

SÆRTRYK 134

UDK 624.012.4:620.193.1

Nordisk Betong nr. 2, 1963

kr. 4,50 i. o.

Gunnar Larsen
Cementpastaudludning som
forvitringsproces i beton

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
I kommission hos Teknisk Forlag · København 1963

Cementpastaudludning som forvittringsproces i beton

Leaching of Cement Paste as a Weathering Process in Concrete

GUNNAR LARSEN*

Indledning

Ved de undersøgelser Udvalget vedrørende Alkalireaktioner i Beton udførte (1954—59) blev petrografisk analyseteknik taget i anvendelse som hjælpemiddel til klarlæggelse af alkalikiselreaktionssymptomer i betonprøver fra forvitrede konstruktioner; dette skete ved et snævert samarbejde mellem betontechnologer og geologer. Resultater af sådanne undersøgelser er bl.a. meddelt af G. M. I d o r n i Udvalgets Progress Reports N2 og N3 [61 I 1], [61 I 2], se også J. J e s s i n g m. fl. [61 J 6].

Det har vist sig, at petrografisk analyse muliggør en ret detaljeret karakterisering af betonens "sygdomsbillede". En naturlig følge heraf har været, at Alkaliudvalget og senere SBI, som siden 1959 har videreført Udvalgets undersøgelser har fået henvendelser udefra med anmodning om at foretage petrografisk undersøgelse af svært forvitrede betonkonstruktioner for at diagnosticere beskadigelsens årsag forud for iværksættelsen af omfattende reparationsarbejde. For på hensigtsmæssig måde at imødekomme sådanne anmodninger har SBI's laboratorium i de senere år udviklet kvantitative petrografiske metoder til brug ved karakteriseringen af betonens sammensætning m. v.

Ved anvendelsen af netop kvantitative metoder er det tydeligt påvist, at foruden alkalikiselreaktioner må også cementpastaudludning regnes blandt de alvorlige forvittringsprocesser. — Formålet med denne artikel er at belyse udludningsforvittringens manifestation samt dens relation til andre forvittringsprocesser gennem en skildring af nogle betonundersøgelser udført af SBI i perioden 1960—62. Emnet har været forelagt på 4. Nordiske Betonforskningskongres i Ålborg, september 1962.

* Mag. scient. Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), København.

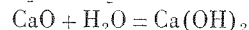
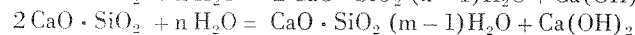
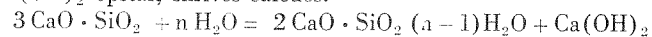
Der er som nævnt tale om rekvirerede undersøgelser, men i en række tilfælde har undersøgelserne været fortsat ud over det omfang, rekvirenten havde anmodet om. Formålet hermed har i hvert enkelt tilfælde været at udforske observerede forvittringsfænomener; økonomisk støtte hertil er modtaget gennem en bevilling fra *Det Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd*, som også har ydet økonomisk bistand i forbindelse med udviklingen af kvantitativ metodik.

Ved undersøgelserne har forfatteren haft samarbejde med civilingeniørerne Jørn Jessing og Erik Trudsø samt cand. mag.'erne E. Stenestad og G. Jansson; de to sidstnævnte har deltaget i det petrografiske analysearbejde.

Alment om $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og cementpastaudludning

Med den hensigt at belyse baggrunden for de iværksatte kvantitative mikroskopstudier af udludningssymptomer er der i det følgende givet en kort almen redegørelse for emnet $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og pastaudludning.

Ved hydratisering af cement dannes som bekendt betydelige mængder af calciumhydroxyd ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dels ud fra klinkermineraletrikalciumsilikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) og dikalciumsilikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) dels ud fra den som accessorisk bestanddel forekommende fri kalk (CaO). Efter I. Biczok [60 B 13] kan de reaktioner, hvorved $\text{Ca}(\text{OH})_2$ opstår, skrives således:



$\text{Ca}(\text{OH})_2$ optræder ofte som et krystallinsk mineral, portlandit, med veldefinerede fysiske og optiske egenskaber, se bl. a. [27 A 1], [62 H 5]. Dette forhold gør det forholdsvis let at identificere $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ved polarisationsmikroskopiske studier af tyndsnit af cementpasta. I cementpasta findes $\text{Ca}(\text{OH})_2$ som regel i form af uregelmæssigt formede individer, der gennemvæver den øvrige pastasubstans, "cementgelen", som under polarisationsmikroskopet har karakter af en grumset, overvejende optisk isotrop masse med spredte indlejringer af uhydrerede klinkerminerale. Stedvis, især på kontakten mellem gruskorn og pasta samt i oprindelige hulrum i betonen, kan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ findes koncentreret i mere massive formationer; i sådanne formationer kan man ofte ved mikroskopstudier spore den for portlandit så karakteristiske basisspaltelighed. — Foruden krystallinsk $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kan der ifølge [60 C 7] i cementpasta tillige forekomme $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i amorf fase; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i denne tilstandsform kan næppe erkendes ved mikroskopering.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ er forholdsvis let opløselig i vand (ca. 1850 mg/l). Denne egenskab medfører, at $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kan opløses og udløses af cementpastaen, hvis denne udsættes for vandgennemstrømning. Ifølge [59 T 3] har japanske forsøg vist, at udludningen fører til reduktion af pastaens styrkeegenskaber (se fig. 1); d. v. s. fremskreden udludning må regnes for en alvorlig forvittringsproces. At dette også er erkendt i Danmark fremgår af [61 J 1]. Som forklaring på styrkereduktionen kan flg. angives: fjernelse af

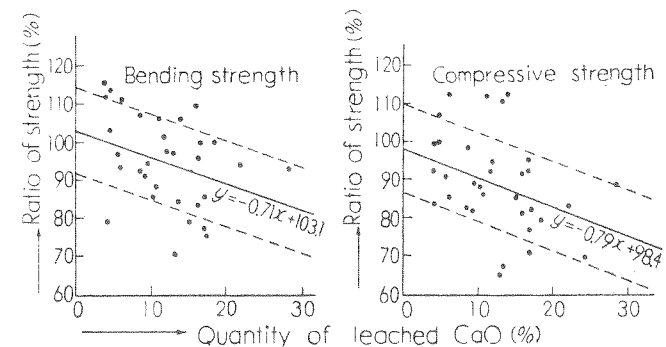


Fig. 1. Korrelation mellem udløst kalkmængde og styrkeforhold for mørtel; gengivet efter Takemoto, Takahashi og Takagi (59 T 3). "Ratio of strength" = = (styrke af mørtel lagret i vand udskiftet dagligt/styrke af mørtel lagret i mættet kalkvand) \times 100. ● Correlation between the quantity of leached CaO and the ratio of strength of mortar. Ratio of strength = (Ratio of the strength of mortar stored in water which is exchanged every day to the strength of mortar stored in saturated limewater) \times 100, per cent. (Takemoto, Takahashi, and Takagi [59 T 3]).

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ fra cementpastaen fører til, at kalciomsilikathydraterne (se ovenstående kemiske ligninger) nedbrydes under dannelse af ny $\text{Ca}(\text{OH})_2$; ved fortsat udludning vil resultatet blive, at cementpastaen gennem fraspaltningen af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ efterhånden nedbrydes til en kiselgel, som formentlig ingen bindeegenskaber besidder, se f. eks. [61 I 1]. — Ydre symptomer på, at der er sket $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -udludning i en betonkonstruktion, vil som oftest være forekomst af CaCO_3 -udfældninger på atmosfærisk exponerede bygværksoverflader; udfældningerne dannes ved indvirkning af atmosfærens CO_2 på den udsivende $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -opløsning.

Af det nævnte er fremgået, at forekomst af CaCO_3 -udfældninger på betonoverflader kan tages som vidnesbyrd om, at der er foregået $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -udludning af konstruktionens beton, men udfældningerne oplyser ikke, hvorvidt udludningsforvitringen er nået et så fremskredent stadium, at betonens fysiske egenskaber, herunder styrken, i væsentlig grad er blevet forringet. Dette spørgsmål må imidlertid kunne opklares ved detaljstudier, eksempelvis petrografiske, af pastaens $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold og strukturforhold. Det er med henblik på belysning af netop sådanne forhold, *SBI's* petrografiske tyndsnitsstudier af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold m. v. i cementpasta er blevet iværksat.

Petrografisk analyseteknik

SBI's studier af udludningssymptomer er som nævnt kun et enkelt led i karakteriseringen af betonens forvitringstilstand. Da artiklens formål bl. a. er at belyse udludningens relation til andre forvittringsprocesser, skal der her gives en oversigt over de forskellige petrografiske metoder, laboratoriet anvender ved studier af symptomer på såvel udludning som anden forvitring.

Den petrografiske undersøgelses studieobjekter er tyndsnit udpræpareret af borekerner eller brudstykker af betonen; præparationsmetodik m. v. er beskrevet i publikationerne [58 P 5], [61 A 7]. Tyndsnitsstørrelsen er som regel ca. 25–50 cm². Af præparaterne fremstilles totalfotos med forstørrelse ca. 5 x.

Tyndsnittene studeres under polarisationsmikroskop, hvorved betonkomponenterne identificeres. Komponenternes relation til forvitringssymptomer, eksempelvis revnestrukturer, fastholdes ved indmærkning på fotografierne. Hyppigheden af de forskellige bestanddele m. v. bestemmes v. hj. a. forskellige kvantitative metoder.

Korntælling

Tilslagetets sammensætning m. h. t. bjergarter og mineraler, herunder bl. a. flint, bestemmes ved korntælling. Sten og sand undersøges hver for sig. M. h. t. stenfraktionen, som talmæssigt er ret svagt repræsenteret i de enkelte tyndsnit, tælles samtlige korn; for sandfraktionens vedkommende omfatter undersøgelsen sædvanligvis 200 korn, udvalgt som de korn, der falder indenfor en bestemt del af synefeltet ved et antal focuseringer jævnt fordelt over tyndsnittet; denne fremgangsmåde benyttes, fordi tyndsnittenes store størrelse umuliggør præparatføring med korsbord. Ud fra det tilvejebragte talmateriale beregnes den procentiske hyppighed (antal-%) af de forskellige komponenter i de to tilslagsfraktioner.

Mikroskopisk punktmåling

Til bestemmelse af Ca(OH)₂-indhold i cementpasta har laboratoriet angivet en metode, som benævnes mikroskopisk punktmåling; metoden er beskrevet i publikationen [61 L 2]. I korthed er fremgangsmåden den, at mikroskopet, udstyret med mikrometerokular, indstilles på et antal punkter jævnt fordelt over tyndsnittet. I hvert punkt indstilles mikroskopet således, at mikrometret udelukkende dækker cementpasta, hvorpå det ved optøling af mikrometerinddelinger bestemmes, hvor stor en procentdel Ca(OH)₂ udgør af cementpastaen på målestedet. Der måles i 25 punkter i hvert tyndsnit; analysesikkerheden ved 25 målinger er søgt belyst i fig. 2. For hvert tyndsnit bliver samtlige måledata behandlet enten statistisk, hvorved middeltal og spredning beregnes, eller grafisk, hvorved der fremstilles en sumpolygon som karakteristik for Ca(OH)₂-indhold. Ved begge fremgangsmåder udtrykkes Ca(OH)₂-indholdet i vol.-%.

Metoden har i nogle tilfælde været anvendt til andet end måling af Ca(OH)₂; det har drejet sig om bestemmelse af betonens 1) cementpasta-indhold, 2) revnehypighed, 3) poreindhold og 4) indhold af sekundære udfældninger. Det skal dog bemærkes, at antallet af sådanne undersøgelser endnu har været så beskedent, at der ikke kan gives generelle retningslinier vedrørende målepunktsantal m. v.

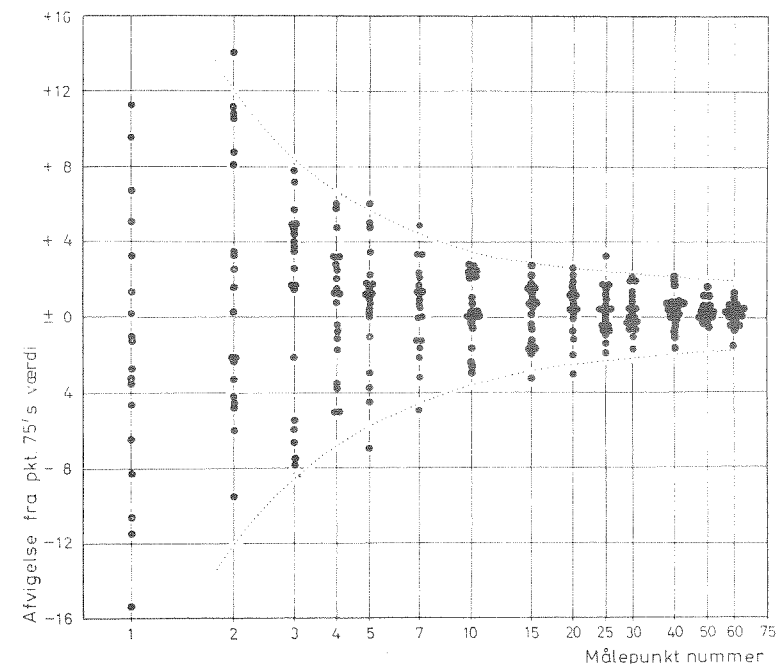


Fig. 2. Mikroskopisk punktmåling; undersøgelse af måleresultaternes ændring med målepunktsallet. Undersøgelsen er udført på den måde, at Ca(OH)₂-indholdet er bestemt ved måling af 75 punkter i hver af 20 tyndsnit. I diagrammet er vist forskellen mellem Ca(OH)₂-indholdet fundet ved de 75 målinger og tilsvarende værdier fundet ved henholdsvis 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 og 60 målepunkter. Det ses, at der efter 10 til 15 punktmålinger kun sker ringe ændring i måleresultatet ved fortsat måling. På basis af dette materiale er 25 målepunkter anset for tilstrækkeligt til at bestemme Ca(OH)₂-indhold i cementpasta. ● *Microscopic point measurements. Investigation of the variation in the results of measurements with the number of points at which the measurements were made. In the present investigation, the Ca(OH)₂ content was determined by measurements at 75 points in each one of 20 thin sections. This graph shows the differences between the value of the Ca(OH)₂ content found from measurements at 75 points and the corresponding values obtained from measurement at 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, and 60 points, respectively. It is seen that after measurements at 10 to 15 points, only a small change in the results of measurements takes place when the measurements are continued. On the basis of these data, the measurement made at 25 points were considered to be sufficient to determine the Ca(OH)₂ content of the cement paste.*

Revneopmåling

Revnestudierne udføres som regel på den måde, at revnerne identificeres og lokaliseres ved mikroskopering af tyndsnit, hvorpå de indtegnes på fotografiet. Den videre bearbejdelse omfatter oftest opmåling på fotografiet af den samlede revnelængde. Ved at sammenholde revnelængde med præparatstørrelse udtrykkes revnehypigheden som mm revne pr. cm² tyndsnitsareal.

Denne fremgangsmåde benyttes med fordel, når revnebredden er ringe. Er revnerne derimod meget brede, er revnelængden et utilfredsstillende udtryk for betonens

revningsgrad; her vil en angivelse af revnevolumen være mere hensigtsmæssig. Det er da også i sådanne tilfælde, den mikroskopiske punktmålingsmetode har været anvendt til revnestudier (se ovenfor). — Det skal nævnes, at laboratoriets kvantitative revnestudier endnu ikke har fundet sit endelige leje; der arbejdes fremdeles med afprøvning af forskellige metoder.

Andet

Laboratoriets studier af sekundære udfældninger i betonen er hidtil væsentligst udført kvalitativt: udfældningerne identificeres (Alkalikiselgel, kalciumaluminatsulfat (CAS), kalciumkarbonat (CaCO_3), magnesiumhydroxyd ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)) og deres forekomstmåde beskrives; kun i enkelte tilfælde er der udført målinger af udfældningsmængderne under anvendelse af den mikroskopiske punktmålingsmetode (se ovenfor).

Undersøgelse af beton fra forvitrede konstruktioner

I det følgende skildres nogle petrografiske undersøgelser af beton fra tre bygværker udvalgt således, at både indlandskonstruktioner og marine bygværker er repræsenteret. Ved udvælgelsen er der endvidere taget hensyn til forvitningsgraden, idet det har været tilsigtet for hvert bygværk at præsentere analyser såvel af stærkt forvitret som af tilsyneladende uforvitret materiale. — Det skal bemærkes, at de pågældende bygværker m. h. t. forvitningsgrad ikke kan anses for repræsentative for danske betonkonstruktioner i al almindelighed.

Ved omtalen af de enkelte bygværker er analyseresultaterne angivet grafisk i tilknytning til skitse af konstruktionen. Disse skitser er strengt skematiske, og skal egentlig blot markere konstruktionstypen, om den er spinkel eller massiv o. l.; en detaljeret redegørelse for bygværksudformningen vil føre for vidt i den her foreliggende sammenhæng. Analysernes indmærkning på bygværksskitserne er ligeledes skematisk, idet der ikke er tale om nøjagtig lokalisering men blot om angivelse af hvilken bygværksdel, analyserne repræsenterer. — Endvidere skal nævnes, at de flg. skildringer er summariske gengivelser af mere omfattende original-rapporter.

Bygværk A

A er en fabriksbygning beliggende i et københavnsk industri kvarter. Bygningen er opført i jernbeton, støbt med Portland cement, i 1927; blandingsforhold 1: 3: 3.

Besigtigelse

En besigtigelse af bygningens øverste etage viste, at forvitringstilstanden var ret uensartet fra sted til sted. I væggene sås enkelte kraftige, åbne, som regel skråtstillede revner forløbende fra loft til gulv i etagen. Tagudhænget (gesimsen)

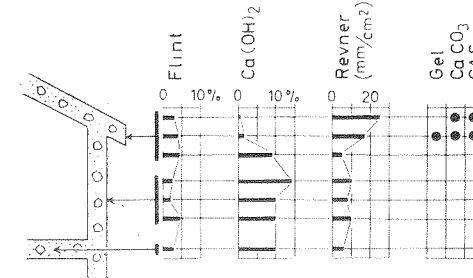


Fig. 3. Bygværk A. Skitse af den undersøgte bygværksdel med angivelse af flg. analyseresultater: Flintindhold (antal-%) i tilslaget sandfraktion, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold (vol-%) i cementpastaen, revneintensitet (mm revne/ cm^2 tyndsnit) samt forekommende udfældning (alkalikiselgel, kalciumkarbonat, kalciumaluminatsulfat). ● Structure A. Sketch showing that part of the structure which was subjected to investigation. The graphs represent the following results of analyses: Flint content, in per cent by number, of the sand fraction of aggregate; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content, in per cent by volume, of the cement paste; crack intensity, in mm of crack length per cm^2 of thin section area; exuded substances (alkali-silica gel, calcium carbonate, calcium sulphoaluminate).

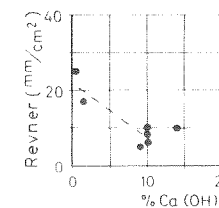


Fig. 4. Bygværk A. Korrelation mellem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold (vol-%) og revneintensitet (mm/ cm^2). ● Structure A. Correlation between the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content, in per cent by volume, of the cement paste and the crack length per cm^2 of thin section area.

var overvejende stærkt forvitret, præget af talrige revner, stedvis smuldringstendens samt forekomst af skorpeagtige afsætninger.

I bygværket udboredes kerner i gesims og vægge samt i etageadskillelsen. Af kernerne fremstilledes 7 tyndsnit, som har været analyseret med flg. resultat.

Analyse

I fig. 3 er resultater af tyndsnitsanalyser afbildet. Det ses, at tilslagets sandfraktion indeholder 2—4½ % flint; stenfraktionens indhold af flint er ca. 60 % (udregnet for samtlige tyndsnit under eet); flintindholdet er øjensynlig af nogenlunde samme størrelse i bygværkets forskellige dele. Pastaens $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold er af størrelsesordenen ca. 10 % i betonen fra vægge og etageadskillelse; tilnærmelsesvis samme indhold er fundet i det ene tyndsnit fra gesimsen, medens de to andre præparater viste et indhold på omkring 1 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Der spores en ret nøje overensstemmelse mellem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold og revningsgrad, idet de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -fattige prøver har ca. dobbelt så stor revnelængde pr cm^2 som de andre prøver, se fig. 4. I de to stærkt revnede prøver ses en del frakturer at udgå fra porøse flintkorn; tilsvarende er ikke iagttaget i de andre præparater. Af sekundære udfældninger er alkalikiselgel, kalciumaluminatsulfat samt kalcit konstateret; disse findes som revneudfyldninger i de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -fattige prøver, men

ikke i de øvrige. Gelen optræder navnlig i nærheden af svindrevnede, porøse flinter. Af det nævnte fremgår, at der øjensynlig er en ret nøje korrelation mellem henholdsvis $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -reduktion, revneintensitet og forekomst af sekundære udfældninger.

Vurdering

Analyserne afspejler tydeligt, at svær forvitring er foregået i kanthjælken. Forvitringen her synes at være resultat af en kompleks virkning af alkalikiselreaktioner, pastaudludning og sulfatangreb. Alkalikiselreaktionerne er øjensynlig årsag til i hvert fald en del af de konstaterede revner; men også udludning har formentlig spillet en rolle i denne forbindelse, idet den kraftige reduktion af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indholdet må antages at have svækket pastaens styrkeegenskaber og derved lettet revnedannelsen. De smuldringstendenser, der er iagttaget ved bygværksbesigtigelsen skal sikkert sættes i forbindelse med destruktion af pastastrukturen som flg. af udludning. Årsagen til udviklingen af alkalikiselforvitringen og pastaudludningen må ifølge symptomernes lokalisering i bygværket være regnvands indvirkning på betonen. Tilstedeværelse af CAS er symptom på sulfatreaktioner; sulfattilførslen er sikkert sket gennem regnvand, som har udvasket svovlforbindelser fra industrirøg og evt. sodafsætning. CAS's forekomstmåde som udfældninger i revner i betonen og ikke i selve betonmaterialet synes at vise, at CAS er dannet ved reaktion mellem tilført sulfat og udludt pastasubstans, sandsynligvis kalciumaluminathydrat. Dette tyder på, at udludningsforvitringen har angrebet andet og mere end pastaens $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

I de øvrige dele af bygværket er de her omtalte forvitningsprocesser ikke konstateret. I stedet forekommer som nævnt enkelte større, gennemgående revnesystemer. De udførte betonanalyser har ikke kunnet belyse årsagen til disse revner; men det synes nærliggende at antage, at revnerne hidrører fra egentlige bygværksdeformationer evt. fremkaldt af uensartet nedsynkning af fundamentsunderlaget.

Det forhold, at de "egentlige" forvitningsprocesser er nøje knyttet til bygværkets kanthjælke og ikke konstateret andetsteds, er utvivlsomt en følge af, at kanthjælken har været mest exponeret for fugtpåvirkning.

Bygværk B

B er en marine brokonstruktion beliggende i Nordjylland; broen er en jernbetonkonstruktion støbt med Portland cement. Den del af bygværket, den her foreliggende undersøgelse omhandler er undervandsbetonen i den ene pille, hvis udformningsmæssige hovedtræk er vist ved skitsen fig. 5. Heraf ses, at der i pillens nedre del findes åbne rum; normalt er disse vandfyldte.

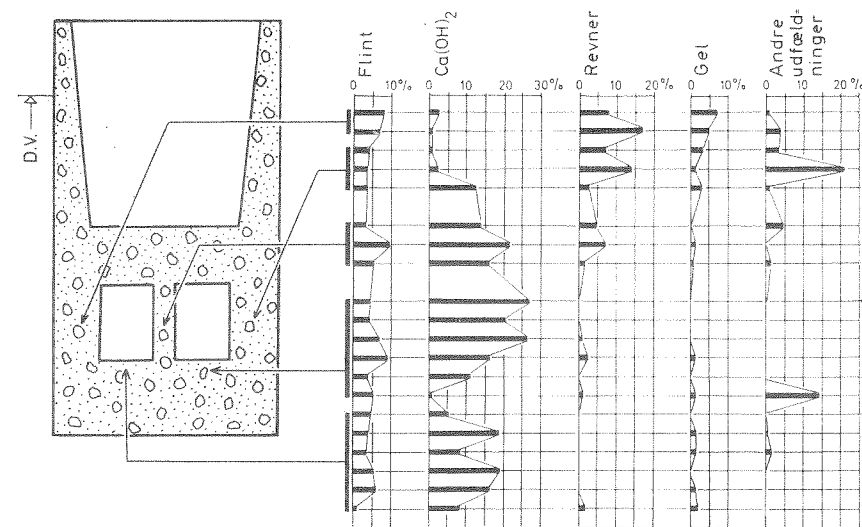


Fig. 5. Bygværk B. Skitse af den undersøgte bygværksdel med angivelse af flg. analyseresultater: Flintindhold (antal-%) i tilslagets sandfraktion, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold (vol-%) i cementpastaen, revneindhold (vol-%) i betonen samt betonens indhold (vol-%) af alkalikisegel og andre udfældninger ($\text{Mg}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , kalciumaluminatsulfat). — D.V. = Daglig vande. ● Structure B. Sketch showing that part of the structure which was subjected to investigation. The graphs represent the following results of analyses: Flint content, in per cent by number, of the sand fraction of aggregate; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content, in per cent by volume, of the cement paste; crack content, in per cent by volume, of the concrete; amounts, in per cent by volume, of alkali-silica gel and other exuded substances ($\text{Mg}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , calcium sulphoaluminate) contained in the concrete. D.V. = Mean sea level.

Besigtigelse

Som forberedelse til reparationsarbejder var der etableret adgang til pillens nedre kamre, som var blevet lænset for vand. I forbindelse hermed foretog SBI en besigtigelse af betonen i kamrene. Det viste sig, at der foregik stadig indsvivning af vand adskillige steder. På betonoverfladerne blev iagttaget udbredte forekomster af hvidlige, gullige og undertiden brunlige udfældninger ofte i ret svære formationer. Brunlig misfarvning af betonen sås ofte. Mange steder var betonoverfladen præget af afskalninger som blotlagde tilslagsmaterialerne. Kun enkelte steder sås egentlige revnedannelser.

I tilknytning til besigtigelsen blev der indsamlet prøver af udfældninger samt foretaget udboring af kerner i betonen. Lodret ned i kamrenes gulv udboredes to kerner à ca. 2 m's længde; i ydervæggene boredes to vandrette kerner à ca. 1 m's længde og i mellemvæggen een vandret kerne à ca. 1½ m's længde. — Af kernerne er fremstillet ialt 20 tyndsnit, alle udskåret vinkelret på kerneaksen.

Analyse

I fig. 5 er vist en oversigt over analyser af de 20 tyndsnit. — Flintindholdet i tilslaget sandfraktion ses at variere mellem 1 og 9½ % med en middelværdi på ca. 5 %. I stenmaterialet er flintindholdet, beregnet som middeltal for alle tyndsnit, knapt 70 %. Cementpastaens $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold er underkastet store variationer, men i hovedsagen er forholdet det, at $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kun er til stede i ganske ringe mængde i ydervægsbetonen, medens indholdet af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gennemgående er ret stort i betonen fra de andre dele af bygværket; dog findes der lokale reduktioner også her. — Betonens revningsgrad er stedvis meget stor, og revnerne er i mange tilfælde ret brede; af denne grund er revneintensiteten ikke bestemt som mm revne pr. cm^2 , men som volumen-% revne af revne + beton

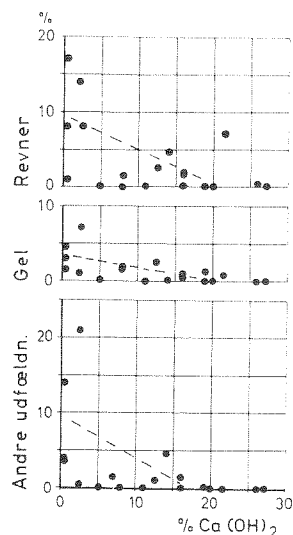


Fig. 6. Bygværk B. Korrelation mellem på den ene side $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold i cementpastaen og på den anden side betonens indhold af revner, gel og andre udfældninger. ● Structure B. Correlations between, on the one hand, the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content of the cement paste and, on the other hand, the crack content of the concrete, the gel content of the concrete, and the percentage of other exuded substances contained in the concrete.

under anvendelse af punktmålingsmetoden. Mange revner ses at udgå fra porøse flintpartikler. I de stærkt revnede betonprøver synes en væsentlig part af revnerne at være præget af svindfænomener, idet de dels er ret brede og dels forløber netagtigt i pastaen uden at skære gruskornene. Af fig. 5 ses, at revneintensiteten er særlig stor i betonen fra ydervæggene og mindst i gulybetonen, samt at der i det store og hele er en ret god korrelation mellem reduktionen i $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og betonens revningsgrad (fig. 6). — Af sekundære udfældninger er flg. konstateret ved tyndsnitsanalysen: alkalikiselgel, magnesiumhydroxyd, kalciumkarbonat, kalciumaluminatsulfat. Af disse er gelen generelt set den hyppigst forekommende, men i nogle tyndsnit er $\text{Mg}(\text{OH})_2$ helt dominerende; de to andre udfældningstyper findes i ret ringe mængde. Alle udfældninger forekommer i

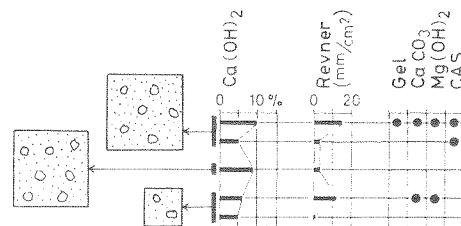
revner, porer og hulrum, men er ikke konstateret i selve betonmaterialet. Under anvendelse af punktmålingsmetoden er hyppigheden af henholdsvis gel og andre udfældninger bestemt; resultaterne fremgår af fig. 5. Heraf ses, at ydervægsbetonen som helhed har størst indhold af udfældninger og gulybetonen mindst; dog er der enkelte undtagelser. Endvidere fremgår, at der er en ret god overensstemmelse mellem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -reduktion og udfældningsmængde, se også fig. 6.

Ved kemisk analyse af udfældninger afskrabet på betonvæggene er der foruden ovennævnte $\text{Mg}(\text{OH})_2$ og CaCO_3 tillige påvist $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ og CaCl_2 .

Vurdering

Analyserne har tydeligt vist, at store dele af betonen er stærkt forvitret, samt at forvitringen er resultatet af flere forskellige processers virksomhed. Alkalikiselreaktionssymptomer, herunder forekomst af revner og geludfældninger omkring flintpartikler, er konstateret i alle de undersøgte bygværksdele, men der spores i analyseresultaterne en tydelig tendens til, at alkalikiselforvitringen har været mest omfattende i ydervægsbetonen. — Fremskreden cementpastaudludning, indiceret ved udpræget reduktion af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indholdet, synes ligeledes i særlig grad knyttet til ydervægsbetonen, men er også konstateret lokalt i gulybetonen. Det forhold, at $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -reduktionen er ret vel korreleret med revneintensiteten, samt at revnerne for en stor del synes at være svindrevner, tyder på, at udludningen har ført til en alvorlig svækkelse af pastastrukturen. Hertil skal føjes, at den pH-sænkning i pastaen, som $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -udludningen medfører, må antages at have alvorlige konsekvenser også for armeringen, idet jernets "passivitet" herved ophæves, se f. eks. [61 S 10]. Direkte observationer af skader på jernene foreligger dog ikke ved denne undersøgelse, men det synes nærliggende at sætte de brunlige misfarvninger af betonen i forbindelse med korrosion af armeringen. — Forekomst af $\text{Mg}(\text{OH})_2$ tages almindeligvis som vidnesbyrd om, at der er foregået kemiske havvandsangreb, hvorved magnesium fra havvandet har reageret med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i betonen. Ved de her foreliggende undersøgelser er $\text{Mg}(\text{OH})_2$ intetsteds iagttaget in situ i betonmaterialet men udelukkende som udfældninger i revner, hulrum og på betonoverflader. Tager man i betragtning, at $\text{Mg}(\text{OH})_2$ er meget tungt opløseligt i vand (ca. 9 mg/l), tyder observationerne på, at $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -udfældningerne er dannet ved reaktion mellem magnesium og udsivende $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -opløsning, eller med andre ord, at $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -dannelsen ligesom CaCO_3 -dannelsen (se tidligere omtale heraf) er ledsagefænomen til $\text{Ca}(\text{OH})_2$ udludningen. — CAS, som er symptom på sulfatangreb, forekommer som udfældning i revner o. l. på samme måde som omtalt i bygværk A, og dannelsen kan følgelig forklares på samme måde, nemlig som reaktion mellem tilført sulfat (i dette tilfælde fra havvand) og udludet pastasubstans, formentlig C_3AH . D. v. s. at også "sulfatangreb" ser ud til at være et ledsagefænomen til pastaudludningen.

Fig. 7. Bygværk C. Skitse af de tre betonblokke, med angivelse af analyseresultater for cementpastaens $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold (vol-%) og revneintensitet (mm/cm^2) samt af forekommende udfældninger (alkaliskiselgel, kalciumkarbonat, magnesiumhydroxyd, kalciumaluminat-sulfat). ● Structure C. Sketch of three concrete blocks. The graphs represent the following results of analyses: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content, in per cent by volume, of the cement paste; crack intensity, in mm of crack length per cm^2 of thin section area; exuded substances (alkali-silica gel, calcium carbonate, magnesium hydroxide, calcium sulphoaluminate).



Af det nævnte er fremgået, at betonen øjensynlig er præget af to hovedforvittringsårsager, nemlig alkaliskiselreaktioner og pastaudlodning. Disse processers forvittringssymptomer er indbyrdes ret godt korreleret (fig. 6), hvilket formentlig er udtryk for, at de har en fælles forudsætning, nemlig vandindtrængning i betonen. Det forhold, at ydervægsbetonen er mest forvitret, svarer meget godt til, at denne del af bygværket må anses for at være mest exponeret for vandindtrængning.

Bygværk C

C er et kystsikringsanlæg på Jyllands vestkyst bestående af betonblokke af størrelsen 120 t, 40 t og 4 t. Blokkene er støbt med havvande cement. Denne undersøgelse har omfattet to 40 t blokke og een 4 t blok.

Besigtigelse

Af de to 40 t blokke var den ene tilsyneladende uforvitret, medens den anden var præget af netrevner og geludfældninger. På 4 t blokken sås svagt udviklede netrevner. — Kerner udboredes i alle tre blokke. Der fremstilledes ialt fem tyndsnit, hvoraf to repræsenterede den forvitrede 40 t blok, eet den tilsyneladende uforvitrede blok og to 4 t blokken.

Analyse

I fig. 7 er nogle af analyseresultaterne vist. Ved undersøgelsen blev flintindholdet bestemt for sand og sten under eet til ca. 25 %, varierende fra 13 til 40 %. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indholdet er ret lavt, ca. 5—10 %, hvilket formentlig er karakteristisk for cementtypen. Revner forekommer i alle tyndsnit; i de to mest revnede betonprøver kunne en del af revnerne henføres til porøse flinter. Af udfældninger er alkaliskiselgel, kalciumkarbonat, magnesiumhydroxyd og kalciumaluminat-sulfat konstateret forekommende i revner og porer; de fordeler sig i materialet som vist i fig. 7. Det ses, at de to mest revnede prøver indeholder flest udfældninger, samt at udfældninger ikke er truffet i prøven af den tilsyneladende uforvitrede betonblok.

Vurdering

Analysesresultaterne er i god overensstemmelse med resultatet af besigtigelsen, idet der ikke er påvist forvittringssymptomer i prøven af den tilsyneladende uforvitrede blok, men i materialet fra de to andre blokke. Ifølge analyserne er de forvittringsprocesser, som har virket i bygværk C, af samme type som i A og B, blot er pastaudlodningen i C øjensynlig ikke så vidt fremskreden.

Formålet med at referere undersøgelsen af bygværk C har især været at demonstrere, at der i beton støbt med havvand cement kan forekomme principielt samme forvittringsprocesser som i Portland cement-beton.

Sammenfatning

De foran refererede undersøgelser repræsenterer et karakteristisk udsnit af et større antal undersøgelser, SBI i tidens løb har udført. De ved undersøgelse indvundne erfaringer angående forvittringsårsag og -betingelser kan derfor antages at have gyldighed også for andre svært forvitrede betonkonstruktioner i Danmark.

Det ser ud til, at alvorlig betonforvittring næsten altid skyldes en kompleks virkning af flere forskellige processer, hvoraf to, nemlig alkaliskiselreaktioner og cementpastaudlodning, synes at være de alvorligste, begge er betingede af vandindtrængning i betonmaterialet. Sammenfattende kan der for disse to processers indbyrdes samhörighed samt relation til andre processer angives flg. fysisk-kemiske model (fig. 8):

Betonen er sammensat således m. h. t. flint i tilslaget og alkalier i cementen, at potentielle muligheder for skadelige alkaliskiselreaktioner er til stede; det skal bemærkes, at en sådan sammensætning er karakteristisk for flertallet af de danske betonkonstruktioner. — Betonen udsættes for vandindtrængning. Herved opstår det fugtige miljø, som udløser alkaliskiselreaktionerne; er vandet alkaliholdigt (f. eks. havvand), vil betonens alkalikoncentration og dermed muligheden for alkaliskiselforvittring forøges. Ved alkaliskiselreaktioner opstår revner, som "åbner" betonen for yderligere vandindtrængning. Det indtrængende vand

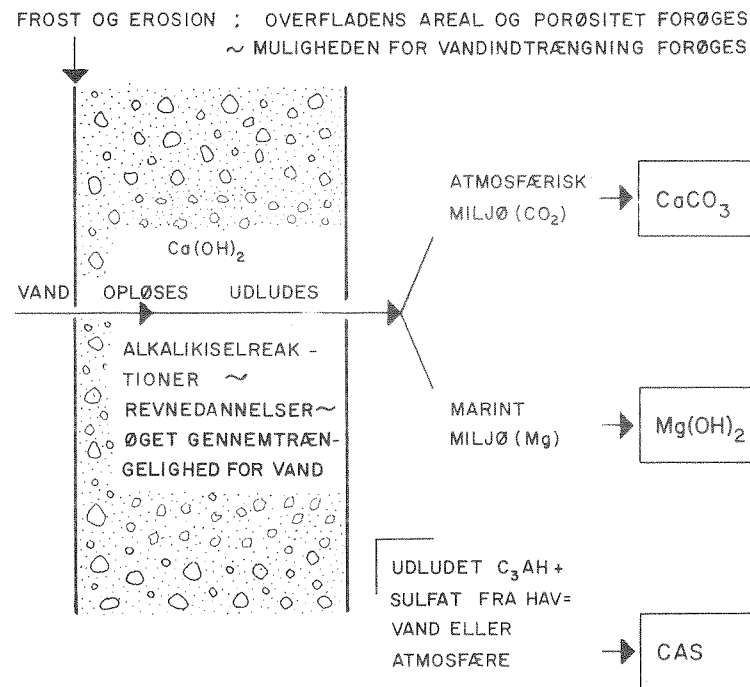


Fig. 8. Fysisk-kemisk model for betonforvitring som følge af vandgennemstrømning. • Physico-chemical model which represents weathering of concrete due to percolation of water.

opløser bestanddele i cementpastaen, først og fremmest Ca(OH)_2 . Ved at vandet ikke blot trænger ind i, men igennem betonmaterialet, føres de opløste stoffer bort; der sker i egentlig forstand en udludning. Under udludningens fremadskriden svækkes cementpastaens styrkeegenskaber (jvf. fig. 1), hvilket bl. a. letter revnedannelsen ved alkalikiselreaktionerne. Udludningen har også en anden virkning, idet den pH-sænkning, som følger med Ca(OH)_2 'ens fjernelse, fører til nedbrydning af det passiviserende lag, som omgiver armeringsjernene; konsekvensen heraf er korrosion af armeringen. — Såfremt betonen er placeret i et atmosfærisk miljø, vil den udludede Ca(OH)_2 under indvirkning af CO_2 omdannes til CaCO_3 , som udfældes på betonoverfladen; det skal bemærkes, at der ved "betonoverflade" ikke blot menes ydre bygværksoverflader men også indre overflader i betonen, således revne- og hulrumsvægge. Sker udludningen i marine omgivelser, vil havvandets magnesium reagere med det udludede Ca(OH)_2 med udfældning af Mg(OH)_2 som resultat. — Udludningen angriber øjensynlig også andre pastakomponenter end Ca(OH)_2 , idet forekomsten af kalciumaluminatsulfat som udfældninger på betonoverflader tilsyneladende må fortolkes som

resultat af reaktion mellem udludet C_3AH og sulfat tilført fra havvand eller atmosfære ("foruren" af industrirøg o.l.).

Ifølge de her omtalte forhold, som støtter sig på undersøgelse af betonkonstruktioner, er de egentlige forvitningsprocesser alkalikiselreaktioner og cementpastaudludning, medens "kemiske havvandsangreb" og sulfatreaktioner er reduceret til ledsagefænomener til udludningsforvitringen. Hvorvidt disse altid har denne status, kan imidlertid ikke afgøres ud fra de refererede undersøgelser.

En forvitningsproces, der ikke er omtalt endnu, er frost-tø virkningen; dennes bidrag i den skitserede proceskreds er øjensynlig væsentligst det, at den forøgelse af betonoverfladens areal og porøsitet, frostskafer fremkalder, øger muligheden for vandindtrængning og dermed for udludning m. v. Principielt samme virkning har mekanisk erosion, f. eks. isgang på bropiller. Omvendt vil den beton, som i forvejen er påvirket af andre forvitningsprocesser, være lettere angribelig for både frost og erosion.

Modellen (fig. 8) må betragtes som en rå skitse. Den tager således ikke detaljeret stilling til de mange forskellige vandtypers specielle virkemåde under udludningen; eksempler på nogle særlige vandtypers indvirkning er omtalt i [57 I 4], [62 K 3], [62 N 2]. Endvidere skal bemærkes, at der bl. a. under laborieforhold vil kunne påvises mange forvitningsfænomener, som afviger fra ovennævnte.

Formålet med opstilling af modellen har været at give en samlet fortolkning af årsagen til de symptomer, som hyppigt træffes i forvitret beton i Danmark. Da hovedårsagen til forvitringen øjensynlig er vandindtrængning i betonen, må en effektiv forebyggelse eller bekæmpelse af forvitringen bestå i at hindre vandets indtrængning.

Summary

Thin sections of concrete taken from deteriorated structures have been subjected to petrographic examination at the Danish National Institute of Building Research for several years. The analyses made in this connection cover, among other things, the petrographic composition of the aggregates, the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content of the cement paste, cracks, and secondary exudation. The studies in question are mainly quantitative. This paper presents analyses of concrete from three structures marked A, B, and C. A is a factory building constructed of Portland cement concrete (the analyses are shown in Figs. 3 and 4). B is a marine bridge, which is likewise built of Portland cement concrete (the analyses are reproduced in Figs. 5 and 6). C is a structure for protection against coastal erosion, which is constructed of marine cement concrete (the analyses are represented in Fig. 7). The results of these investigations are summarized in Fig. 8.

It was found that the leaching of cement paste and the alkali-silica reactions are the most serious processes of deterioration. Both these processes are due to the infiltration of water into the concrete. The cracks caused by alkali-silica reactions facilitate the infiltration of water into the concrete. Consequently, these reactions increase the risk of removal of cement paste by leaching. In an atmospheric environment, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ leached out from the concrete is converted into CaCO_3 . In a marine environment, the lime leached out from the concrete will react with magnesium in sea water, with the result that $\text{Mg}(\text{OH})_2$ will be formed, and will come out as exudation. Judging from its mode of occurrence, calcium sulphoaluminate (CAS) seems to be a product of reactions between leached C_3AH and sulphate originating from sea water or from atmospheric air (contaminated by smoke). Accordingly, in the present case, the chemical attack by sea water and the sulphate reactions seem to be phenomena which accompany the leaching of cement paste. Freezing and thawing contribute to the above-mentioned weathering processes in so far as frost damage increases the area and the porosity of the concrete surface. This, in its turn, facilitates the infiltration of water into the concrete, and hence increases the danger of leaching.

Litteratur

- [27 A 1] F. W. Ashton & R. Wilson. "The Preparation and Optical Properties of Calcium Hydroxide Crystals." American Journal of Science V. Ser. Bd. 13, pp. 209—218. 1927.
- [57 I 4] G. M. Idorn. "Concrete Deterioration of a Foundation." Acta Polytechnica Scandinavia, vol. 4, No 3. Copenhagen, 1957.
- [58 P 5] E. Poulsen. "Preparation of Samples for Microscopic Investigation." The Danish National Institute of Building Research and the Academy of Technical Sciences. Committee on Alkali Reactions in Concrete. Progress Report M1. Copenhagen, 1958.
- [59 T 3] K. Takemoto, H. Takahashi & S. Takagi. "Leaching of Lime from Various Kinds of Cement Mortar and its Effect on the Strength." Japan Cement Engineering Association. Review of the 13th General Meeting, pp. 30—31. Tokyo, 1959.
- [60 B 13] J. Biczok. "Betonkorrosion — Betonschutz." Budapest, 1960.
- [60 C 7] L. E. Copeland & A. Grudemo. "Portlandcement + vatten. Reaktionen i systemet $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$." Svensk Kemisk Tidsskrift, 72: 10, pp. 644—651. Stockholm, 1960.
- [61 A 7] P. E. Andersen & B. Hjorth Petersen. "Drilling of Concrete Cores and Preparation of Thin Sections." RILEM Bulletin, New Series No 11, pp. 94—106. Paris, 1961.
- [61 I 1] G. M. Idorn. "Studies on Disintegrated Concrete. Part 1." The Danish National Institute of Building Research and The Academy of Technical Sciences. Committee on Alkali Reactions in Concrete. Progress Report N 2. Copenhagen, 1961.
- [61 I 2] G. M. Idorn. "Studies on Disintegrated Concrete. Part II." The Danish National Institute of Building Research and The Academy of Technical Sciences. Committee on Alkali Reactions in Concrete. Progress Report N 3. Copenhagen, 1961.
- [61 J 1] A. Jeppesen. "Alkaliudvalgets vejledning 2. Vedligeholdelse og istandsættelse af beton- og jernbetonkonstruktioner." Statens Byggeforskningsinstitut. København, 1961.
- [61 J 6] J. Jessing, A. Kjær, G. Larsen & E. Trudsø. "Alkali-Silica Reactions in Concrete." RILEM. Durability of Concrete. Preliminary Report of the International Symposium, pp. 103—133. Praha, 1961.
- [61 L 2] G. Larsen. "Microscopic Point measuring: a quantitative petrographic method of determining the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content of the cement paste of concrete." Mag. Concrete Research. No 38, Vol. 13, pp. 71—76. London, 1961.
- [61 S 10] T. Sneh. "Korrosion av järn och stål ingjutet i betong." Nordisk Betong, årgång 5, pp. 1—28, Stockholm, 1961.
- [62 H 5] R. Hedin. "Processes of Diffusion, Solution and Crystallisation in System $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{H}_2\text{O}$." Svenska Forskningsinstitutet för Cement och Betong vid Kgl. Tekniska Högskolan i Stockholm. Hande. Nr 33. Stockh. 1962.
- [62 K 3] A. Kjernerud. "Hydrerte cementmineralers forhold overfor aggressive vanntyper sett i relasjon til betongkorrosion." Nordisk Betong, årgång 6, nr. 3, pp. 223—234. Stockholm, 1962.
- [62 N 2] J. Nielsen & P. Skovgaard. "Blødt kulsurt vands indvirkning på betonrør." Nordisk Betong, årgång 6, nr. 3, pp. 235—246. Stockholm, 1962.