil svarende alkalireduktion være så stor, at der sikres en uskadelig reaktion, indtil reaktionen har nået centrum af de reaktive partikler, og det reaktive kisel dermed er opbrugt. Ekspansionskurven består derfor af kurvestykkerne OBCD, hvor D er det punkt, der svarer til 100 % reaktivt materiale. Ekspansionen på strækningen CD er nul. Figur 13

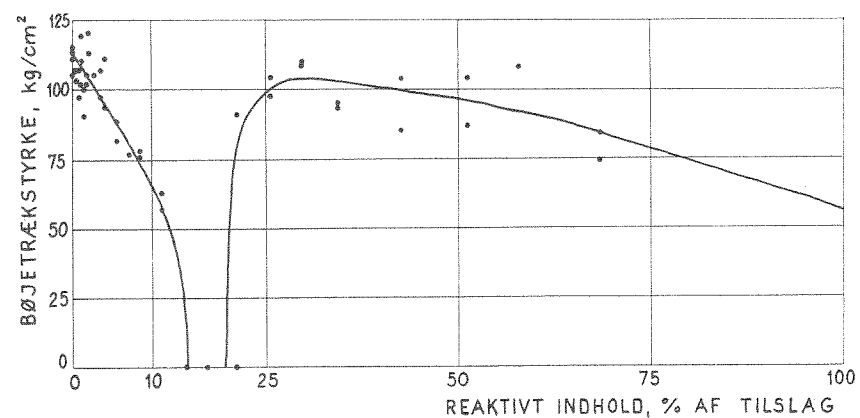
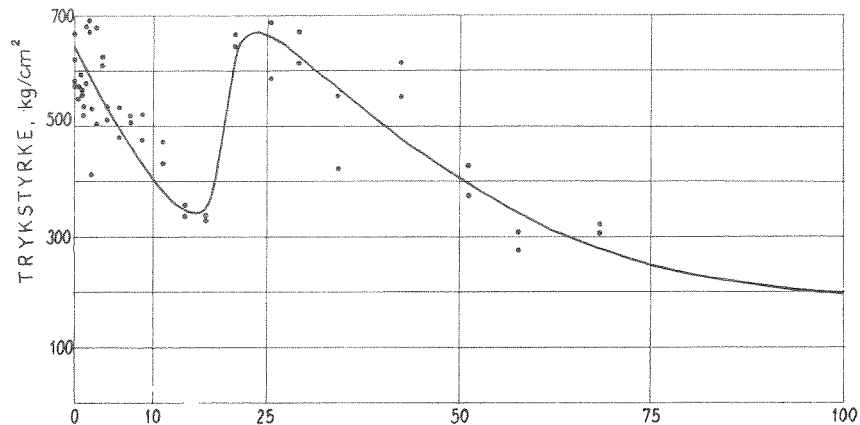
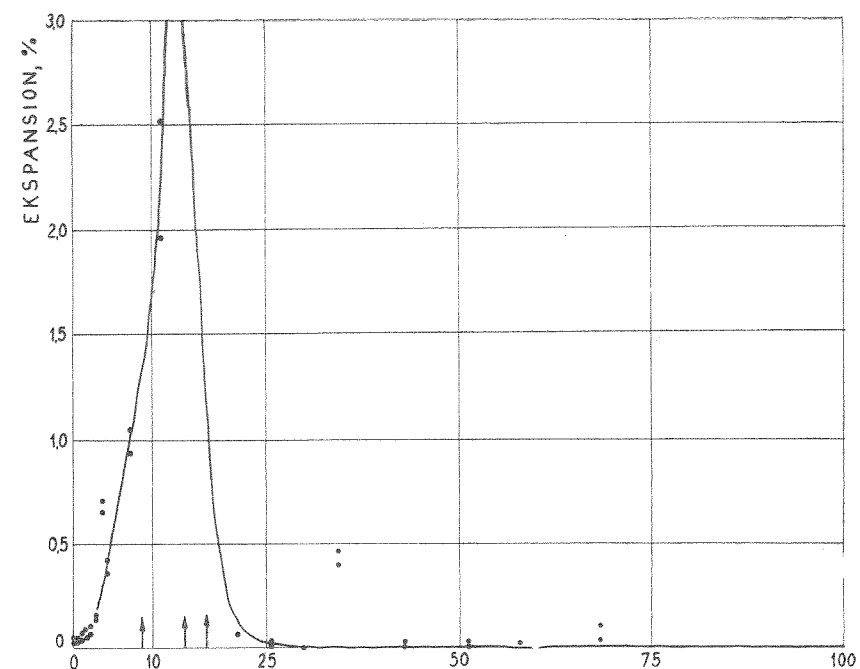


Fig. 13. Øverst vises mørtelprismernes ekspansion som funktion af mængden af reaktivt materiale. Der er anvendt porøst Erslevflint med en kornstørrelse fra  $1/8$  til  $1/4 \pm$  mm. Kurvens karakteristiske udseende genspejles i de to nederste styrkekurver for henholdsvis tryk- og bøjestrækstyrke. Det er bemærkelsesværdigt, at mørtlen kun mister halvdelen af sin trykstyrke men hele sin trækstyrke i det farlige interval. Tilsættes store mængder Erslevflint, sker der en uskadelig reaktion, men mørtlens styrke falder, idet Erslevflint i fysisk henseende er et svagt materiale. Pilene i øverste figur angiver ekspansioner udover måleområdet.

viser nogle forsøgsresultater, der bekræfter ovenstående hypotese.

Af ovenstående fremgår, at ekspansionerne for blandinger svarende til intervallet OB skal starte

umiddelbart efter støbningen af prismene. Omvendt skal ekspansionerne for blandinger svarende til intervallet B'C først fremkomme på et senere tidspunkt. Figur 14

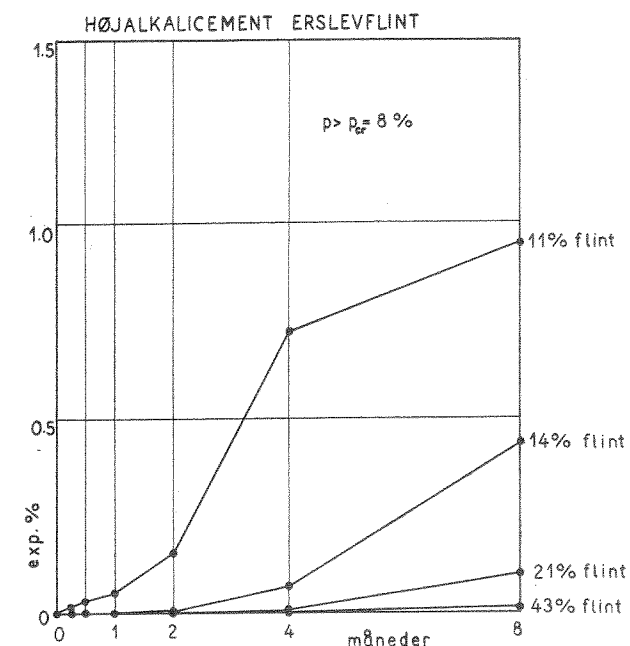
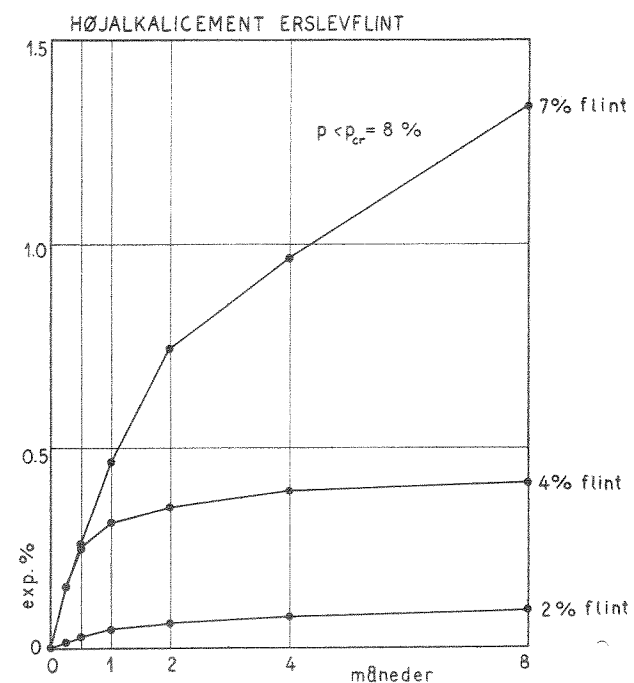


Fig. 14. Mørtelprismernes ekspansion som funktion af alderen viser til venstre, at prismet i det farlige interval begynder at ekspandere umiddelbart efter støbningen, når det reaktive indhold er mindre end svarende til det pessimale forhold, her 8 %. Til højre ses, at mørtelprismene ved f. eks. 14 % flintindhold først ekspanderer efter to måneders forløb.

viser disse forhold svarende til resultaterne i figur 13.

Da en skadelig reaktion er defineret som givende en ekspansion større end 0,1 % ses, at man kan tale om farlige blandinger i et helt interval E'F', se figur 11. Dette interval benævnes det farlige interval. Det blandingsforhold, der i dette interval giver maksimal ekspansion benævnes det pessimale blandingsforhold.

Det farlige intervals placering og udstrækning varierer med de omtalte 4 faktorer. I figur 15 vises afhængigheden af den anvendte type reaktivt materiale.

Det ses, at pyrexglas og de tætte flinter har relativt brede farlige intervaller, pyrexglas således hele området fra ca. 5 % til 100 %, medens de porøse flinter har relativt smalle farlige intervaller. Til gengæld reagerer de porøse flinter som regel hurtigst, hvilket ikke fremgår af figuren.

Disse forhold rummer en del af forklaringen på, at alkalireaktioner ofte bliver uskadelige i betonbygværker. Naturligt grus indeholder en tilfældig blanding af standardmaterialerne. Hvis porøse typer af flint nu findes i en mængde, der ligger udenfor det farlige interval, forløber reaktionerne uskadeligt, og alkalikoncentrationen bliver reduceret så meget, at de tætte flinters store farlige interval ikke får nogen virkning.

Figuren viser også med hvilken forsigtighed standardprøvetoder bør omgås. Porøse danske flinttyper blev undersøgt i USA i 1954 efter amerikansk standard, der fore-

skriver forsøgs materialet prøvet uden iblanding af kvarts. Resultatet var det opmuntrende, at materialerne ikke var reaktive. Som det ses af de foreliggende figurer, er sandheden den, at metoden var forkert.

Situationen ved punkt B i figur 11 opstår som omtalt, når alkali-koncentrationen på grund af reaktionen bliver tilstrækkelig lav. Det er derfor forståeligt, at B' bliver mindre, jo mindre prismets begyndelsesalkaliindhold er. Dette illustreres ved nogle forsøgsresultater i figur 16.

Man kan herefter afbilde ekspansionen som funktion af både alkaliindhold og mængde af reaktivt materiale. Dette er vist i aksometrisk afbildning i figur 17. I figur 18 og 19 er forholdene for to standardmaterialer vist. Det område, der begrænses af 0,1 % ekspansionskurven, benævnes det farlige område og ses at være ret lille i forhold til hele brugsområdet.

Det reaktive materiales kornstørrelse har også indfly-

delse på beliggenheden af det pessimale forhold. Det har yderligere vist sig, at det reaktive materiales porøsitet spiller en rolle. For porøse, reaktive materialer aftager det pessimale forhold med stigende kornstørrelse samtidig med, at den hertil

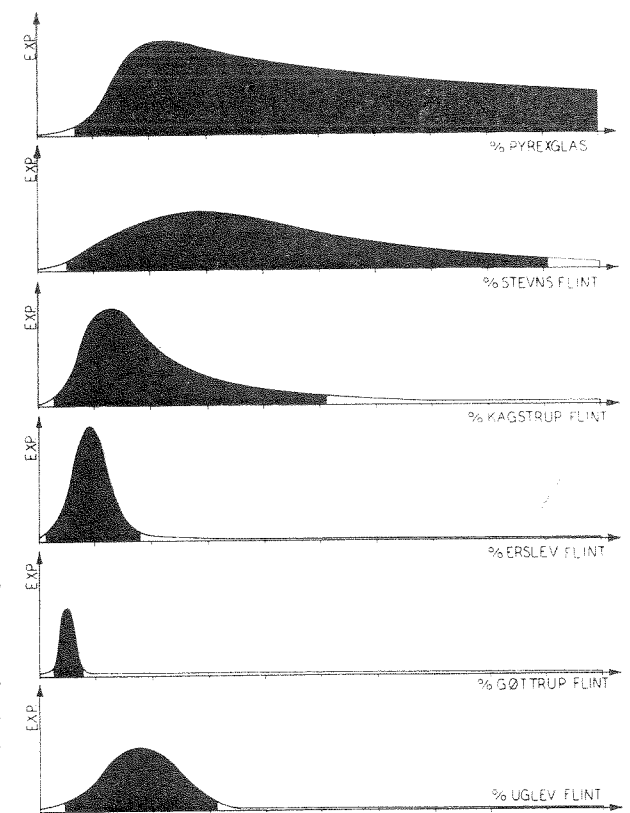


Fig. 15. Ekspansion af mørtelprismer som funktion af mængden af reaktivt materiale for pyrexglas samt 5 standardtyper af flint. De sortfarvede områder svarer til materialernes farlige intervaller på abskisseaksen, idet ekspansionen indenfor disse intervaller er  $> 0,1$  % ved 12 mdr.'s lagring.

svarende ekspansion også falder. For tætte, reaktive materialer stiger det pessimale forhold med stigende kornstørrelse samtidig med, at den hertil svarende ekspansion også stiger. Dette sidste forhold er tidligere vist af bl. a. Mielenz (47 M 4).

Ved at udtrykke de herved fundne love analytisk, er det muligt at samle virkningen af de forskellige faktorer i een fremstilling for hver flinttype. I figur 20 er resultatet af en sådan bearbejdning vist.

Af forsøgsresultaterne fremgår, at der er en forholdsvis stor spredning på resultaterne. Figur 21 viser et fuldstændig gennemrevnet mørtelprisme, hvis blandingsforhold meget nært svarer til det pessimale forhold. Figur 22 viser et andet mørtelprisme, der har ekspanderet mindre. Da revnedannelser udgør et væsentlig bidrag til ekspansionen, er det forståeligt, at man her har en kilde til de målte spredninger. Figur 23 viser, hvorledes prismene kan bøje under en »skæv« ekspansion. Dette tages heller ikke i regning. Ved meget store ekspansioner, 1,5 til 2,0 %, bliver revnedannelsen så kraftig, at måletappen løses, se figur 24.

Geldannelsen illustreres i figur 25. Længst til venstre vises geldannelsen, når det anvendte tilslag er meget finkornet. I midten vises geldannelsen, når det anvendte tilslag er grovkornet. I de to nævnte tilfælde var prismene støbt med en højalkalicement. Længst til højre ses et eksempel på geldannelse ved lavalkalicement og anvendelse af grovkornet tilslag.

Det fremgår af ovenstående, at analyse af en alkalireaktion i en vilkårlig mørtelblanding bestående af forskellige reaktive, graderede bjergarter er en ret kompliceret opgave. Tænkes opgaven reduceret til analyse af en blanding af enskornede tætte og porøse partikler, kan man illustrere en blandings farlighed i et såkaldt blandingsdiagram. Dette er et retvinklet koordinatsystem, hvor man ud ad ordinataksen afsætter blandingsindhold af tæt flint og ud ad abscissaen afsætter blandingsindhold af porøs flint. Der vil da fremkomme et område, i hvilket enhver blanding vil være farlig. Områdets udstrækning afhænger af de førnævnte faktorer.

Udvalget har undersøgt en række naturligt forekommende og kunstigt frembragte blandinger. Materialerne er hentet overalt i landet, idet samtlige benyttede grusforekomster er søgt repræsenteret. Prøverne er undersøgt petrografisk, stenfraktionen og derefter nedknust til  $-4 \mu\text{m}$ , og der er gennemført forsøgsrækker med 100, 40 og 10 % af det naturlige materiale i forhold til kvarts.

#### Puzzolaner.

Såfremt en mørtelblanding ligger i et farligt område, kan man principielt sikre sig mod skadelige reaktioner ved formindskelse af alkalikoncentrationen, eller ved ændring af grusets indhold af reaktiv kisel. Da en formindskelse af alkalikoncentrationen kan modvirkes på »uforduset« måde af alkalitilskud fra omgivelserne, f. eks. havvand, kan det være hensigtsmæssigt at ændre grusblandingen ved tilsætning af sådanne mængder reaktiv kisel i finmalet tilstand, at blandingen bliver ufarlig. Til dette formål er i USA i udstrakt grad benyttet de såkaldte *puzzolaner*, bl. a. omfattende:

1. Vulkanske glascer i naturlige askelag
2. Opalholdigt materiale
3. Industrielt affald flyveaske

Anvendelige råmaterialer af lignende art forekommer her i landet bl. a. som:

1. Porøs, kalkholdig flint i primære forekomster (opalholdigt)
2. Moler (opalholdigt)
3. Industrielt affald (glasholdigt)

Disse mulige råmaterialer til tilsætningsmidler, også kaldet *korrektiver*, og enkelte andre lignende materialer er undersøgt og bedømt af udvalget ved hjælp af mørtelprismeforsøg.

Undersøgelserne har vist, at det er muligt at anvende de nævnte danske puzzolaner til modvirkning af skadelige alkalireaktioner, både ved tilsætning til cementen og som direkte tilsætningsmiddel under blandingen (57 A 1).

De bedst egnede

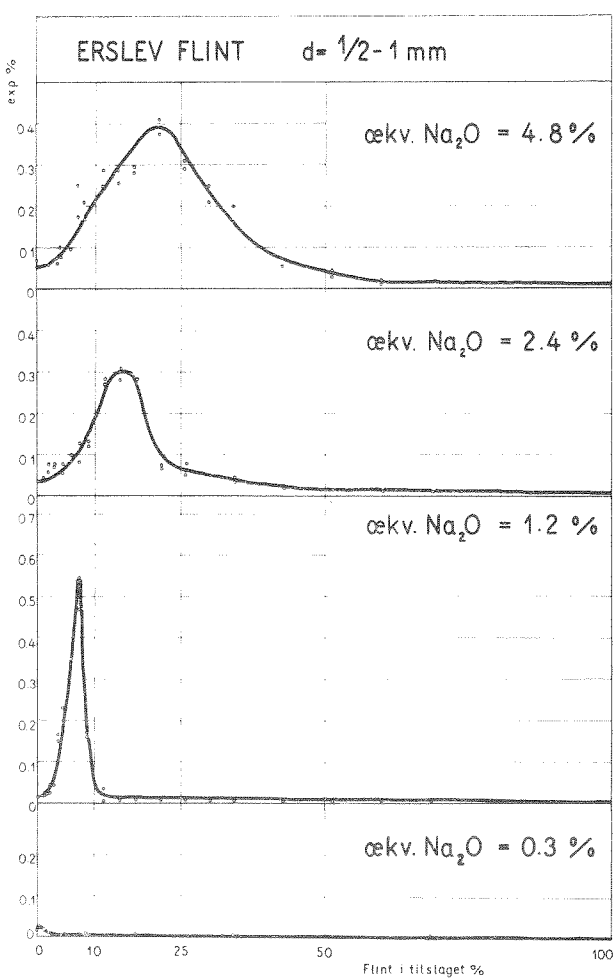


Fig. 16. Ekspansion af mørtelprismer som funktion af mængden af reaktivt materiale for fire forskellige alkalindhold af cementen (beregnet som ækv. Na<sub>2</sub>O). Det farlige interval for det reaktive sand bliver bredere med stigende alkalikoncentration.

materialer er efter de foretagne forsøg:

1. Nedknust porøs flint

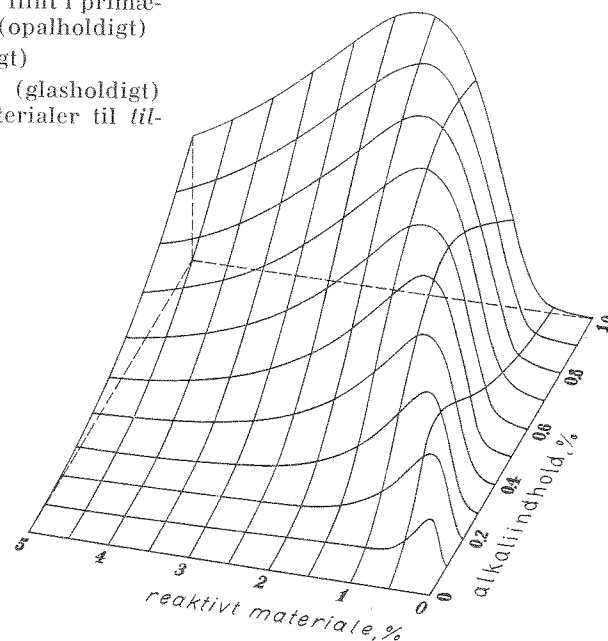


Fig. 17. Aksonometrisk afbildning af ekspansionsfladen som funktion af cementens alkalindhold og mængden af reaktivt materiale. Ved snit vinkelret på alkaliaksen fremkommer ekspansionskurver af form som angivet i fig. 11 og 13.

2. Moler, eventuelt i kalcineret form
3. Si-stof, et industrielt affaldsprodukt.

Puzzolanernes korrektive virkning kan forstås umiddelbart efter det, der er sagt om alkalireaktionens mekanisme. Man kan f. eks. sammenligne to betontyper, hvis eneste forskel består i, at den ene har fået en tilsætning af finfordelt, reaktivt kisel. Den puzzolanfri blanding tænkes yderligere at have den egenskab, at der dannes svellende gel ved en vis indtrængningsdybde, fordi alkalikoncentrationen svarende til denne indtrængning er for høj. Den puzzolanholdige blanding kan imidlertid gives så stor en samlet overflade af reaktivt materiale, d.v.s. reaktivt grus plus puzzolan, at der til den ovenfor omtalte reaktionsdybde er medgået betydelig større mængder alkalier.

Alkalikoncentrationen bliver derfor betydelig mindre end i den tilsvarende situation i den puzzolanfri blanding. Den ikke svellende kalkalkaligelgel dannes derfor, og reaktionen er uskadelig.

Af ovenstående eksempel forstås man, at det er muligt at beregne minimum-mængden af puzzolantilsætningen til en given blanding. Bestemelsen er, at alkalikoncentrationen til enhver indtrængningsdybde er så lille, at dannelse af den ikke-svellende gel er sikret.

Det fremgår yderligere, at en betonblanding kræver varierende minimum-puzzolantilsætning, afhængig af betonens alkaliindhold, tilslag, kornkurve m. m. Man kunne derfor fristes til at fastlægge en bestemt »sikker« mængde, men det vil betyde, at der i mange tilfælde benyttes for stor puzzolantilsætning. Da denne tilsætning har indflydelse på visse af betonens fysiske egenskaber, er minimum-puzzolantilsætningen at foretrække.

#### Betonprismeforsøg.

De forsøg, hvis resultater der ovenfor er redegjort for i store træk, omfatter kun naturligt sand og sten nedknust til  $-4 \mu\text{m}$  kornstørrelse. Det er imidlertid ikke muligt uden videre at ekstrapolere de love for alkalireaktionernes mekanisme, som kan udledes af forsøgsresultaterne for mørtelprismer til også at gælde forsøgslegemer af større dimensioner med sand og sten benyttet i fraktioneringer, som svarer til forholdene i almindelig beton.

Dette forhold må følgelig belyses ved særlige forsøg med betonprismer, og sådanne er sat i gang. Betonprismerne har dimensionen  $10 \times 10 \times 60 \text{ cm}$ . Der er hidtil foreta-

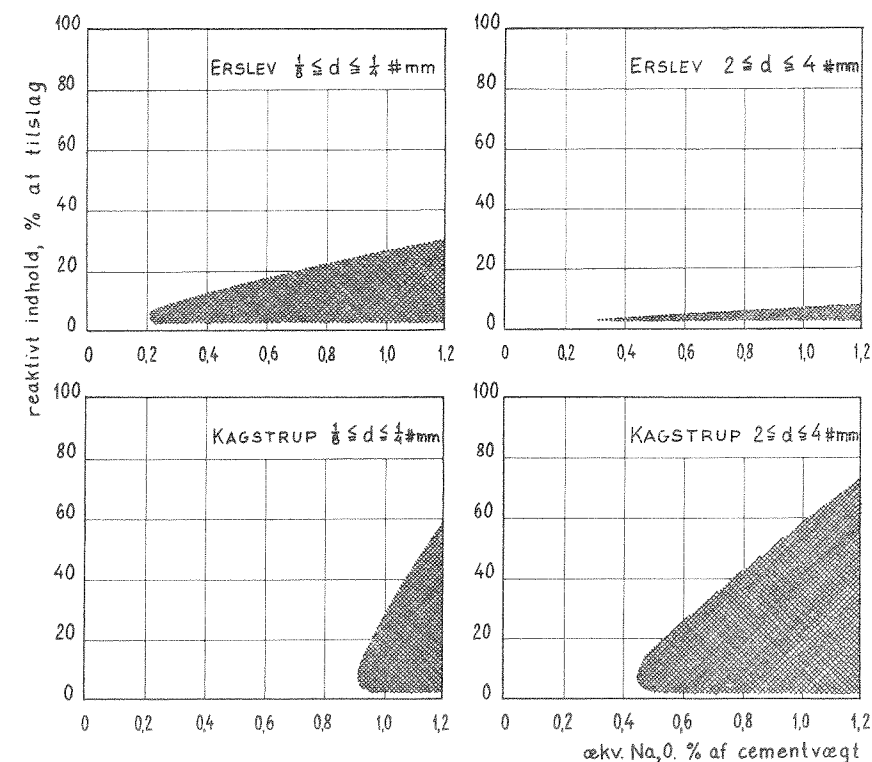


Fig. 18 og 19. For mørtelblandinger C:Sa = 1:2 og v/c ~ 0.5 har de farlige områder de viste udstrækninger. Bemærk forskellen mellem ERSLEVflint, der er et porøst, reaktivt materiale, og KAGSTRUPflint, der er et tæt, reaktivt materiale. Som abscisse er alkalindholdet i cementen benyttet, og som ordinat er flintkvotienten benyttet. Ethvert punkt i koordinatsystemet bestemmer derfor een blanding.

get forsøg med tre typer grusmaterialer:

1. Bakkemateriale, der ved mørtelprismeforsøg har vist sig skadeligt reaktivt i visse blandingsforhold.
2. Sømateriale, der ved mørtelprismeforsøg har vist sig skadeligt reaktivt i visse blandingsforhold.
3. Materialer, der har været benyttet ved bygværker, hvor skade-

lige reaktioner er konstateret. Og så disse materialer har vist sig skadeligt reaktivt i visse blandingsforhold ved mørtelprismeforsøg.

Betonprismerne er støbt med forskellige typer cement, forskellige blandingsforhold, og saltvandstilsætning til støbevandet er ligeledes undersøgt.

Såvel praksis som udenlandske

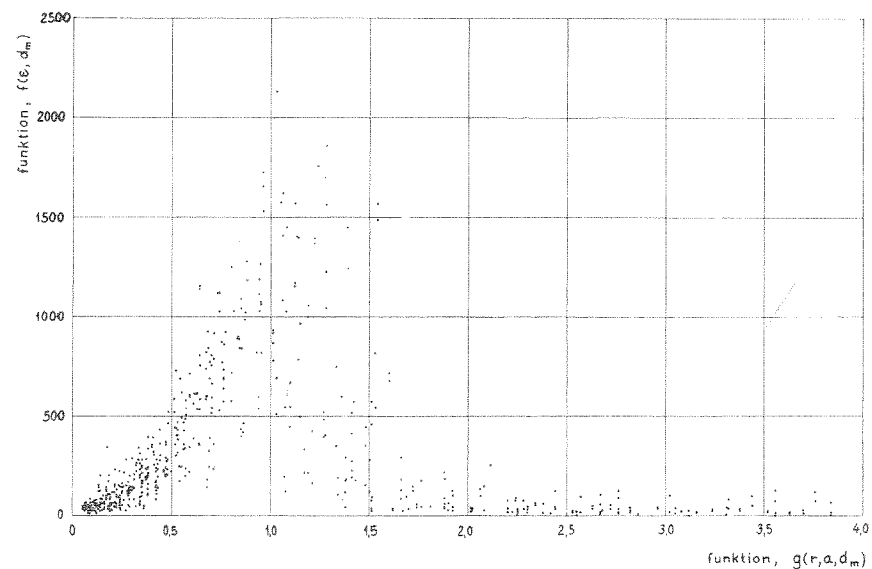


Fig. 20. Ved en analytisk bearbejdning af ekspansionsmålinger af mørtelprismer støbt med ERSLEVflint har det været muligt at finde en afhængighed, der nogenlunde tilfredsstillende resultaterne. I figuren angiver  $\epsilon$  ekspansionen,  $d_m$  middelkornstørrelsen,  $r$  mængden af reaktivt materiale, og  $a$  alkalindholdet. Det område, der dækkes er:

$\frac{1}{32} \leq d_m \leq 2 \mu\text{m}$ ,  $0 \leq r \leq 100 \%$ , og  $0.4 \leq a \leq 1.2 \%$ . Der er kun vist punkternes beliggenhed i intervallet fra 0 til 4 på abscissen. Forsøgsresultaterne strækker sig imidlertid helt ud til 40 med samme beliggenhed som i intervallet fra 2,5 til 4,0.





Fig. 21. Revneforløbet hos et kraftigt ekspanderet mørtelprisme. Der er anvendt porøs Erslevflint med kornstørrelse  $\frac{1}{8} \leq d \leq \frac{1}{4} \pm$  mm og blandingsforhold meget nær det pessimale. Prismet er fuldstændigt gennemrevnet.

laboratorieundersøgelser har vist, at reaktionerne i store betonprøvelegemer sker noget langsommere end i små mørtelprismer. Udvalgets betonprismer er endnu kun ca. 1 år gamle, og resultater, som kan fortolkes, foreligger ikke på nuværende tidspunkt.

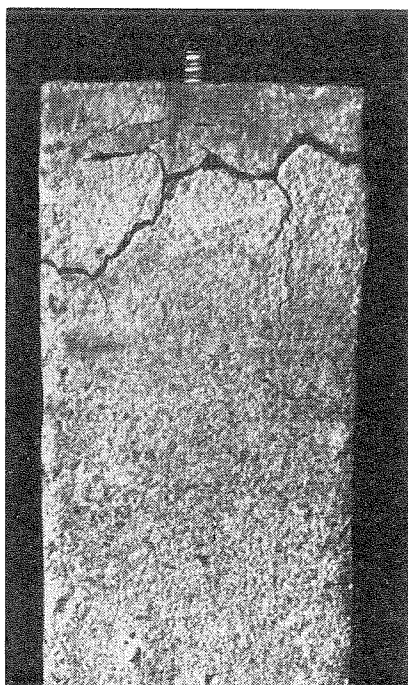


Fig. 22. Revneforløbet hos et ekspanderende mørtelprisme. Der er benyttet samme tilslag som i prismet, fig. 21, men blandingsforholdet er anderledes. Ved den derved opståede, mindre ekspansion spiller prøvelegemets geometriske form ind. Figuren gengiver en karakteristisk revnedannelse.

#### Indsamling af betonprøver.

Ved undersøgelse af et betonbygværk vil en umiddelbar besigtigelse almindeligvis ikke være tilstrækkelig til en sikker afgørelse af, hvilke faktorer, der har forårsaget betonens nedbrydning. En dyberegående undersøgelse vil altid kræve laboratorieundersøgelser, og man må derfor udtage betonprøver.

Ved en orienterende undersøgelse vil man ofte kunne klare sig med et brudstykke udtaget med hammer og mejsel fra de mest beskadigede steder. Denne fremgangsmåde kan imidlertid ikke benyttes ved en detailundersøgelse, der bl. a. omfatter den mindre ødelagte del af betonen. Et vigtigt led i detailundersøgelsen er studiet af revnesystemerne, og

man må derfor sikre sig, at betonprøven er uforstyrret.

For at tilfredsstille disse krav har udvalget ladet konstruere et boreudstyr, der kan udbore 20 cm lange cylindre med en diameter på 5 cm. Boremaskinens stabilitet er uafhængig af eventuelle stilladers kvalitet, og dets fritrumsprofil er ikke større end, at det indtil nu har været muligt at udbore samtlige ønskede prøver. Figur 26, 27 og 28 viser tre karakteristiske situationer ved udboring af betonprøver omfattende såvel brobygning, husbygning som fundamenter.

Almindeligvis ønskes udtaget flere prøver indenfor det område af betonen, der skal undersøges. Boremaskinen er derfor konstrueret så-

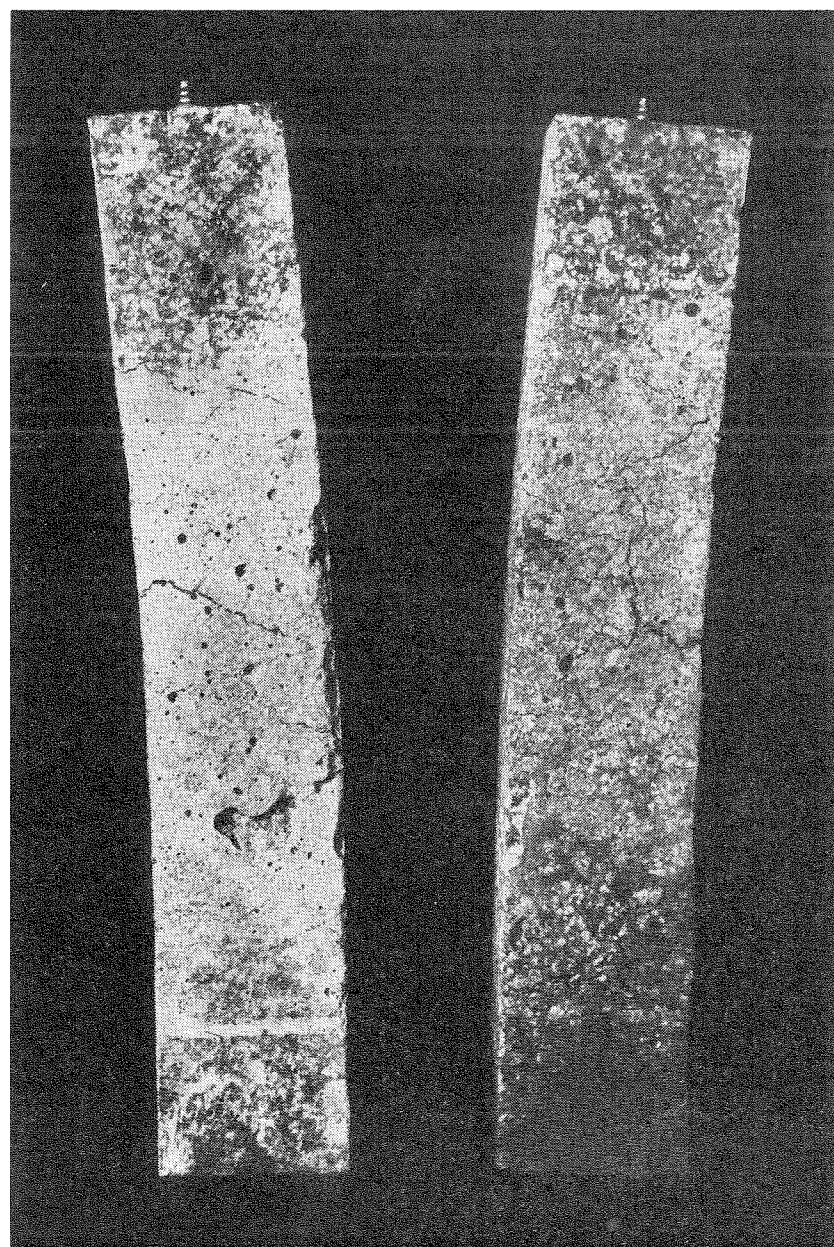


Fig. 23. Eksempel på skæv ekspansion. Såfremt mængden af reaktivt materiale er nærmest det pessimale blandingsforhold i prismets ene side, vil dette få en bøjning under ekspansionen. Det samme kan ske, såfremt miljøet begunstiger større ekspansion i den ene side.

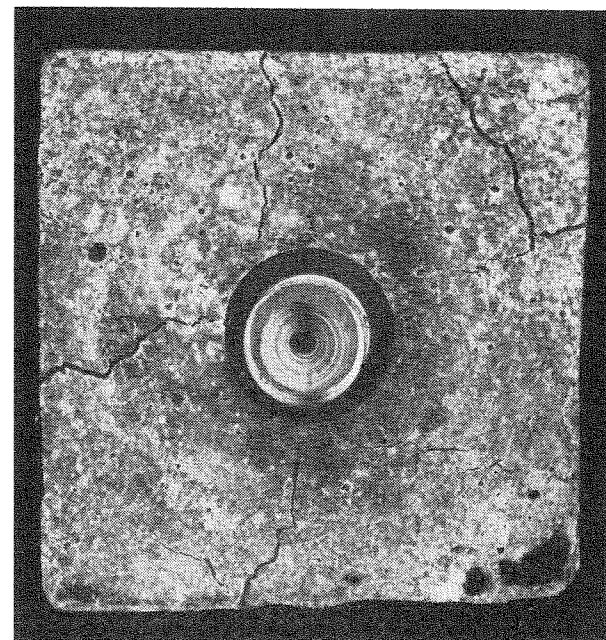


Fig. 24. Eksempel på revnedannelse i enden af prismet. I det viste tilfælde har ekspansionen i prismets tværretning været så stor, at måletappen har løsnet sig, og prismet er derfor udgået af serien, idet målinger ikke har kunnet foretages.

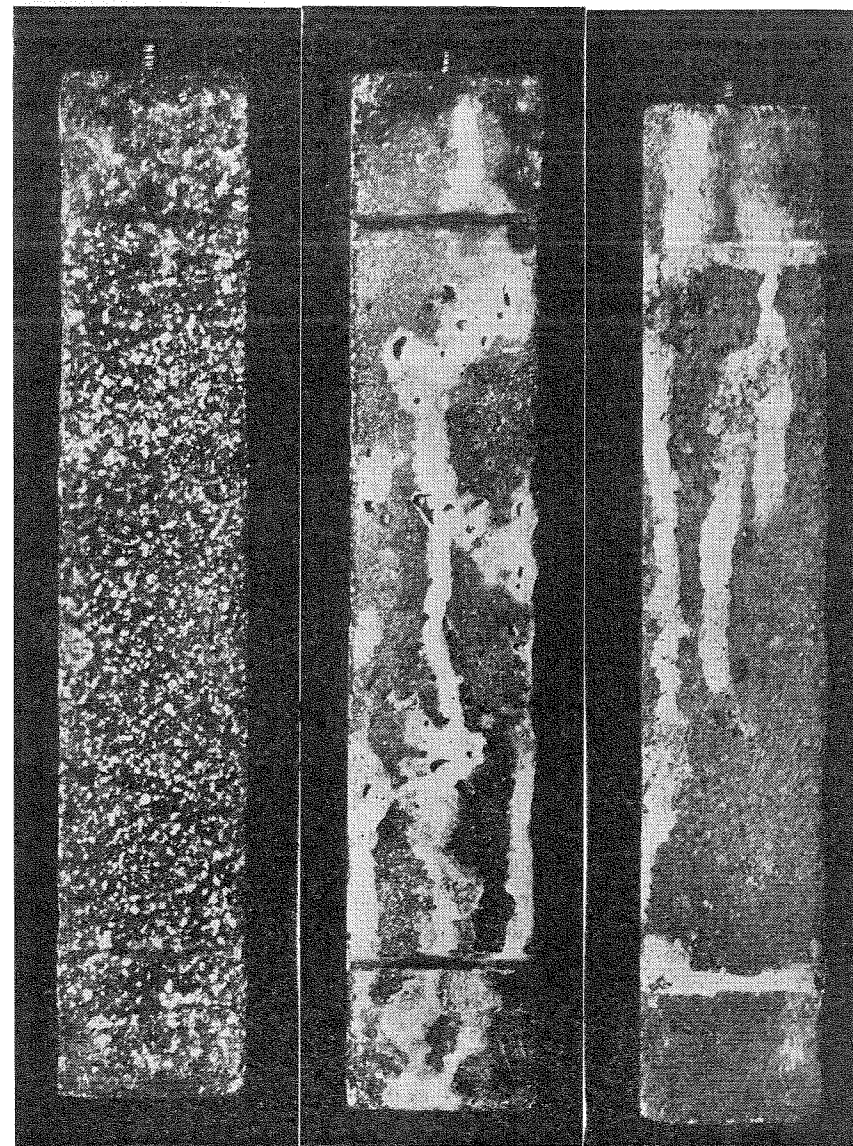


Fig. 25. Eksempler på geldannelser. Er tilslaget finkornet som længst til venstre, fremkommer små geludfældninger. Er tilslaget grovkornet, bliver der en kraftig gelproduktion. Til højre vises et eksempel på geldannelse, hvor der er anvendt lavalkalificement, ækv.  $\text{Na}_2\text{O} = 0.3\%$ .

ledes, at man fra samme opstilling har mulighed for at udbore indtil 12 cylindre. Som oftest kræves mindst 2 til 3 intakte prøver fra samme opstilling. Er betonen imidlertid meget ødelagt, kan man komme ud for at gøre adskillige forsøg, før det ønskede antal intakte borekerner er opnået.

Princippet i boremaskinen vil fremgå af figurerne.

Som det ses, fastspændes udstyret direkte til betonbygværket ved to stag, fastgjort med ekspansionsbolte. Disse stag kan ved god beton undværes, se figur 28, idet den midterste stamme alene fastholdes ved sine ekspansionsbolte. Denne opspændingsmetode har især interesse ved udboring i hjørner og andre ellers utilgængelige steder.

Selve boremaskinen, motor og bor, har to frihedsgrader, nemlig rotation omkring og translation langs den bærende stamme. Translationen er etableret som ca. 30 cm grovindstilling samt ca. 20 cm præcisionsfremføring på en vange. Transport af boremaskinen foretages på en specielt indrettet køreanordning, i princippet en sækkevogn, se figur 29.

Dansk beton indeholder i så godt som alle tilfælde store mængder tæt flint. Der stilles derfor store krav til boreværktøjs holdbarhed og robusthed, og det har vist sig, at kun fuldkronede diamantbor har været i stand til at efterkomme udvalgets ønsker i denne henseende. Et diamantbor kræver et ganske bestemt omdrejningstal og boretryk, afhængig af boret type og mediets egenskaber. Borematerialet er blevet konstrueret med mulighed for frit valg af boretryk op til 750 kg og fast omdrejningstal på 400 omdrejninger pr. minut. Dette har vist sig egnet for de typer beton, udvalget indtil nu har haft lejlighed til at undersøge. Figur 30 viser et fuldkronet diamantbor.

Til køling af diamantboret og udvaskning af boreslammet kræves vandtilførsel. Da man ikke kan forvente at finde ledningsvand ved mange betonkonstruktioner, benyttes en  $\frac{3}{4}$ " selvsugende pumpe. Desuden er boreudstyret forsynet med to vandbeholdere, hver på 250 liter.

Til udboring af huller for ekspansionsboltene benyttes et elektrisk håndbor med mejselvirkning.

Som drivkraft for henholdsvis boremaskine, håndbor og vandpumpe anvendes elektricitet. Figur 31 viser udvalgets benzindrevne generator.

For at undgå udtørring af betonborekerne opbevares disse i

messingbeholdere med tætsluttende låg, se figur 32, indtil undersøgelsen i laboratoriet påbegyndes. Herefter opbevares prøven ved stuetemperatur og 100 % fugtighed i en plasticbeholder.

#### Præparering af betonprøver.

Udvalgets petrografiske laboratorium er udrustet med fuldt moderne udstyr til præparering af betonprøver for makro- og mikroskopiske undersøgelser. Når en betonborekerne skal undersøges, gennemsavnes den først ved et aksialsnit. Gennemsavningen foretages med en hurtig roterende diamantsav, se figur 33. Dette snit svarer i finhed til slibning med karborundum 320, se figur 34. Den fremkomne snitflade efterslibes derefter med karborundumpulver på en horisontalt anbragt skive, indtil en finhed svarende til karborundum 800 til 1000 er opnået, se fig. 34. Snitfladen er herefter egnet til undersøgelse under binokulært mikroskop samt til fotografiske detailoptagelser.

Den ene halvdel går derefter til lagring og observation ved 100 % fugtighed. Enhver reaktion vil let registreres på den næsten polerede overflade. Den anden halvdel undersøges, og herefter udvælges særlige områder, ca.  $1 \times 2$  cm<sup>2</sup> til undersøgelse ved hjælp af det petrografiske mikroskop. Disse områder udskæres således, at de danner overfladen i et kasseformet legeme.

For at fikse den oprindelige struktur, imprægneres prøven. Der ved udfyldes revner og hulrum, og sekundære udfældninger fikses således, at der ikke kan ske nogen omlejring eller anden form for æn-

dring under den videre præparering. Imprægneringen foregår med flydende plastic i en vacuumbeholder, se figur 35. Plastic'en er tilsat en hærdner før imprægneringen, og når den imprægnerede prøve udsættes for varme, hærdner plasticmassen, hvorved strukturen fikses. For let at kunne skelne plastic'en fra de i betonen forekommende stoffer, tilsættes den et rødt farvestof.

Når forholdene nær en oprindelig overflade skal undersøges, støbes en plasticramme rundt omkring prøven. Derved får den oprindelige overflade nu en central beliggenhed, og man er sikker på at bevare overfladen under den fortsatte nedslibning.

Består en borekerne af løs eller stærkt gennemrevnet beton, imprægneres hele kernen inden gennemsavningen. Det har ved denne fremgangsmåde været muligt at undersøge betonprøver, hvor så godt som al cement var gået i opløsning og det resterende kun var løseligt sammenholdt af sekundære udfældninger og enkelte cementrester.

Den flade på prøven, der ønskes undersøgt, slibes derefter til karborundumfinhed 800, se figur 36 og 34. Derpå fastnes prøven til et objektglas ved hjælp af polyester.

Skæremaskinen monteres herefter til fræsning, og indtil 6 prøver kan i en operation udfræses til en tykkelse af 100 til 300  $\mu$ . Den endelige nedslibning til omkring 20  $\mu$  gøres for hånden, figur 37, og kræver stor rutine og følsomhed, for at man kan få et præparat, der er lige tyndt over hele fladen. Figur 38 viser et færdigt tyndt snit.

#### Bygværksundersøgelser.

Det vil forstås, at man fra undersøgelser af betonens råmaterialer over mørtelprismeforsøg og til betonprismeforsøg nærmer sig til at behandle alkalireaktioner, som de forekommer i betonbygværker. Den indflydelse, som bygværkets geometriske form og type m. v. kan have på reaktionernes forløb og påvirkningerne fra naturlige omgivelser, er dog holdt udenfor. Disse faktorer har imidlertid afgørende betydning. Der kan derfor ikke på grundlag af de foran nævnte undersøgelser etableres en modellov, ud fra hvilken det kan forudsiges, hvorledes alkalireaktioner forløber i beton under naturlig påvirkning, ligesom disse undersøgelser heller ikke kan tages som dokumentation for, at alkalireaktioner fremfor anden skadelig påvirkning er årsag til konstateret forvitring i bygværker.

Det blev derfor en hovedopgave for udvalget at foretage detaljerede undersøgelser af betonbygværker udvalgt på grundlag af oplysningerne fra den orienterende undersøgelse. Detailundersøgelserne blev i hovedsagen gennemført i sommeren 1955 og omfattede ca. 20 bygværker, overvejende sådanne, hvor umiddelbare symptomer på forekomst af alkalireaktioner i forvejen var konstateret. Undersøgelserne blev foretaget efter en fremgangsmåde, der i skematisk opstilling er vist som tabel 4. Denne opstilling må opfattes som et rammeprogram, der ikke kommer til fuld udfoldelse ved alle bygværker, bl. a. fordi resultater opnået ved de først undersøgte kunne udnyttes ved de følgende. I alt blev udtaget ca. 200 borekerner

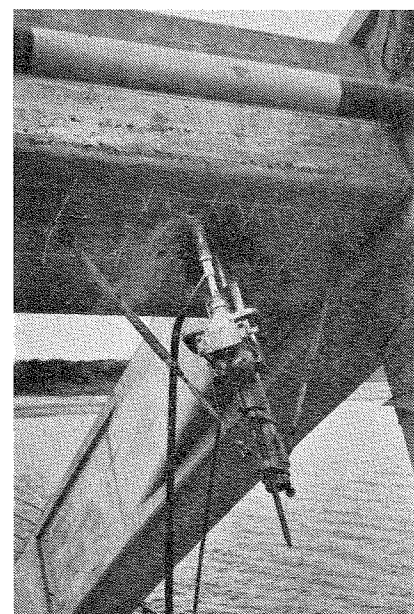


Fig. 26. Boremaskine ophængt i brokonstruktion.

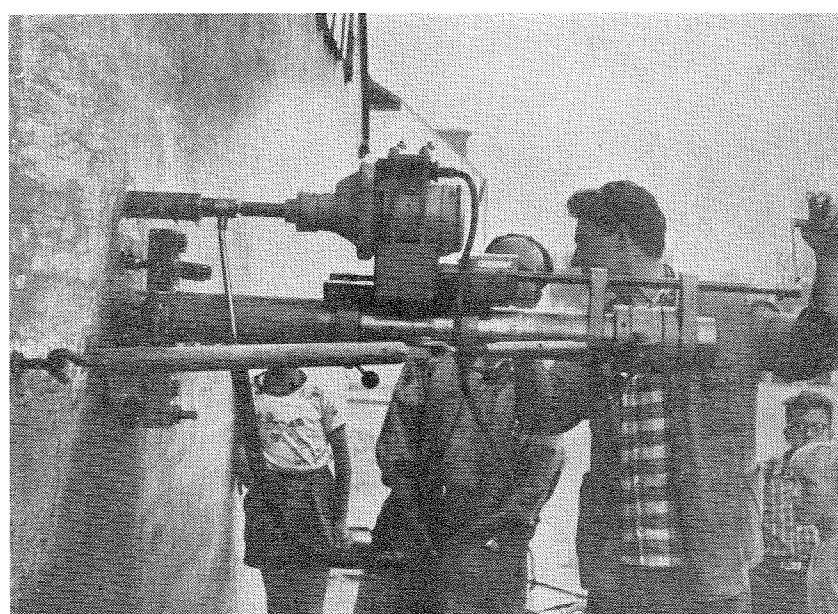


Fig. 27. Boremaskine monteret på lodret væg.

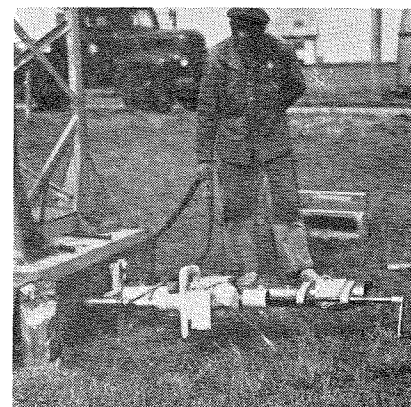


Fig. 28. Boremaskine monteret uden stæg.

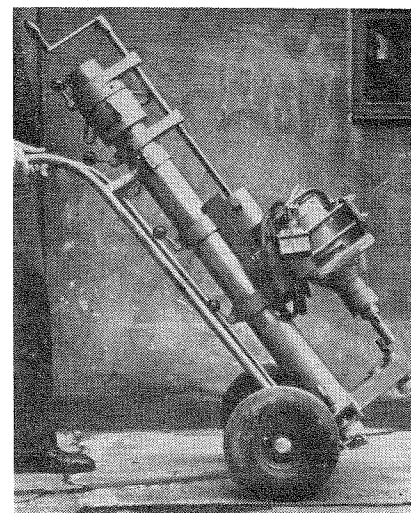


Fig. 29. Køreanordning for boremaskine.

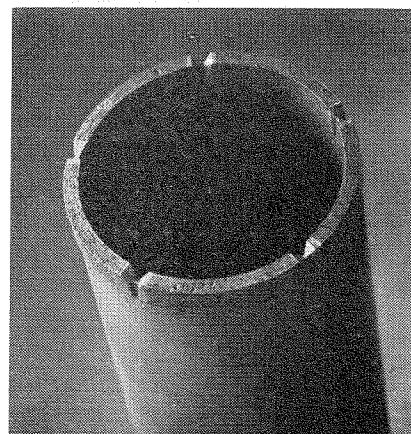


Fig. 30. Fuldkrønet diamantbor, 5 cm diameter.

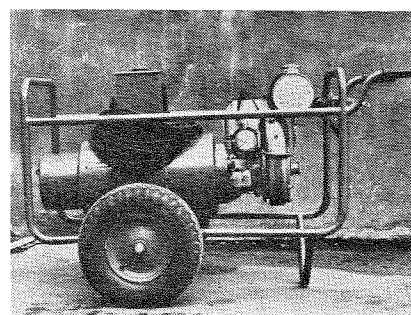


Fig. 31. Benzindrevet vekselstrømsgenerator monteret på transportvogn.

samt et stort antal andre prøver af geludfældninger, grus m. v.

Ikke-destruktive undersøgelsesmetoder, f. eks. ved anvendelse af strain gauges og ved måling af dynamisk elasticitetskoefficient og indre dæmpning af betonen har iøvrigt senere vist sig anvendelige ved undersøgelser af denne art, men er ikke gennemført for de her omtalte bygværkers vedkommende.

De forvitringssymptomer, der blev iagttaget og registreret, kan opdeles i følgende hovedgrupper:

1. Ekspansioner og deformationer
2. Revnedannelser
3. Springere
4. Udfældninger af alkaliselgel
5. Sekundære udfældninger af andre materialer.

Iagttagelser af disse fænomener er beskrevet og kommenteret i (56 I 1). I den følgende oversigt fremdrages derfor kun nogle eksempler.

**Ekspansioner.** På et bygværk er der direkte målt udvidelser af betonelementer på ca. 0,5 % i løbet af 14 år, på et andet ca. 0,7 % i løbet af 15 år (51 T 5), og i begge tilfælde har ekspansionerne medført betydelige driftsmæssige vanskeligheder ved manøvrering af bevægelige dele af bygværkerne, eller ved bygværkernes anvendelse iøvrigt. Ved det sidstnævnte af disse bygværker viste DSB's omhyggelige målinger, at ekspansionerne overvejende fandt sted i sommermånederne. I en række andre tilfælde er betydelige deformationer af betonelementer iagttaget, men målinger ikke foretaget. Figur 39 viser en bropille, hvor forvitrede overfladepartier af betonen er borthugget som led i et reparationsarbejde. Det har herved vist sig, at svære armeringsjern i oversiden er trukket over, fordi stålet efter at være blevet koldskørt ved ældning ikke har kunnet følge betonens udvidelser ved flydning og i stedet er sprængt.

**Revner.** Figur 40 viser den revnede overflade af et kystsikringsbygværk. Figur 41 viser revnedannelser, delvis reparerede, på de indre vægge af en bropille. Figur 42 viser en detailoptagelse af en fuldstændig gennemrevnet, kun 7 år gammel betontrappe ved en lagerbygning. Endelig viser figur 43 en fortovsflise med revnedannelser, hvis forløb øjensynligt er bestemt af flisens geometriske form samt indre ekspansioner som revneårsag.

Revneformationer som vist på figur 40 betegnes netrevner, i amerikansk litteratur »map cracking«, og er overordentlig typiske for forvitring fremkaldt af skadelige alkalireaktioner. Revnerne skyldes



Fig. 32. Messingbeholder til opbevaring af borekerner.

udvidelser af reagerende gruspartikler i betonmassen. Såfremt betonens ekspansion hæmmes af vederlag eller tilstødende bygværkelementer, kan der endvidere fremkomme lange og undertiden meget grove uregelmæssige revner betinget af de opståede spændinger. Figur 44 viser dette fænomen i to sammenstødende vejkantsten.

**Springere.** Reagerende gruspartikler i eller tæt under en betonoverflade kan under ekspansion afsprænge det omliggende beton- eller mørtellag og herved danne springere som vist på figur 45.

Porøs flint, kalksten, forvitrende eruptiver m. v. kan under frostpåvirkning føre til ganske tilsvarende fænomener. Springere er derfor kun et sikkert symptom på skade-

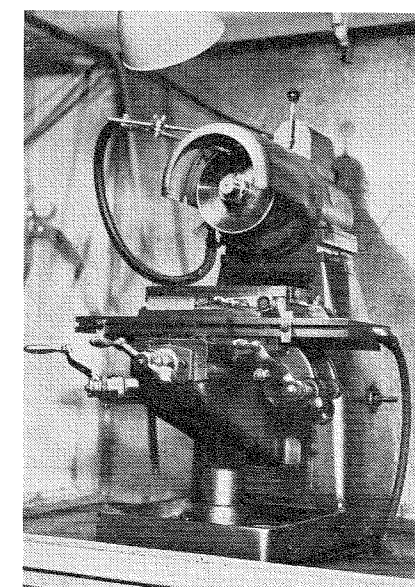


Fig. 33. Kombineret diamantskære- og fræsemaskine. Skivediameter 15 og 25 cm. Omdrejningstal 2840 omdrejninger pr. min.

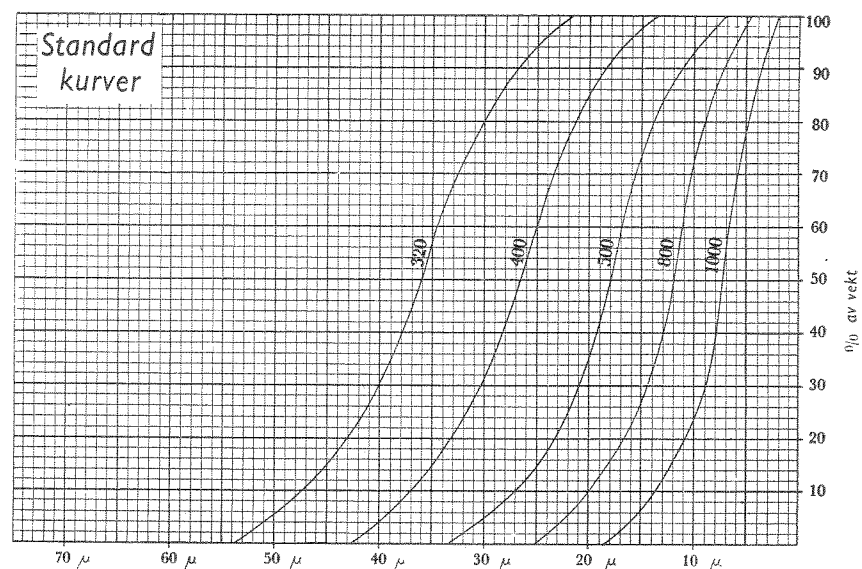


Fig. 34. Kornkurver for karborundum slibepulver.

lige alkalireaktioner, når de enten er dannet over tæt flint, eller over porøs flint i beton, der ikke har været udsat for frost.

Det kan beregnes (56 P 6), at i en almindelig beton med 800 kg sten (8—32 mm) pr. m<sup>3</sup> vil et overlagedag på 3 cm indeholde ca. 1500 stenpartikler pr. m<sup>2</sup>. Hvis blot 2 % af disse danner springere enten ved frostskafer eller alkalireaktioner eller ved begge påvirkninger, fremkommer der 30 springere pr. m<sup>2</sup>. Det er således ikke mærkeligt, at springerdannelse er et hyppigt fænomen i beton i Danmark.

**Geludfældninger.** Når udfældninger af alkalikiselgel som vist på figur 46 og 47 findes på betonoverflader, er dette et sikkert tegn på, at alkalireaktioner foregår i betonen, men gelens blotte tilstedeværelse viser i almindelighed ikke, at eventuelle skader skyldes disse reaktioner. I nogle tilfælde er det dog iagttaget, at afsprængninger i overflader direkte skyldes tryk fra bagved liggende gel, men synlige gelforekomster findes iøvrigt langt fra i alle tilfælde, hvor skadelige alkalireaktioner foregår i betonens indre, og navnlig ikke på overflader, som er stærkt udsat for vejrligets påvirkning.

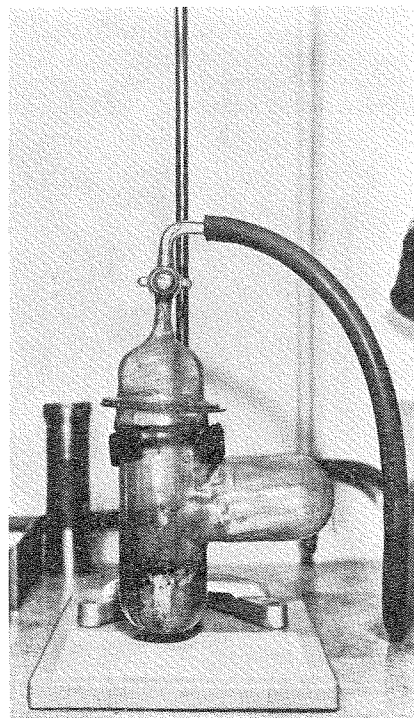


Fig. 35. Vacuumimpregneringsbeholder. Imprægneringsvædske anbringes i skål i bunden. Objektet anbringes i sidebeholderen og kan ved tipping bringes ned i imprægneringsvædsken.

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li><b>Oversigt.</b><br/>Iagttagelser<br/>Opdeling af bygværk<br/>Udvælgelse af elementer til undersøgelse</li> <li><b>Detailbeskrivelse</b><br/>Overfladestruktur og farve<br/>Revnedannelser<br/>Springere<br/>Sekundært udfældede materialer<br/>Vejrforhold<br/>Bygværkets milieu<br/>Fotografisk registrering<br/>Udvælgelse af udboringssteder</li> <li><b>Indsamling af prøver.</b><br/>Bygværkselementer<br/>Betonbrudstykker<br/>Betonborekerner<br/>Sekundært udfældede materialer<br/>Grusmaterialer</li> <li><b>Ekspansionsmålinger.</b></li> <li><b>Tilrettelægning af fremtidige undersøgelser og registreringer.</b></li> <li><b>Diverse.</b><br/>Specielle fænomener<br/>Observationer af generel interesse<br/>Umiddelbare fortolkninger</li> </ol> |
|---|

Tabel 4. Skematisk oversigt over fremgangsmåde ved bygværksundersøgelser.



Fig. 36. Roterende, vandret liggende slibeskive. Skivediametere er 35 cm, og der kan benyttes to hastigheder, 500 og 200 omdrejninger pr. minut. Som slibemiddel benyttes karborundum eller borkarbid opslemmet enten i vand eller i petroleum.

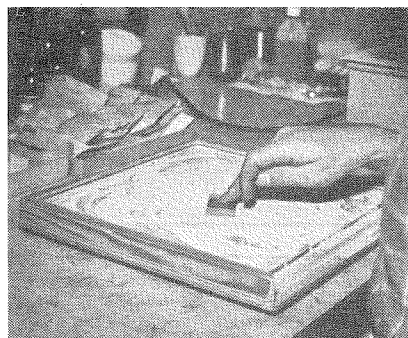


Fig. 37. Nedslibning af tyndsnit foregår for hånden på en spejlglassplade. Som slibemiddel benyttes karborundum eller borkarbid opslemmet enten i vand eller petroleum.

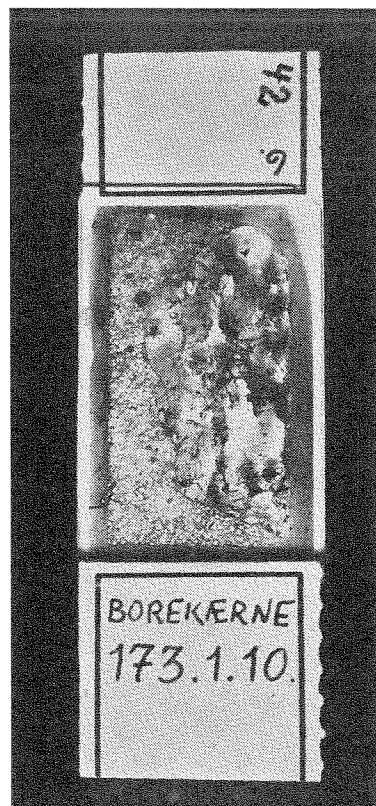


Fig. 38. Færdigt tyndsnit. Selve præparatet er i dette tilfælde 20x35 mm. Hvor særlige forhold gør sig gældende, f. eks. ved revnestudier, benyttes ca. 30x50 mm.

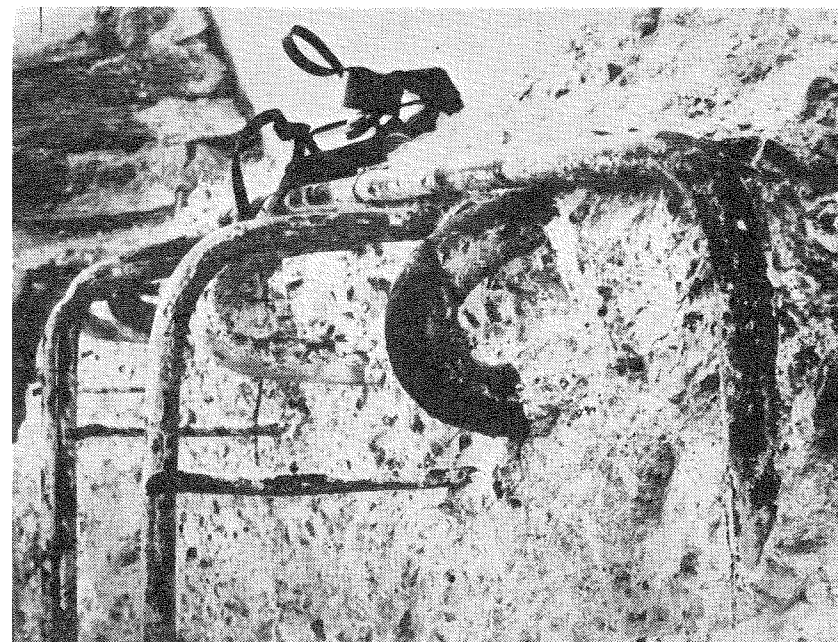


Fig. 39. Bropille under reparation på grund af forvitring af betonen. Svært armeringsjern i oversiden er trukket over i sprødt brud, fordi stålet er blevet koldskørt ved aldring og derfor ikke har kunnet følge betonens ekspansion. Betonens alder er ca. 17 år.

Indsamlede gelprøver er undersøgt petrografisk, kemisk og røntgenografisk. Gelerne er overvejende optisk isotrope med lysbrydningsindex  $1.47 < n < 1.53$  og indeholder ofte urenheder af termonatrit og andre alkalikarbonater. Der synes at forekomme tre hovedtyper af gel i overfladeudfældninger,

1. kalkalkaliskiselgel med indtil ca. 20 % CaO,
2. alkaliskiselgel med intet eller kun spor af CaO og
3. kiselgel med spor af CaO og alkalier.

Den sidstnævnte form er sandsynligvis en udvasket fase af alkaliskiselgel, ændret under vejrligets påvirkning.

**Sekundære udfældninger af andre materialer.** Calciumkarbonat er hyppigt fundet som stalaktitter eller »kager« på overflader af revnet beton. Endvidere er iagttaget fnugagtige udbloomstringer af termonatrit m. v. på indre vægge af beton. Calciumsulfoaluminat er ofte fundet i 0,1—1 mm store sfærolitiske formationer af hvide, nåleformede krystallitter i hulrum i stærkt forvitret beton, som tidligere nævnt både fra bygværker inde i landet og fra bygværker i områder med muligheder for sulfatpåvirkning.

Ved fortolkning af forvittringssymptomer som de ovenfor beskrevne må det tages i betragtning, at andre årsager end skadelige alkali-

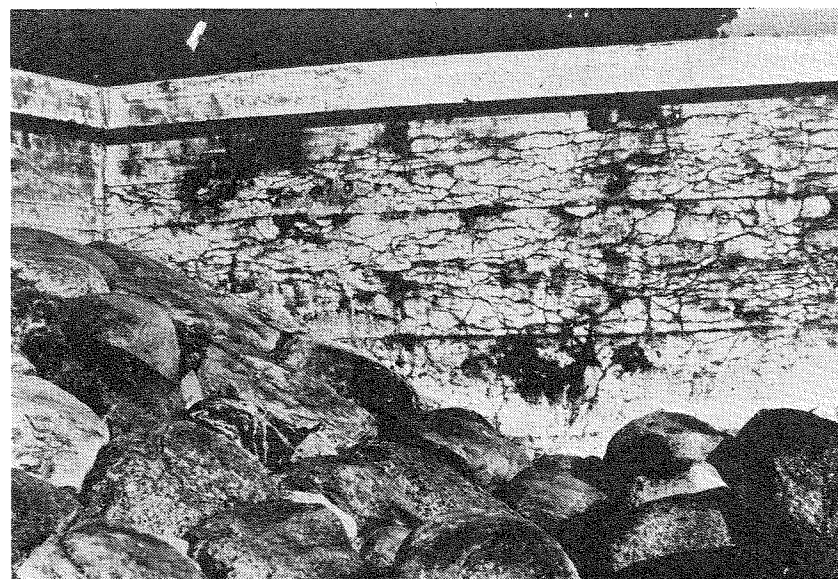


Fig. 40. Kystsikringsbygværk med typiske netrevnedannelser i betonens overflade. Bygværkets alder er ca. 10 år.

reaktioner kan gøre sig gældende. Udendørs bygværker er udsat for frost, og en del af de undersøgte bygværker er udsat for havvand, der også kan være en accelererende faktor ved alkalireaktioner på grund af tilførsel af alkalier til betonen. Andre mulige forvittringsårsager er bl. a. udtørringssvind, korrosion af armering etc.

Som følge heraf vil forvittringen normalt udvikles under en kombineret virkning af flere nedbrydende faktorer, og det er derfor nødvendigt at søge korrelationer mellem forvittringssymptomer og tilsvarende årsager til betonens kemiske eller mekaniske ødelæggelse, d.v.s. at erkende mekanismen i de nedbrydende processer.

**Alkalireaktioners mekaniske ødelæggende virkning** udgår fra reaktive gruspartikler, og reaktionernes forløb er kun indirekte afhængig af kemisk-fysiske forhold i omgivelserne. Den mekaniske virkning kan derfor udgå fra alle punkter i betonmassen, hvor reaktive partikler findes og er således ikke knyttet specielt til overfladefænomener.

Det synlige resultat er en totalekspansion af betonen ledsaget af revnedannelser, såfremt betonen ikke kan tåle deformationerne. Reaktive partikler i eller tæt under overfladen vil give springere. Reaktionsbilledet kan blive højst uensartet over en konstruktion, bl. a. fordi type, mængde og kornstørrelse af reaktive partikler kan variere fra sted til sted både udenfor og indenfor de farlige intervaller.

**Frost** påvirker betonen gradvis fra overfladen indad, og såvel cementpasta — der er vandmættet og ikke luftindblandet — som porøse gruspartikler vil være udgangspunkt for revnedannelser, som dog normalt vil vise sig som overfladeafskalninger og springere. Kun når der er tale om tynde konstruktionsdele i meget hård frostpåvirkning og under fuldstændig vandmætning kan en totalekspansion forventes at optræde.

Medens alkalireaktioner og frostens virkning på betonmassen overvejende er af fysisk-mekanisk natur, er f. eks. **sulfatreaktioner** af overvejende kemisk opløsende virkning. De påvirker som frostene betonen udefra, angriber cementpastaen og forårsager opløsning og mekanisk svækkelse, men ikke ekspansioner af større bygværkselementer, snarere reduktion af oprindeligt rumfang.

Udtørringssvind kan påvirke revneforløbet i overfladen af beton, hvor den primære revneårsag er indre udvidelse. I et enkelt tilfælde fandtes betonfliser med udprægede svindrevner i overfladen. En nær-

mere undersøgelse viste, at fliserne bestod af beton afdækket med et 3 cm pudslag. Betonen viste symptomer på ekspansion som følge af alvorlige skadelige alkalireaktioner. En umiddelbar fortolkning af det overfladiske revnehillede må derfor føre til den konklusion, at et volumenbestandigt afdækningslag forbundet med en underliggende ekspanderende betonmasse, vil udvikle samme system af overfladiske revnedannelser som et afdækningslag, der underkastes svind, over en volumenbestandig betonmasse. Tilsvarende fænomener spiller sandsynligvis også en rolle i monolithiske elementer, hvor overfladen er udsat for stærk udtørring.

Korrosion af armeringsjern i revnet beton kan føre til interne, lokale ekspansioner, som principielt virker mekanisk på tilsvarende måde som ekspansioner af reagerende gruspartikler.

På grundlag af videreførte analytiske betragtninger af denne art kan

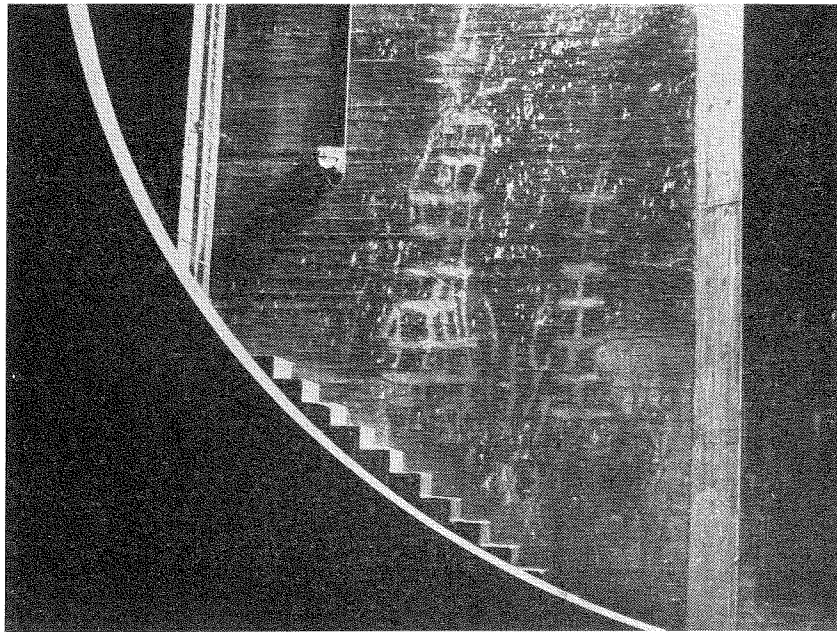


Fig. 41. Revnedannelser på indre vægge af bropille. De brede, lyse linier på væggen i baggrunden viser reparationer af tidligere revner. De talrige, hvide pletter på væggen er overvejende alkalikiselgel. Bygværkets alder er ca. 18 år.

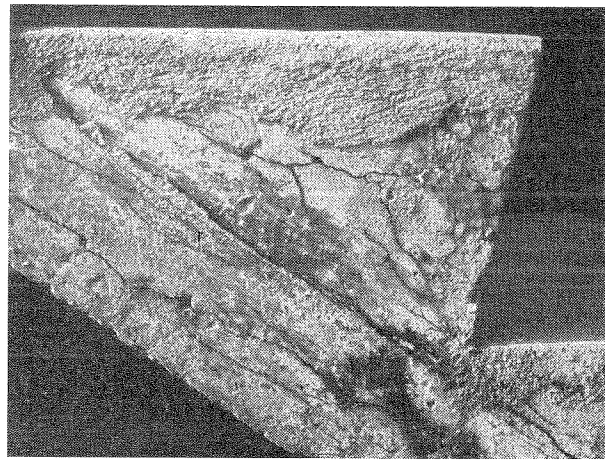


Fig. 42. Detalje af gennemrevnet betontrappe ved lagerbygning. Bygværkets alder er ca. 7 år.

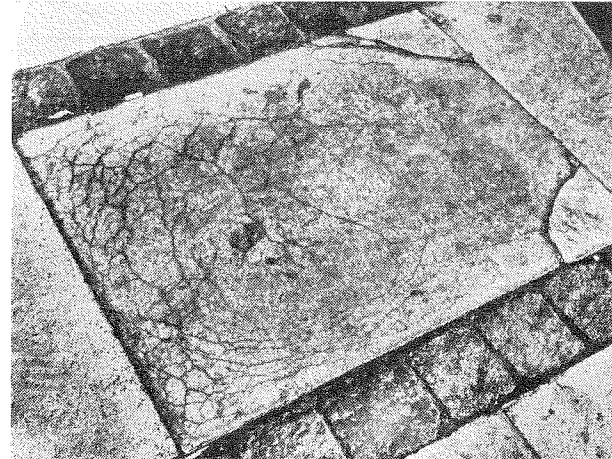


Fig. 43. Fortovsfliise med revnedannelser, hvis forløb følger flisens form.

det i nogle tilfælde være muligt at fortolke iagttagne forvitringssymptomer eller i hvert fald at påpege en dominerende forvittringsårsag.

I andre tilfælde vil forvittringssymptomerne være flertydige. Eksempelvis kan springere over porøse flintpartikler som før nævnt være forårsaget både af frost og af alkalireaktioner. I mange tilfælde vil synlige forvitringssymptomer være enten svage, hvis forvitringen er på et tidligt stadium, eller tilslørede, hvis den er fremskreden, og andre årsager end de her nævnte har medvirket. Det er derfor ofte ikke muligt med blot nogenlunde sikkerhed at stille en diagnose for sygdomsbilledet blot på grundlag af observationer i marken.

Detaljerede undersøgelser af betonens struktur ved hjælp af borekerner og petrografiske mikroskoper er i så fald nødvendige videre trin i undersøgelserne.

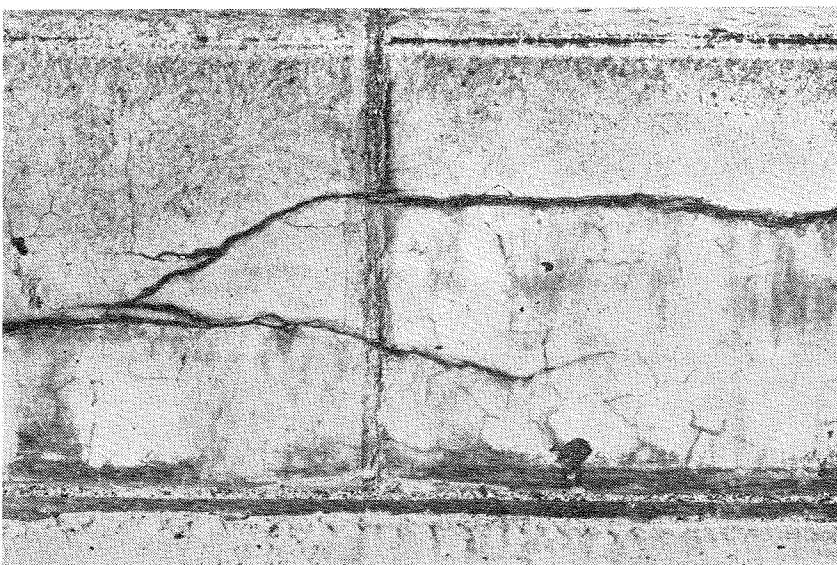


Fig. 44. To sammenstødende vejkantsten med langsgående hovedrevner, der forløber gennem fugematerialet mellem stenene. Bygværkets alder er ca. 15-18 år.

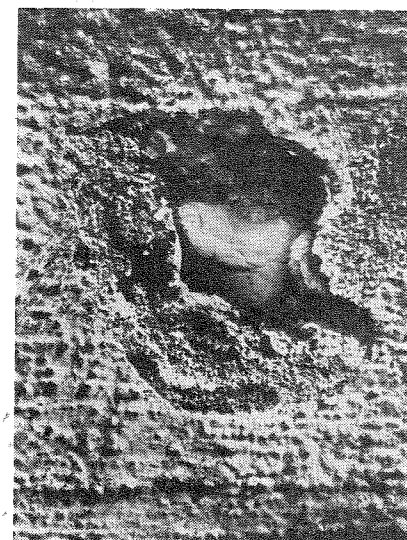


Fig. 45. Afsprængningsår (»Springer«) i betonoverflade over porøs, hvid flint af ca. 40 mm tværsnit.

#### Undersøgelse af betonborekerner.

Petrografiske undersøgelser af udborede betonprøver består principielt i en detaljeret beskrivelse af betonens struktur, og i den foreliggende undersøgelse specielt i beskrivelse og fortolkning af fænomener, der er udtryk for forvitring, og som kan afsløre, om alkalireaktioner eller andre skadelige påvirkninger er årsag til nedbrydningen.

Tabel 5 viser en skematisk oversigt over objekter for iagttagelser i tilfælde, hvor det er af særlig betydning at efterforske symptomer

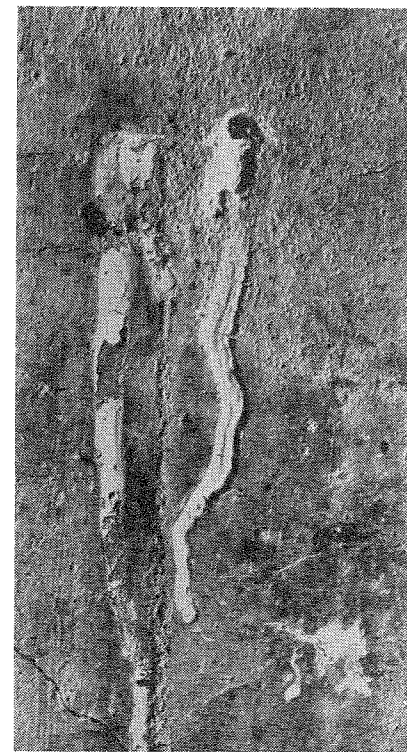


Fig. 46. Udfældning af gel på betonoverflade. Ældre formationer består af tør, hvid gel med svindrevner. Ny dråbe af klar, harpikslignende gel bryder frem foroven. Diameter af dråbe ca. 4 mm.

på henholdsvis skadelige alkalireaktioner, frost og eventuelt kemisk havvandspåvirkning.

Figur 48 viser en borekerne med en geludfældning fremkommet efter udboringen. Endvidere ses parallelt med den endeflade (øverst), der repræsenterer oprindelig betonoverflade, gennemgående revner, som har eksisteret før udboringen, altså i selve bygværket. Kernens overflade er iøvrigt delvis overtrukket af et tyndt, hvidt lag udtørret gel.

Figur 49 viser en snitflade i en borekerne med en meget kraftig udfældning af gel over en porøs flint. Denne geldannelse har udviklet sig under oplagring i laboratoriet af den gennemsnede borekerne. Sådanne geludfældninger fremkommer ofte på overflader og snitflader af borekernerne ved lagring i fugtig luft. Ved udtørring svinder materialet, men sveller påny, såfremt fugtighed tilføres. I tilslutning til geludfældninger af dette omfang iagttages ofte bløde, omdannede partikler af porøs flint som ved mikroskopisk undersøgelse viser sig at indeholde betydelige mængder gel og ofte kun rester af oprindelig mineralstruktur.

Ved iagttagelser af denne art kan det konstateres, om grusmaterialet i betonen indeholder reaktive flinttyper, hvilket er en nødvendig betingelse for alkalireaktioner, og om alkalireaktioner faktisk er foregået, hvilket er tilfældet, hvis flintpartikler er omdannet, og der er udviklet gel.

Ved at sammenligne iagttagelser fra samtlige borekerner i en serie, d. v. s. fra en opstilling af boremaskinen, og fra forskellige serier i samme bygværkselement, kan man endvidere opnå en vurdering af forvittringsfænomenerne, f. eks. revnedannelsernes, fordeling i betonens indre, og disse iagttagelser kan derpå sammenholdes med bygværksundersøgelsernes iagttagelser af overfladefænomener. Ved analytisk arbejde efter denne metode har det bl. a. vist sig, at hvor alkalireaktioner er en dominerende forvittringsårsag, er der en nøje sammenhæng mellem *revnestrukturer* og bygværkets geometriske form og statiske



Fig. 47. Geldråbe på betonoverflade, 25 mm diameter.

forudsætninger, samt mellem *revnetæthed* og de reaktive partiklers mængde, kornstørrelse og fordeling. En detaljeret rapport vedrørende sådanne undersøgelser er under udarbejdelse.

I almindelighed er det imidlertid ikke muligt alene ud fra disse såkaldt »makroskopiske« undersøgelser at fastslå, at betonens mekaniske beskadigelse, d. v. s. revnedannelser, skyldes påviste alkalireaktioner. Revnedannelser og geludfældninger kunne tænkes at være fænomener, der optrådte uafhængigt af hinanden. Endvidere vil eventuelle symptomer på frost- eller sulfatpåvirkning ofte ikke kunne erkendes. Det vil derfor som oftest være nødvendigt at videreføre arbejdet ved undersøgelse af tyndsnit d. v. s. såkaldt »mikroskopisk« undersøgelse af prøverne.

#### Undersøgelse af tyndsnit.

Ved undersøgelse af tyndsnit i polarisationsmikroskop foretages bl. a. ved hjælp af integrationsbord bestemmelse af grusmaterialets sammensætning med hensyn til kornstørrelsesfordeling og mineralogi, idet den procentiske fordeling af henholdsvis tæt flint, porøs flint og andre bjergarter, d. v. s. eruptiver, kalksten m. v. bestemmes. Endvidere studeres revneforekomster

- |  |
|--|
| <p><b>1. Reaktive gruspartikler.</b><br/>Symptomer på reaktioner i tætte, reaktive partikler kan kun skyldes alkalireaktioner. Symptomer på reaktioner i porøse, reaktive partikler kan muligvis skyldes frostpåvirkning.</p> <p><b>2. Inaktive gruspartikler.</b><br/>Porøse, inaktive gruspartikler kan vise symptomer på frostpåvirkning.</p> <p><b>3. Cementpasta.</b><br/>Mekaniske eller kemiske ændringer i cementpastaens mikrostruktur kan være udtryk for frostangreb eller kemisk påvirkning f. eks. fra havvand.</p> |
|--|

Tabel 5. Objekter for petrografisk undersøgelse af betonborekerner.

samt cementpastaens struktur, d.v.s. porøsitet, hærdningsgrad og eventuelle kemiske forvittringsphenomener. Endelig foretages optisk identifikation af forekommende sekundært udfældede stoffer, f. eks. calciumsulfoaluminat.

Figur 50 viser en totalt kemisk omdannet partikel af porøs, hvid flint. Den nedbrudte partikelstruktur er nu udfyldt dels af resterende partier af alkalikiselgel med sekundært udfældet calcit, dels af imprægneringsmassen. Partiklen er omkranset af en rand af isotop gel. Den repræsenterer et typisk eksempel på ødelæggelsesbilledet af porøse flinter som følge af alkalireaktioner.

Figur 51 viser en del af en partikel af tæt flint. Partiklen er gennemsat af åbne, imprægnerede revner, der forløber ud i den omgivende pasta, hvor de er udfyldt af gel. Disse revner ses at spalte et sandkorn af granit. Revnestrukturen indikerer, at revneårsagen er interne udvidelser i partiklen. Langs med revnerne indenfor partiklen er mineralstrukturen stedvis fortyndet og udfyldt af imprægneringsmassen. I partiklens randzone findes forekomster af mikrokrySTALLINSK sekundært calcit. Disse fænomener illustrerer, at der i partikelranden oprindelig er dannet den usvellende kalkalkalikiselgel, medens der i de indre partier under delvis opløsning af mineralstrukturen er dannet svellende alkalikiselgel, som på et vist tidspunkt har bevirket en indre sprængning, hvorefter gel er flydt ud i revner, dannet i cementpastaen. Denne partikel viser typiske symptomer på skadelige alkalireaktioner i tæt flint og repræsenterer en bekræftelse af Powers' og Steinoor's tidligere omtalte teoretisk baserede hypoteser vedrørende skadelige alkalireaktioners mekanisme. På grundlag af lignende tyndsnitobservationer i beton fra de forskellige undersøgte bygværker er det lykkedes at opstille en art systematik for reaktionsbilledet for både tæt og porøs flint. Det har vist sig, at de beskrevne fænomener er så ensartede, at variationer kan forklares alene ud fra forskelle i partiklernes struktur, form og størrelse, således at også de i porøs flint observerede reaktionsfænomener må tilskrives alkalireaktioner og ikke frostpåvirkning. Der vil blive gjort nærmere rede for disse resultater i den ovenfor nævnte rapport.

Ved petrografisk undersøgelse af tyndsnit fra mørtelprismer, der har ekspanderet som følge af alkalireaktioner, har vist sig ganske tilsvarende reaktionsfænomener, både i tætte og i porøse flintpartikler. I disse prismes er andre forvittrings-

årsager end alkalireaktioner, f. eks. frost, kemisk påvirkning etc., udelukket. Endvidere har det vist sig, at iagttagne reaktionssymptomer fremkaldt af anden kemisk påvirkning, f. eks. sulfatangreb og angreb af aggressiv kuldiøxyd, er signifikant forskellige fra de her beskrevne (57 I 3), (57 I 4).

Ved herefter påny at sammenholde tyndsnitobservationer med de makroskopiske borekerneundersøgelser og bygværksundersøgelser må det betragtes som påvist, at de analytiske og teoretiske undersøgelser vedrørende alkalireaktioner har en konkret baggrund i form af skadelige alkalireaktioner i adskillige betonbygværker i Danmark.

#### Midler mod skadelige alkalireaktioner.

Ud fra teoretiske overvejelser kan følgende forholdsregler mod skadelige alkalireaktioner anvises:

1. Anvendelse af inaktive bjergarter som grusmateriale.
2. Tilsætning af puzzolaner til grusmaterialer, der indeholder reaktive bjergarter.
3. Anvendelse af cement med lavt alkaliindhold og puzzolantilsætning.

Ved benyttelse af granitskærver og granitsand eller andet inaktivt materiale undgås naturligvis både skadelige og uskedelige alkalireaktioner. I nogle lande, f. eks. USA, foreligger ofte den mulighed til materialekilde at udvælge naturforekomster, som ved petrografisk analyse og eventuelt ved den hurtige kemiske metode kan påvises at være inaktive. Her i landet vil man til visse betonarbejder af andre hensyn end risikoen for alkalireaktioner benytte specielle grustyper som tilslagsmaterialer. Når disse er in-

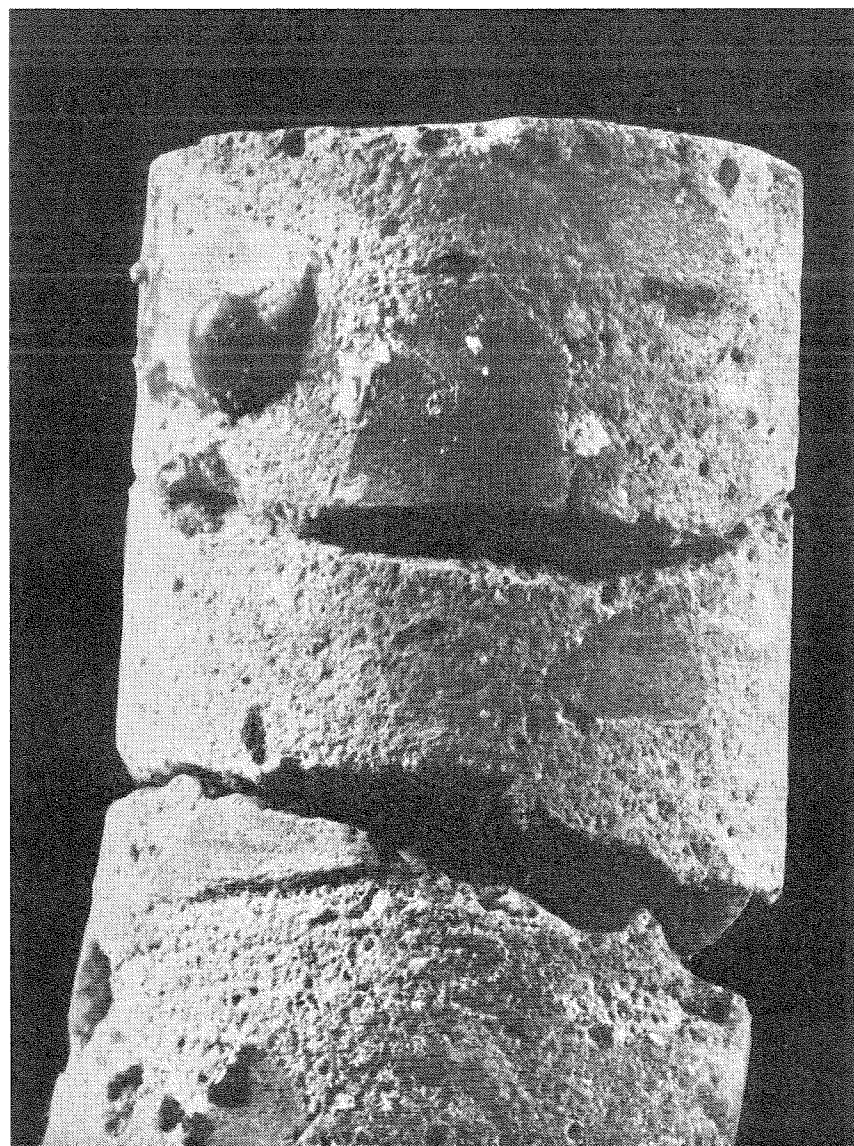


Fig. 48. Del af borekerne. Borekernen er udtaget som brudstykker på grund af oprindelige revner i betonen. Disse revner er overvejende parallelle med oprindelig betonoverflade, der ses øverst på figuren. Foroven til venstre ses en geldræbe på borekernens cylinderflade, d. v. s. fremkommet ved alkalireaktioner efter udboringen. Borekernens diameter er 5 cm.

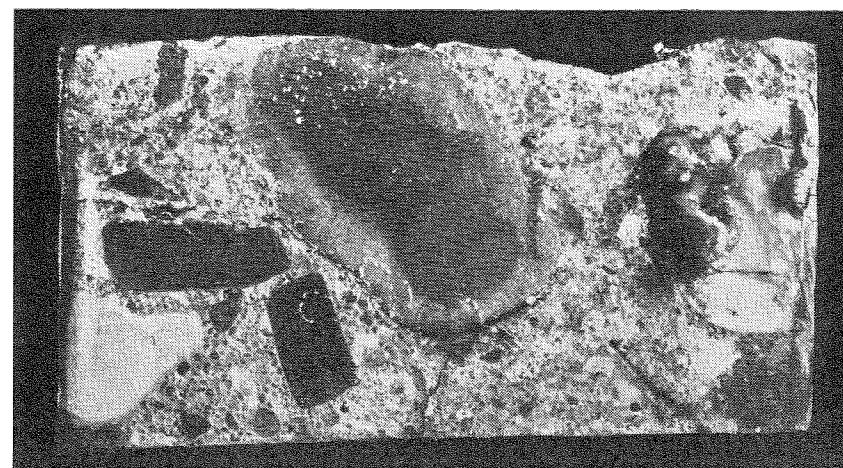


Fig. 49. Snitflade i borekerne med geludfældning over porøs flint til højre i billedet. Geldannelsen er sket i løbet af ca. 1 måneds lagring i fugtig luft ved stuetemperatur. Snitfladens bredde er 5 cm.

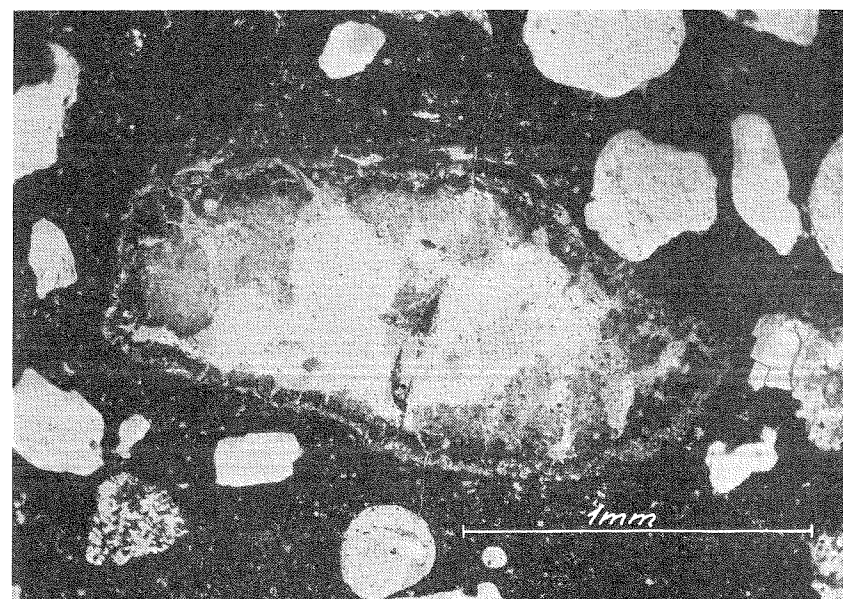


Fig. 50. Forvitret partikel af porøs, hvid flint i tyndsnit af beton med skadelige alkalireaktioner. Partiklens oprindelige struktur er udfyldt af partier af isotrop gel med calcit samt imprægneringsmasse. Partiklen er omkranset af et lag isotrop gel.

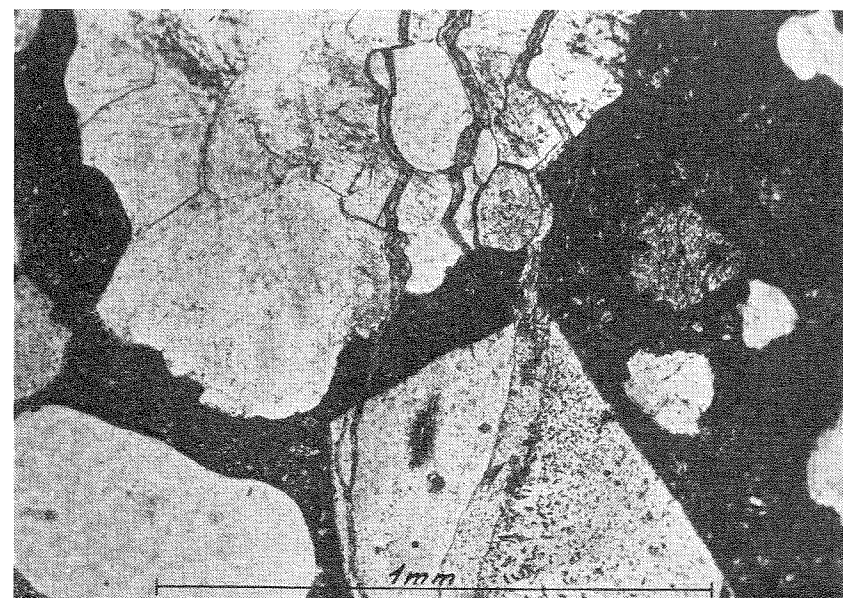


Fig. 51. Del af partikel af tæt flint i tyndsnit af beton med skadelige alkalireaktioner. Partiklen er gennemsat af åbne imprægnerede revner, der forløber ud i omgivende cementpasta og spalter en granitpartikel.

aktive, er alkalireaktioner derfor ikke noget problem.

Ved almindelige betonarbejder benyttes imidlertid overvejende sedimentære grusforekomster, som indeholder reaktive flinttyper. Såvel teori som praksis viser, at dette i mange tilfælde ikke fører til skadelige reaktioner. Udvalgets undersøgelser må derfor føres frem til praktisk vejledning i at benytte disse materialer på sådanne måder, at skadelige reaktioner helt kan undgås. En forholdsregel ved benyttelse af reaktive grusmaterialer er tilsætning af en sådan mængde nedknust reaktivt materiale, puzzolaner, at blandingen kommer udenfor »det farlige område«. I så tilfælde er blandingen sikker uanset alkalikoncentrationens størrelse. En praktisk vanskelighed ved benyttelse af denne fremgangsmåde, er bestemmelsen af den i hvert enkelt tilfælde nødvendige mængde af tilsætningsmidlet, idet dette kræver kendskab til grusblandingens egenskaber.

Et andet hjælpemiddel ved benyttelse af reaktive grusmaterialer er anvendelse af cement med lavt alkaliindhold, idet en grusblandings farlige interval bliver snævrere, når alkalikoncentrationen formindskes, og chancen for at ramme det derfor mindre. I USA er i en årrække produceret cementer med særligt lavt alkaliindhold, og muligheden for at vælge en sådan cement er ofte udnyttet med gode resultater.

Da alkalier dog under visse omstændigheder kan tilføres fra omgivelserne, vil puzzolantilsætning til en sådan cement give større sikkerhed, fordi grusblandingen herved bringes udenfor det farlige område.

Ålborg Portland-Cement-Fabrik A/S fremstiller en sådan lavalkaliecement med puzzolantilsætning. Da erfaringerne imidlertid viser, at alkalireaktioner i mange tilfælde får et uskedeligt forløb i betonbygværker, selvom der benyttes almindelig portlandcement, vil det ikke være hensigtsmæssigt generelt at foreslå anvendelse af specialcement.

Skal de her omtalte »absolutte« hjælpemidler gøres anvendelige for praksis på en økonomisk måde, må derfor også de ydre forhold tages i betragtning. De kemiske og fysiske betingelser bevirker således, at betonkonstruktioner, der er udsat for kraftig og vedvarende udtørring, er mindre udsat for skadelige virkninger af alkalireaktioner end andre bygværker. Dette er i overensstemmelse med de praktiske erfaringer, idet der f. eks. ikke hidtil er konstateret tilfælde af forvitring involverende skadelige alkalireaktioner i indendørs konstruktioner i

almindeligt boligbyggeri, f. eks. etageadskillelser.

De fysiske betingelsers, d. v. s. temperatur, fugtighed m. v., variationer ved udendørs bygværker bevirker på tilsvarende måde, at visse konstruktionstyper eller visse dele af konstruktioner er mere udsat for et skadeligt forløb af reaktionerne end andre, hvilket også svarer nøje til forholdene i praksis.

Analytiske data vedrørende betonmaterialernes egenskaber, d. v. s. cementens alkaliindhold eller grusmaterialernes mineralogiske sammensætning, herunder navnlig dets indhold af tæt og porøs flint er derfor heller ikke vejledende med hensyn til risikoen for skadelige alkali-reaktioner, såfremt disse faktorer vurderes isoleret, d. v. s. uden at tage bygværkets milieu, betonblandingsforhold m. v. i betragtning.

Det fremgår heraf, at til anvendelse i praksis må man tabulere en lang række mulige kombinationer dels af reaktive og inaktive grusmaterialer, dels af dette grus og cementpasta, samt disse blandingers egenskaber, og de ændringer af egenskaberne, som indtræder ved ændring af blandingerne — f. eks. ved tilskud af alkalier eller ved til sætning af puzzolaner.

Disse oplysninger vil være vejledende for den praktiske tekniker, når han kender sine aktuelle materialekombinationer, d. v. s.

1. Cementens egenskaber.
2. Grusets egenskaber.
3. Betonens blandingsforhold.
4. Bygværkets milieu.
5. Bygværkets udformning.

En vejledning for praksis er planlagt udarbejdet af udvalget efter disse retningslinier. En anden anvisning vil omhandle det — desværre — vigtige problem, at reparere bygværker, hvor skaderne allerede er sket, et område, hvor alkali-reaktionernes virkemåde naturligvis har den største betydning.

Foreløbig har udvalget påbegyndt udgivelsen af en serie rapporter, som tilsammen skal give basis for anvisningerne og give dokumentation for resultaterne af det udførte arbejde. Endvidere opnås der her ved mulighed for kritik fra udenlandske specialister inden den endelige bearbejdning sker.

#### Slutning.

Det fremgår af denne beretning, at der ikke normalt synes at være nogen risiko for skadelige alkali-reaktioner i konstant tørre indendørs konstruktioner i almindeligt betonbyggeri og lignende.

Herudover er det imidlertid vanskeligt på nuværende tidspunkt at give generel vejledning til praktisk

anvendelse. Udvalget har derfor besluttet, at i tilfælde hvor den økonomiske betydning af at undgå skadelige alkali-reaktioner er særlig stor, samt hvor det skønnes meget afgørende at konstatere, om skadelige alkali-reaktioner foregår i eksisterende bygværker, vil man påtage sig at yde rådgivende service på grundlag af specialundersøgelse af en sådan sag.

Det må bemærkes, at en sådan undersøgelse, hvor der er tale om nyanlæg, i almindelighed vil nødvendiggøre forsøg af mindst 4—6 måneders varighed. Drejer det sig om udenlandske bjergarter, kan det gå væsentlig hurtigere, hvis petrografiske analyser og hurtig kemisk metode viser, at materialet er inaktivt. Er der tale om undersøgelse af eksisterende bygværker, vil udtagning af borekerner som oftest være nødvendig, og en undersøgelse må normalt påregnes at vare ca. 2—3 måneder.

Udvalget samarbejder med CtO, DGU, Statsprøveanstalten og Lab. for bygningsteknik, der alle er repræsenteret i udvalget, og sagernes ekspedition sker gennem udvalgets sekretariat.

#### Litteraturliste.

- (42 S 1) California Experience with the Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate. T. E. Stanton, O. J. Porter, L. C. Meder & A. Nicol. Proc. ACI, Detroit Jan. 1942. Vol. 38, pp 209—36. Discussion p. 236. (1—39).
- (42 S 2) Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate. T. E. Stanton. Transactions A.S.C.E. New York. 1942. Vol. 107. Paper No. 2129, pp 53—126. Reprint. 73 pages. Discussion by R. F. Blanks, A.S.C.E., Proc. 1941, Vol. 67, p. 904, and by B. Tremper, A.S.C.E. Proc. 1941. Vol. 67, p. 509.
- (47 M 4) Cement-Aggregate Reaction in Concrete. Duncan McConnell, Richard C. Mielenz, William Y. Holland and Kenneth T. Green. Proc. ACI, Detroit, Oct. 1947, pp 93—128. With 34 references to literature.
- (47 P 8) Uddrag af en rapport fra en betonstudierejse i USA, marts-juni 1946. N. M. Plum. Ingeniøren, København 1947, No. 16, pp B 41—B 52. 70 litteraturhenvisninger.
- (47 S 26) E. Suenson: Danske 80-årige betenhuse. Beton-Teknik 13, 1947, p. 29.
- (47 V 5) Studies in Cement-Aggregate Reaction. II-V. H. E. Vivian, C.S.I.R. Australia, 1947, Bull. 229.
- (51 T 5) Tekniske problemer og erfaringer i forbindelse med vedligeholdelse af Danske Statsbaners storbroer. S. Thorning-Christensen. Foredrag ved NIM-møde, Helsingfors, juni 1951. Section: Væg-, Bro- och Vattenbyggnad. (Uddrag).
- (52 J 4) Reactions between Aggregates and Cement. Part III. Alkali-Aggregate Interaction: The Expansion Bar Test and its Application to the Examination of Some British Aggregates for possible Expansive Reaction with Portland Cements of Medium Alkali Content. F. E.

Jones and R. D. Tarleton. National Building Studies, London, 1952. Res. Paper No. 17, 30 pp. With 15 references to literature.

- (52 M 11) Erik V. Meyer og Henning Pauli: Gamle jernbetonbygværker i Odense. Beton-Teknik 18, 1952, p. 95.
- (52 N 1) Betonteknologiske studier i USA. Poul Nerenst, Statens Byggeforskningsinstituts studie no. 7, København 1952, Engelsk resumé. 117 litteraturhenvisninger.
- (52 N 6) Grusets indflydelse på betons holdbarhed. (Concrete Durability influenced by Aggregate). P. Nerenst. Beton-Teknik, København, April 1952. Årgang 18 no. 1, pp 21—34. Engelsk resumé. 5 litteraturhenvisninger.
- (52 S 15) Significant Factors Affecting Concrete Durability. C. H. Scholer. ASTM Proc. Philadelphia 1952. Vol. 52. pp 1145—1154. Discussion pp 1157—1158. With two references to literature.
- (52 W 5) Reaction of Aggregate with Low-Alkali Cement. D. O. Woolf Public Roads. 1952. Vol. 27, No. 3, pp. 50.
- (53 I 2) Oversigt over alkali-grusreaktioner. G. M. Idorn og P. Nerenst, Intern rapport, SBI 1953. 33 sider, 14 litteraturhenvisninger.
- (55 L 2) K. Sten Larsen: Jernbetonskorstenene gennem 50 år. Beton-Teknik 21, 1955, p. 9.
- (55 P 1) An Interpretation of some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction. Part 1 — The Chemical Reactions and Mechanism of Expansion. T. C. Powers and H. H. Steinour. Proc. ACI, Detroit, February 1955. Vol. 51, pp 497—514. Appendix pp 514—516.
- (55 P 2) An Interpretation of some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction. Part 2 — A Hypothesis Concerning Safe and Unsafe Reactions with Reactive Silica in Concrete. T. C. Powers and H. H. Steinour. Proc. ACI, Detroit 1955, April. Vol. 51, pp 785—810. With 16 references to literature.
- (56 A 1) Ib Andersen: Portland-Cementbeton i havvand. Beton-Teknik 22, 1956, p. 37.
- (56 I 1) Disintegration of Field Concrete. Progress Report No. N 1. G. M. Idorn. DNJBR and ATV, Committee on Alkali Reactions in Concrete, Copenhagen 1957. 39 pp. With 24 references to literature.
- (56 P 6) Field Evidences of Disintegration of Concrete Affected by Freezing and Thawing. Ervin Poulsen and G. M. Idorn. RILEM Symposium on Winter Concreting, Copenhagen 1956. Proc. Session C, Part of Discussion. pp 7—16, I—IX. With 3 references to literature.
- (57 A 1) Investigation of the Effect of some Pozzolans on Alkali-Reaction in Concrete. Progress Report L 1. A. H. M. Andreasen and K. E. Haulund Christensen. DNIBR and ATV, Committee on Alkali Reactions in Concrete, Copenhagen 1957, 88 pp. With 14 references to literature.
- (57 I 3) Orienterende petrografisk Undersøgelse af mørtelprismer lagret i Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. G. M. Idorn. Intern rapport R 30, Udvalget vedr. alkali-reaktioner i beton, København 1957. 11 sider, 6 litteraturhenvisninger.
- (57 I 4) Concrete Deterioration of a Foundation. G. M. Idorn, Acta Polytechnica, Civil Engineering and Building Construction Series, Vol. 4, No. 3. 221 (1957). Academy of Technical Sciences, Copenhagen 1957. 48 pp. With 19 references to literature.