LUND UNIVERSITY

# Korrosion och kalkurlakning vid sprickor i betongkonstruktioner

Halvorsen, Ulf A

1966

Link to publication

*Citation for published version (APA):*
Halvorsen, U. A. (1966). *Korrosion och kalkurlakning vid sprickor i betongkonstruktioner*. [Licentiatavhandling, Avdelningen för Byggnadsmaterial]. Tid. Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska högskolan i Lund.

*Total number of authors:*
1

**General rights**
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

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

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Download date: 09. Dec. 2025

INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSTEKNIK
TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND

DIVISION OF BUILDING TECHNOLOGY
THE LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

# KORROSION OCH KALKURLAKNING VID SPRICKOR I BETONGKONSTRUKTIONER

## CORROSION OF STEEL AND LEACHING OF LIME NEAR CRACKS IN CONCRETE STRUCTURES

ULF A. HALVORSEN

BULLETIN 1

LUND, SWEDEN 1966

INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSTEKNIK
TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND

DIVISION OF BUILDING TECHNOLOGY
THE LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

# KORROSION OCH KALKURLAKNING VID SPRICKOR I BETONGKONSTRUKTIONER

## CORROSION OF STEEL AND LEACHING OF LIME NEAR CRACKS IN CONCRETE STRUCTURES

ULF A. HALVORSEN

BULLETIN 1

LUND, SWEDEN 1966

Innehållsförteckning

F ö r o r d

I n t r o d u k t i o n

Del I. Korrosion på ingjutet stål

0. Inledning ..... sid 6
1. Korrosionsproblemet i svensk betongpraktik ..... " 7
2. Allmänna synpunkter på ståls korrosion i betong . " 10
2.1 Korrosionsteori ..... " 10
2.2 Betongens inverkan ..... " 11
2.3 Sprickors inverkan ..... " 12
3. Litteraturstudie betr sprickors inverkan på korrosionsangrepp ..... " 13
4. Korrosion vid sprickor i vattenbyggnadsbetong .. " 17
4.1 Orientering ..... " 17
4.2 Utförandet av undersökningen ..... " 18
4.3 Inspektionsresultat och slutsatser ..... " 19
5. Sprickors inverkan på korrosion av värmerör ingjutna i slipbruk ..... " 22
5.1 Orientering ..... " 22
5.2 Program för undersökningen ..... " 23
5.3 Material ..... " 24
5.4 Tillverkning av provkroppar ..... " 26
5.5 Inspektion av provkropparna ..... " 28
5.5.1 Värderingsmetod vid inspektionerna " 28
5.5.2 Orienterande inspektion ..... " 29
5.5.3 Inspektion av första fullständiga omgången rör ..... " 31
5.6 Diskussion av försöksresultaten ..... " 36
5.6.1 Inverkan av varierande brukskvalitet " 37
5.6.2 Sprickviddens inverkan ..... " 37
5.6.3 Inverkan av $CaCl_2$-tillsats ..... " 37
5.6.4 Inverkan av varierande ingjutningsteknik ..... " 38
5.6.5 Inverkan av varierande täckskikt ... " 38
5.7 Slutkommentar ..... " 39
6. Sammanfattning, del I ..... " 39

Del II. Betongförstörelse genom kalkurlakning


0. Inledning ..... sid 42

1. Litteraturöversikt ..... " 43

2. Diskussion av urlakningsmekanismerna ..... " 65

2.1 Allmänna cementkemiska förutsättningar ..... " 65

2.2 Hydratationsprodukternas stabilitet i rent vatten ..... " 68

2.3 Faktorer som inverkar på cementets urlakningsresistens ..... " 71

2.4 Värdering av riskerna för skadlig urlakning i en konstruktion ..... " 78

2.4.1 Betongs vattentäthet ..... " 78

2.4.2 Olika angreppsformer ..... " 79

3. Utförda undersökningar ..... " 87

3.1 Fältinspektioner ..... " 87

3.2 Läckningsmätning och vattenanalyser ..... " 89

3.3 Utborrning av provkärnor ..... " 93

3.3.1 Storfinnforsdammen ..... " 93

3.3.2 Krångfors Kraftstation ..... " 94

3.4 Ultraljudmätningar vid Storfinnforsdammen .. " 96

3.5 Analyser av betongen i kärnorna ..... " 98

3.5.1 Kemisk analys ..... " 98

3.5.2 Mikroskopisk tunnslipsanalys ..... " 99

3.6 Värdering och diskussion av erhållna resultat " 100

4. Sammanfattning, del II ..... " 104

Litteraturförteckning till del I

" " " II

Figurer 1-29, del I

" 30-60, del II

Bilaga 1-6, del I

" 7-14, del II

# Förord

De undersökningar som utgör underlag för det arbete, som härmed framlägges, påbörjades under sommaren 1961 vid Cement- och Betonginstitutets Kontaktavdelning, Stockholm, och har sedan hösten 1964 i vissa delar fortsatt vid Institutionen för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund. Undersökningarna omfattar dels långtidslaboratorieförsök med avseende på korrosionsförhållandena för ingjutna värmeslingor vid sprickor i golvbruk, dels fältundersökningar av sprickor i vattenbyggnadsbetong med avseende på deras inverkan på korrosionsrisk för armeringen och kalkurlakningsrisk. Undersökningen av korrosion på ingjutna värmeslingor har bekostats av Skånska Cementgjuteriet AB, Stockholm, medan de övriga undersökningarna har bekostats av Svenska Vattenkraftföreningen för Tekniskt Utvecklingsarbete (VAST) samt de berörda kraftverksbolagen, varav speciellt skall nämnas Krångede AB, som har bekostat en stor del av undersökningarna på Storfinnforsdammen. Samtliga tackas härmed för att de gjort det möjligt att utföra detta arbete.

Jag tackar även Cement- och Betonginstitutets ledning för att jag fått tillfälle att använda och bearbeta undersökningarna till denna uppsats.

Initiativtagare till undersökningarna var överingenjör Lars B Nilsson, då vid Krångede AB och VAST samt professor Sven G Bergström, då chef för CBI:s Kontaktavdelning. Jag är de båda stor tack skyldig för att jag fick tillfälle att handha utförandet av arbetena samt för deras många värdefulla råd och anvisningar. Professor Bergström har även senare - som chef för Institutionen för Byggnadsmateriallära vid LTH - följt arbetet med stort intresse och har välvilligt granskat manuskriptet. För detta framför jag ett speciellt tack.

Vid utförandet av de olika stadierna av dessa undersökningar har ett stort antal personer och institutioner hjälpt till på olika sätt, och de skall alla ha mitt varma tack. Speciellt tackas fru Aina Persson och fru Inger Röijer för deras arbete med utskrivning av manuskriptet och utarbetandet av bilagor och figurer.

Arbetet framlägges härmed som licentiatavhandling vid Institutionen för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund.

Lund i maj 1966

Ulf A Halvorsen

# Introduktion

I samband med byggandet av massiva och förhållandevis grova betongkonstruktioner - som vid flertalet av svenska betongdammar - förekommer ofta sprickbildning i varierande omfattning. Sprickorna kan huvudsakligen karakteriseras som temperatursprickor och har sin främsta orsak i den värmeutveckling, som sker vid cementets hårdnande. Sprickorna kan antingen vara rena ytsprickor, som ofta uppstår i samband med att ytan utsätts för temperaturchock, t ex i samband med formrivningen, eller genomgående sprickor som uppstår under avsvalnandet av konstruktionen genom att en fri hopdragning är förhindrad. Vid genomgående sprickor i konstruktioner utsatta för ensidigt vattentryck sker ofta omfattande läckning. Gjutfogar och dilatationsfogar mellan konstruktionsdelarna utgör också svåra moment med avseende på risk för läckning, och det är mycket vanligt att omfattande läckning sker även vid fogarna.

Läckningen medför klara estetiska olägenheter, och det är självklart att den ej är förenlig med det omedelbara funktionskravet på en betongdamm att den skall vara tät. Det arbetas också starkt inom vattenbyggnadsbetongen för att få fram hjälpmedel mot sprickbildning och otäta fogar. I första hand önskar man ett cement med lägre värmeutveckling under hårdnandet samt förbättrade metoder vid utförandet av fogarna.

De estetiska olägenheterna av läckningen är emellertid i många fall av mindre vikt och läckningen har ingen betydelse med avseende på vattenförlust. Sprickornas betydelse måste därför bedömas ur säkerhetssynpunkt, och de kostnader som nedläggs för att reducera eller hindra uppkomst av läckande sprickor och fogar måste ses i relation till de eventuella skaderisker de medför.

Vid utförandet av VAST:s inventering av sprickor och frostskador i vattenbyggnadsbetong (Bergström och Nilsson/23) konstaterades, att sprickbildningen och läckningen för vissa anläggningar var mycket omfattande, men utredningen gav ej underlag för bedömning av i vilken grad läckningen medför risker för konstruktionernas bestånd. Av speciella riskmoment nämndes frostskador i anslutning till sprickorna, korrosion på armeringen

och betongförstörelse genom kalkurlakning. Det ansågs angeläget att ytterligare undersöka dessa riskmoment, och författaren fick tillfälle att utföra utredningarna rörande de två sistnämnda momenten, korrosion och kalkurlakning. Undersökningarna skulle uppläggas med speciell inriktning på svenska förhållanden och i första hand utföras som fältundersökningar och litteraturstudier.

Parallellt med dessa undersökningar har under författarens ledning pågått en undersökning av risken för korrosionsskador på ingjutna värmeslingor, speciellt med syfte på riskerna vid eventuella sprickor i ingjutningsbetongen. Denna undersökning utförs som en långtidslaboratorieundersökning och har ännu ej slutförts.

Korrosionsproblemen vid sprickor anses vara likartade, oberoende av om det ingjutna stålet är armering eller värmerör, och det anses naturligt att utnyttja resultaten från de två undersökningarna i denna uppsats för att kunna belysa frågan på bästa sätt.

Uppsatsen har uppdelats i två huvuddelar:

Del I: Korrosion på ingjutet stål

Del II: Betongförstörelse genom kalkurlakning.

För båda delarna gäller att de speciellt avser förhållandena vid sprickor och fogar.

I det följande anges "förf" som referens till författarna av refererade publikationer, medan "författaren" avser författaren av denna uppsats.

# Del I. Korrosion på ingjutet stål

## 0. Inledning

Det är allmänt accepterat att betong utgör ett mycket bra skydd mot korrosion på ingjutna stål under förutsättning att betongen är av tät och "god" kvalitet och att stålet är fullständigt kringgjutet genom ett fackmässigt arbetsutförande. Om emellertid utförandet brister på någon punkt, så att förutsättningarna ändras genom att t ex betongen är porös och otät, stålet är otillräckligt kringgjutet, eller betongen innehåller sprickor in till stålet, förloras skyddet och man har risk för korrosionsskador. Litteraturen på detta område är mycket omfattande och det finns redovisade ett stort antal exempel på allvarliga skadefall, (se litteraturförteckningen 1, 2, 3 och 4).

Genomgående gäller emellertid att den miljö i vilken konstruktionen befinner sig, har avgörande betydelse för huruvida man skall få skador eller icke. Detta gäller såväl den yttre miljön, makromiljön, i form av temperatur, fukt och förekomst av korrosionsbefrämjande föroreningar och salter i den atmosfär, som omger konstruktionen i sin helhet, som den lokala miljön, mikromiljön, omedelbart intill stålet vid de för korrosionsrisk utsatta ställena. Miljöns korrosivitet är främst bestämmande för angreppshastigheten och framskridandet av korrosionen, och således avgörande för huruvida man skall få någon skada av betydelse inom konstruktionens avsedda livslängd. Det är därför givet, att man vid fastställandet av fordringarna på betongkvalitet i olika länders normer, minsta tillåtna täckskikt, maximalt tillåtna sprickvidd, ingjutningsteknik m m, måste anpassa dessa till de förekommande miljötyperna. Här kan avsevärda skillnader förekomma mellan t ex täta industristråk vid Atlantkusten och glest industrialiserade orter i Sverige. På grund av korrosionsproblemens högst sammansatta natur med ett otal inverkande faktorer har man för närvarande ingen möjlighet att på teoretisk väg fastställa gränserna för det som ur korrosionssynpunkt är farligt och leder till skador, och det som är ofarligt.

För att lösa de byggnadstekniska frågorna måste man således gripa till erfarenhet i form av noggrann analys av kända skadefall, samt accelererade försök, där man genom användandet av extrema betingelser försöker få fram vilka faktorer som spelar den dominerande rollen. Genom att kombinera de resultat man kan få på detta sätt med allmänna korrosionsteoretiska värderingar, kan man få fram fullt godtagbara lösningar både ur byggnadsteknisk och ekonomisk synpunkt med avseende på problemen i samband med korrosion på stål ingjutet i betong.

## 1. Korrosionsproblemet i svensk betongpraktik

Som nämnts i inledningen är skadefallsutredningar en väsentlig faktor med avseende på att få fram data om de betingelser under vilka riskerna för korrosionsskador är betydande i betongkonstruktioner. F n pågår en internationell utredning av denna typ under ledning av en underkommitté i IABSE [x)], med medverkan av ett stort antal länder, däribland Sverige. Den svenska rapporten utarbetades efter en litteraturgenomgång samt en rundfråga med syfte att få fram uppgifter om kända korrosionsfall inom Sverige (Halvorsen/5). Litteraturgenomgången visade att frågorna om korrosion på ingjutet stål upptar en mycket begränsad del av svensk betonglitteratur från ungefär år 1915 fram till år 1962 (då rapporterna utarbetades), vilket tas som en första indikation på att antalet kända och utredda skadefall är mycket litet. Under åren 1916 - 1917 utförde Svensk Betongförening en omfattande utredning kring dessa frågor, och man angav ungefärliga rekommendationer för utförandet av ingjutningar för att säkra konstruktionerna mot korrosionsskador. Dessa rekommendationer är i de väsentligaste punkterna fullt överensstämmande med dagens rekommendationer.

---

x) International Association for Bridge and Structural Engineering.

Sedan början på 1950-talet fick emellertid frågan om korrosionsriskerna förnyat intresse i samband med högre utnyttjande av högvärdiga armeringsstål, användning av kloridhaltiga tillsatsmedel samt användning av uppvärmning av golv medelst ingjutna värmeslingor. I bilaga 1 visas en sammanfattning av huvudresultaten från kända utredningar av korrosionsskadefall i svensk betongpraktik. Insamlandet av data från dessa skadefall visade att antalet fall, där korrosion på ingjuten armering varit den primära skadeorsaken, är mycket ringa inom den konventionella delen av svensk betongpraktik. Vid de rapporterade fallen rör det sig om konstruktionsdelar belägna i speciellt korrosiv atmosfär, som t ex i olika typer av kemisk industri samtidigt som betongen ej gav tillräckligt skydd genom att den innehöll sprickor eller att täckskikten i det närmaste var obefintliga (1-5 mm).

Däremot har det under de senaste åren (1955-1965) dykt upp ett förhållandevis stort antal korrosionsskadefall i samband med värmeslingor ingjutna i bjälklagsbetong eller i slipbruk ovanpå bjälklagsbetongen, (Bergström och Lundström/12 och Halvorsen/13). Även i dessa fall har emellertid skadan i första hand orsakats av att man ej beaktat korrosionsriskerna och att utförandet varit undermåligt med avseende på korrosionsskydd.

Inverkan av kloridhaltiga tillsatsmedel på korrosionshastigheten och skaderiskerna har diskuterats mycket och gett anledning till flera undersökningar i form av både fältinventeringar och laboratorie- och fältprovningar (se t ex Bergström och Holst/8, Trudsö/14 och Halvorsen/15).

Det är en allmän uppfattning, att närvaro av kloridjoner i betongen ökar korrosionshastigheten och verkar nedbrytande på betongens korrosionsskyddande förmåga, men att kloriderna ej är den primära orsaken till uppkomsten av korrosion. Undersökningarna visar, att vid måttliga doseringar av tillsatserna ( < 2 % $CaCl_2$ av cementvikten) får man inga skador, om betongen i övrigt är utförd så att den skyddar mot korrosion. Detta beaktas bl a i de nya betongbestämmelserna (B5-1965/16), där tillsats av kloridhaltiga tillsatsmedel tillåtes under förutsättning att den totala kloridhalten i betongen ej överstiger 1,5 % räknat som vattenfri $CaCl_2$. Bestämmelserna säger dock, att "vederbörande

myndighets" tillstånd fordras i de fall riskerna för korrosion bedöms vara särskilt stora. Enligt betongbestämmelserna är detta i konstruktionsgrupperna a - c, där man tar hänsyn till hög fukthalt, förekomst av salter, ensidigt vattentryck och risk för frostskador. Utöver dessa konstruktionsgrupper gäller den angivna reservationen beträffande användandet av $CaCl_2$ även alla de andra fall, där man anser korrosionsfaran vara stor, och till denna grupp måste man bl a räkna ingjutna värmerör.

Sprickors inverkan på korrosionsriskerna är ofta omdiskuterad och osäkerheterna i samband med fastställandet av tillåtna sprickvidder är rätt stor, när det gäller korrosionsfrågorna. Det är emellertid ej troligt, att det finns något allmängiltigt samband mellan sprickvidd och korrosionsrisk, utan den omgivande miljön är avgörande för huruvida man överhuvudtaget kan tillåta sprickor och eventuellt för hur stora de får vara.

I det följande skall först ges några allmänna synpunkter på stål korrosion i betong med speciellt avseende på sprickors inverkan, varefter det skall redogöras för två undersökningar av korrosionsriskerna vid sprickor för två olika typer av betongkonstruktioner. Den första av dessa rör sig om risken för korrosion på armeringen i vattenbyggnadsbetong i samband med läckande sprickor och fogar. Denna undersökning har utförts som en fältinventering och bekostats av VAST x).
Den andra undersökningen avser korrosionsrisken för ingjutna värmeslingor vid sprickor i sliplaget och utförs som ett långtidsförsök vid Cement och Betonginstitutet i Stockholm. Denna undersökning bekostas av Skånska Cementgjuteriet AB, Stockholm.

---

x) Svenska Vattenkraftföreningens Stiftelse för Tekniskt Utvecklingsarbete.

# 2. Allmänna synpunkter på stål korrosion i betong

## 2.1 Korrosionsteori

Den teoretiska sidan av mekanismen vid korrosionen av stål ingjutet i betong har i förhållandevis stor omfattning behandlats i litteraturen. För grundligare studium kan bl a hänvisas till Sneck/17.

I syfte att ge en uppfattning om hur sprickor och fogar i betongen kan påverka korrosionsrisken för armeringen skall emellertid ges en kort översikt över grundmekanismen i stål korrosion och förutsättningarna för att korrosionen skall kunna äga rum.

Den korrosionstyp det gäller anses huvudsakligen vara en elektrokemisk process, där det bildas s k korrosionselement på stålytan, bestående av anod och katod, som antingen metalliskt eller elektrolytiskt är ledande förbundna. Den ström som ledes i sådana element uppstår genom en potentialdifferens mellan anod och katod, och potentialdifferens uppträder som följd av exempelvis:

- olika metallers potentialskillnad
- potentialskillnad mellan ytskikt (oxid) och grundmetall
- inhomogeniteter i metallen (legeringar o dyl)
- varierande koncentration, sammansättning och syrehalt i elektrolyten (skilda elektrolyter, luftningselement)
- vagabonderande strömmar

Potentialdifferenserna vid armeringsstålets yta är alltid tillräckliga för att korrosionselement skall kunna bildas, och man kommer att få korrosion, om övriga nödvändiga förutsättningar för att korrosionen skall kunna fortgå, är uppfyllda. Som elektrolyt fungerar i allmänhet vatten med eventuella lösta salter, och nedbrytningen av järnet sker i princip genom att järnjoner går i lösning vid anoden och förbinder sig i en sekundär reaktion med syre till rost. De resterande fria elektronerna vandrar till katoden, där de måste upptagas av en "elektronacceptor" för att icke korrosionen skall upphöra. I starka syror kan syrans fria väte - joner uppta elektronerna, medan i lösningar som icke innehåller tillräckligt med fria vätejoner

(pH > 4), alltså i de flesta fall som rör stål i betong, elektronerna upptas enligt följande schema:

$$4e + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4\ OH^-$$

och härtill fordras som synes tillgång till syre. Har man ingen "elektronacceptor" upphör korrosionen, och detta sker således i betong om man icke har tillräcklig tillgång på syre.

De nödvändiga förutsättningarna för att korrosion på stål skall kunna äga rum är således följande:

a) tillräcklig potentialdifferens mellan anod och katod i de bildade korrosionselementen,

b) elektrolyt med tillräcklig ledningsförmåga (eller direkt kontakt mellan olika metaller),

c) tillgång till syre som fungerar som "elektronacceptor",

d) ingen förekomst av skyddande skikt på stålytan.

## 2.2 Betongens inverkan

Hårdnad betong innehåller normalt en betydande mängd fri kalk ($Ca(OH)_2$) och detta gör att vatten i betong i allmänhet är mättat på kalk och har pH av storleken 12-13. I denna miljö bildas på stålytan ett s k passivskikt, som effektivt hindrar korrosion. I den mån betongen förmår skydda detta skikt och hindrar att ämnen, som kan förstöra det (t ex klorider) kan tränga in till stålet får man alltså icke korrosion på armeringen i betongen. Ytterligare verkar betongen skyddande, om den är så tät att den hindrar fukt- och framför allt syretillgång till stålet.

När får man då korrosion på armeringen, och vad är förutsättningarna för att korrosionshastigheten skall vara så stor, att man får allvarliga skaderisker i befintliga konstruktioner? Denna fråga kan för närvarande icke besvaras på rent teoretisk grundval, men möjligen genom fältförsök och fältobservationer med kartläggning och analys av betingelserna i de olika fallen.

För stål i betong har de viktigaste korrosionsbestämmande faktorerna schematiskt uppställts i tabell 1.

Tabell 1: Korrosionsbestämmande faktorer

| Huvudgrupp | Undergrupper |
|---|---|
| 1. Den yttre miljöns aggressivitet | Fukt, temperatur, syretillgång, föroreningar i atmosfären (klorider, koldioxid, svavel m m). Miljöväxlingar. |
| 2. Betongens kvalitet | Porositet, homogenitet, cementtyp, cementhalt. Tillsatser. |
| 3. Armeringens ingjutning | Täckskikt, förekomst av luftfickor som följd av dålig ingjutning. |
| 4. Olika metaller i kontakt. Vagabonderande strömmar. | Exempelvis kontakt mellan armering och värmerör, elledningar o dyl. |
| 5. Sprickor i betongen | Genomgående sprickor, ytsprickor. Sprickvidd vid ytan och vid armeringen. |

## 2.3 Sprickors inverkan

I dessa undersökningar är det effekten av sprickorna (och fogarna) som i första hand skall utredas. Det är givet att sprickor som har nått in till armeringen kommer att påverka förutsättningarna för korrosion i ogynnsam riktning. En sammanställning av tänkbara korrosionsbefrämjande verkningar hos sprickor ges i tabell 2.

Tabell 2: Sprickors inverkan på korrosionsrisken

| Orsak | Verkan |
|---|---|
| 1. Syre och fukt kan tränga in till stålet genom sprickor. | Ökad potentialdifferens vid stålytan som följd av varierande syrekoncentration i och vid sprickan. Tillgången på elektrolyt och "elektronacceptor" ökar. |
| 2. Genomströmmande vatten lakar ur betongens fria kalk. | Betongens pH reduceras och den passiverande verkan minskar. |
| 3. Kolsyra från luften eller vattnet tränger in till armeringen. | Betongen karbonatiseras in till armeringen och man får samma verkan som under punkt 2. |
| 4. Aggressiva ämnen kan lätt tränga in till stålet. | Betongens skyddande effekt kan förstöras. |

Det är således klart att sprickor i betongen totalt kan förstöra det korrosionsskydd ingjutet stål har, och i många fall kommer en koncentrerad frätning i och vid en spricka att snabbare ge allvarliga skador än en mera jämnt fördelad korrosion. Man kan emellertid f n ej förutse den samlade effekten av sprickorna, då även andra faktorer än de ovannämnda inverkar såsom självläkning av sprickorna, tätande effekt av utfällda karbonater, ny tillförsel av kalk från betongen intill sprickorna samt sambandet mellan sprickvidden och den yttre miljöns aggressivitet, inverkar.

## 3. Litteraturstudie betr sprickors inverkan på korrosionen

En stor del av den existerande litteraturen rörande korrosion på armering i betong diskuterar även frågor om sprickornas inverkan och vilka sprickvidder man ur korrosionssynpunkt bör kunna tillåta i armerade betongkonstruktioner. Tremper/18 redovisade år 1947 resultaten från en undersökning som omfattade betongkvalitet, armeringstyp och sprickvidd som undersökningsvariabler. Provkropparna lagrades utomhus i 10 år, innan de ingjutna stålen togs ut för bestämning av korrosionens omfattning. Provkropparna omfattade sprickor med vidd varierande från 0,13 mm - 1,3 mm (mätt på ytan), två typer armeringsstål, tre

olika vct samt dåligt och välgraderat ballastmaterial. Täckskiktens tjocklek var genomgående c:a 3 cm. Atmosfärens korrosivitet vid försöksområdet kan karakteriseras som medel, c:a 145 regndygn per år, inga industriföroreningar men möjligen någon närvaro av klorider, eftersom försöksområdet låg i närheten av havsvatten. Vid inspektionen av provkropparna fann man flera exempel på självläkning av de finare sprickorna, dessas ursprungliga vidd var 0,1 - 0,2 mm. På korroderade stål var angreppet koncentrerat till området i och vid sprickorna. Inspektionen omfattade mätning av korroderad yta samt mätning av korrosionsdjup. Man fann en signifikant ökning av den korroderade ytans storlek med ökande sprickvidd, men man fann ingen effekt av sprickvidden med avseende på maximalt korrosionsdjup.

Frätningsdjupet varierade mellan 0,03 mm och 0,4 mm.

Man fann i övrigt inga signifikanta effekter av övriga undersökningsvariabler. Korrosionsangreppet bedöms totalt vara av mycket ringa omfattning med hänsynstagande till den förhållandevis långa exponeringstiden på 10 år, och man drar slutsatsen att det under de vid försöket rådande eller motsvarande betingelserna ej finns allvarliga risker för omfattande korrosionsskador även vid större sprickor i betongen.

Vid ett RILEM-symposium "On Bond and Crack Formation in Reinforced Concrete", som hölls i Stockholm 1957, var sprickornas inverkan på korrosionsrisken en av huvudfrågorna, och generalrapporten av de Bruyn/19 kan anses representera en uppsummering av vad man då ansåg sig veta med avseende på denna fråga. (Sammanfattningen bygger på arbeten utförda av Brocard, Abeles, Engel, Friedland, Voellmy och de Bruyn). Det anges att man icke kan påräkna att rent allmänt komma fram till någon "kritisk sprickvidd", som kan representera den maximalt tillåtna, även om det från olika håll finns förslag på en sådan varierande mellan 0,1 och 0,7 mm med preferens till området 0,20 - 0,35 mm. Sprickviddangivelserna hänför sig normalt till sprickvidden vid betongytan, och miljön förutsättes vara tillräckligt aggressiv för att korrosion skall kunna

äga rum.

Risken för skadligt korrosionsangrepp anses emellertid bli påverkad av många andra faktorer i tillägg till sprickvidden, såsom betongens porositet, täckskiktets tjocklek och graden av aggressivitet i omgivande miljö.

De Bruyn anger dock att när man vid utförda fältinventeringar har satt sprickvidden i relation till korrosionens omfattning, har man fått en viss korrelation mellan dessa, så tillvida att korrosionens omfattning har ökat med ökande sprickvidd.

Voellmy/20 redovisar försök utförda över en 10-års period med prover utsatta för industriatmosfär (c:a ½ mg $SO_2/m^3$ luft) och betong med c:a 250 - 300 kg cement per m³ och täckskikten 2 - 3 cm tjocka. Försöken gav m a p sprickviddens inverkan följande resultat:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Sprickor upp till | 0,2 mm | - | Ingen korrosion |
| " " " | 0,2-0,5 mm | - | Fläckvis någon korrosion |
| " > | 0,5 mm | - | Större angrepp vid sprickorna |

Även Voellmy hävdar dock, att sprickvidden ej är avgörande för bedömning av korrosionsrisken, utan fordringarna på maximalt tillåten sprickvidd måste även anpassas till övriga faktorer som betongkvalitet, täckskiktstjocklek och miljöns aggressivitet. Denna uppfattning synes delad av samtliga vid Stockholmssymposiet.

Rehm och Moll/21 har utfört en undersökning av sprickviddens inverkan på korrosion på armering i betong förvarad i miljöer av olika korrosivitet. I slutrapporten inleds med en översikt över tidigare utförda försök av motsvarande art, och man sammanfattar dessa med att all erfarenhet visar, att korrosionsrisken ökar med förekomst av sprickor i betongen, men resultaten har varit mycket varierande och man kan ej på grundlag av tidigare försök och erfarenheter komma fram till någon "tillåten sprickvidd".

Förf:s egna försök omfattar betongbalkar med sprickor varierande mellan 0,1 - 0,8 mm och de förvarades i tre olika miljöer:

a) På ett tak i München

b) Vid ett kokeri i Ruhrområdet, där även utsatta för avgaser från ånglok

c) I tidvattenzonen vid Nordsjön.

Resultaten omfattar observationer efter 1 och 2 år och angivna sprickvidder avser mätning på betongytan. Täckskiktens tjocklek var 1,5 cm. Intressant är att man icke i några fall observerade ytskador och sprickbildning som följd av korrosionen på armeringen, även i de fall korrosionen var mycket omfattande med frätningsdjup intill 1 mm. Man fann vidare, att ökningen i korrosionens omfattning från första till andra årets inspektion var mycket liten. Betr sprickviddens inverkan fann man, att korrosionen ökade i intensitet och omfattning med ökande sprickvidd, dock utan att tendensen var entydig och genomgående. Största sprickvidd utan spår av rost varierade mellan 0,10 - 0,15 mm för samtliga lagringsorter. Även om de allvarligaste korrosionsangreppen ökade signifikant med ökande sprickvidd, fann man förekomst av allvarligaste korrosionsgrad (grad 3 enligt förf:s bedömningsskala) även vid de mindre sprickorna, 0,15 - 0,35 mm sprickvidd. Betydlig korrosion kan således förekomma efter kort tid även vid små sprickor, om miljön är tillräckligt aggressiv.

Abeles och Filipek/22 har studerat förekomst av korrosionsangrepp på stålet i förspända betongbalkar med ett antal mycket fina sprickor, maximal sprickvidd 0,1 mm. Balkarna förvarades i starkt förorenad industriatmosfär och täckskiktens tjocklek var c:a 12 mm. Man fann ingen tendens till korrosionsangrepp på armeringen och drar slutsatsen, att fina sprickor i förspända balkar ej ger orsak till korrosion på armeringen under förutsättning av tät och fullständig ingjutning och tillräckliga täckskikt. Sprickorna mättes på betongytan, och det är sannolikt att förspänningen i armeringen gör att sprickorna ej är tillräckligt öppna in till stålen för att skapa förutsättningar för korrosion.

Den studerade litteraturen över sprickviddens inverkan på korrosionen på ingjutna stål visar klart, att man ej kan värdera sprickviddens betydelse separat, utan eventuella fordringar på maximalt tillåtna sprickvidder måste bestämmas genom en samlad bedömning av medverkande faktorer såsom betongkvalitet, täckskiktstjocklek, konstruktionstyp och omgivande miljös korrosivitet. När förutsättningarna för att korrosion skall kunna äga rum är uppfyllda, ökar korrosionens omfattning med ökande sprickvidd, om man bedömer korrosionen genom uppmätning av korroderad yta. Däremot är det ej klarlagt, att maximala korrosionsdjupet vid angripna områden ökar med sprickvidden i samma grad. Djupa angrepp har redovisats även vid fina sprickor, när miljön har varit av tillräcklig korrosivitet. Vid värderingar av korrosionsangrepp i samband med utredningar och undersökningar är det ej tillräckligt att gradera angreppen efter korroderad yta eller viktförlust efter avrostning, utan en värdering på grundlag av maximala korrosionsdjup i enstaka frätgropar måste också göras. I vissa fall, som t ex i samband med ingjutna, vattenförande rörslingor, är koncentrerade punktangrepp avsevärt allvarligare än mera omfattande men jämnt fördelad ytkorrosion. För armering kan korrosionsgraden även värderas genom användning av dragprovning på korroderade och icke-korroderade delar av de uttagna järnen. Denna metod har provats av Trudsö/14.

## 4. Korrosion vid sprickor i vattenbyggnadsbetong

### 4.1 Orientering

Inspektioner av tillståndet vid svenska vattenbyggnadskonstruktioner visar att läckande sprickor och fogar utgör en betydande del av de förekommande betongskadorna. I VAST:s rapport "Sprickor och frostskador i vattenbyggnadsbetong"/23, diskuteras bl a de tänkbara riskerna för fortsatt skadeutveckling i samband med sprickorna och en av de eventuella olägenheterna, som anges, är korrosionsangrepp på armeringsjärn som ligger intill eller korsar de läckande sprickorna och fogarna. Man hade vid de rapporterade besiktningarna observerat riklig förekomst av

rostmissfärgning vid flera av sprickorna på nedströmssidan, vilket indikerar att korrosion förekommit. Det ansågs därför nödvändigt, att närmare undersöka huruvida allvarliga angrepp hade skett eller kunde väntas. Då man genom teoretiska överläggningar och litteraturstudier ej kunde värdera riskerna med önskad säkerhet, valde man att utföra en undersökning i form av en fältinspektion av nyare och äldre anläggningar med avseende på förekomst av rostskador.

## 4.2 Utförandet av undersökningen

Undersökningen omfattar 11 anläggningar med ålder varierande mellan 10 och 55 år. 7 av anläggningarna ligger i mellersta Sverige och 4 i södra Sverige. Belägenheten visas på fig 1. Vid inspektionerna har man sökt ut de delar av anläggningarna, där riskerna för korrosionsskador ansågs vara störst och här frilades armeringen vid sprickorna. De flesta observationerna har gjorts på luftsidans armering, men även vattensidans armering har inspekterats vid flera anläggningar. Sprickvidderna kunde som följd av föroreningar i ytorna ej mätas. Vid värderingen av armeringens rostgrad fann man IVA:s korrosionsskala[x)] ej vara lämplig för värdering av den koncentrerade form av korrosion man får på armeringen i sprickor och fogar, varför följande skala tillämpades:

0. Inga angrepp
1. Obetydliga, ytliga angrepp
2. Stora delar av ytan brunfärgad av rost
3. Som 2, med enstaka punktangrepp/bladrost
4. Rikligt förekommande punktangrepp/bladrost
5. Märkbar tvärsnittsminskning (frätningsdjupet anges).

Vid övriga bedömningar på de olika mätställena har följande skalor använts:

Läckning

1. Någon fukt observerad
2. Tydlig fuktning av ytan närmast sprickan
3. Större "gardiner" av fukt
4. Hela ytan under sprickan våt
5. Rinnande eller droppande vatten.

x) Ingeniörsvetenskapsakademiens Korrosionsnämnd: Skala för målningsvärdet hos rostskyddsfärger. Stockholm 1961.

Kalkutfällning

1. Antydan till kalkutfällning
2. Sammanhängande kalkutfällning i och närmast under sprickan
3. "Gardiner" av kalk under sprickan
4. Större partier med tjocka lager av kalk
5. Hela ytan under sprickan täckt av tjocka kalkavlagringar.

Rostutfällning (rostfärgning av betongytan)

1. Antydan till brunfärgning
2. Brunfärgning utefter hela sprickan
3. " av vissa "gardiner"
4. " av större partier
5. Påfallande stora och tjocka rostbeläggningar.

Sedan observationsställen utvalts bestämdes järnens läge och riktning med hjälp av täckskiktsmätare. På ett par undantag när kunde järnen exakt lokaliseras med mätaren. Efter protokollföring av data rörande ytans utseende frilades järnen för inspektion. Prov av betongen i täckskiktet över armeringen uttogs för eventuella suppleranade analyser.

## 4.3. Inspektionsresultat och slutsatser

Inspektionsresultaten från de olika anläggningarna är sammanställda i bilaga 2 och i figurerna 2-19 visas exempel på typiska observationsställen och resultat. En sammanfattande översikt över data för de inspekterade anläggningarna och huvudtendenserna i observationerna ges i bilaga 3. Som framgår av sammanställningen har man icke på någon av de besökta anläggningarna, vilka i ålder varierar mellan 10 och 55 år, hittat några betydande rostskador på ingjutna järn. De rostangrepp som iakttogs var koncentrerade till fritt exponerade järn (täckskikt < 10 mm, gjutsår, öppna fogar o dyl) samt till sprickornas och fogarnas omedelbara närhet med maximalt angrepp i själva sprickan/fogen och avtonande angrepp utifrån denna på en bredd av 2 - 5 cm.

Trots att man vid varje anläggning sökte ut de delar av konstruktionerna, där risken för korrosionsskador ansågs vara störst, kunde man ej påvisa att sprickorna och fogarna orsakat farliga korrosionsskador. Den yttre miljön i det undersökta området bedöms dock vara av låg korrosivitet (låg årsmedeltemperatur och ringa förekomst av korrosionsaccelererande föroreningar som klorider, svavelgaser o dyl), och slutsatserna begränsas därför till att endast gälla konstruktioner i miljöer med motsvarande korrosivitet. Exempel på klimatets inflytande på korrosionen visas i tabell 3 nedan och fig 20 (enligt Trägårdh/24).

Tabell 3

| Ort | Klimat | Korrosion g/m² år | Korrosion µ/år |
|---|---|---|---|
| Gällivare | Inland, subarktiskt | 13 | 1.7 |
| Lovön | " , tempererat | 36 | 4.6 |
| Flahult | " , " | 37 | 4.7 |
| Hisingen | " , västkust, tempererat | 62 | 7.9 |
| Stockholm | " , industri, " | 80 | 10.2 |
| Grönskär | Havs- , ostkust, " | 90 | 11.6 |
| Smögen | " , västkust, " | 103 | 13.2 |
| Göteborg | Inland, industri, " | 113 | 14.5 |
| Sheffield, England | " , storindustri, " | 840 | 107.8 |

Det undersökta områdets klimat motsvarar närmast inland, tempererat, och i någon mån även inland, subarktiskt.

Undersökningen visar att man vid de inspekterade anläggningarna ej fått några betydande skador i form av korrosion på armeringen vid läckande sprickor och fogar på konstruktionernas luftsida. Miljöns korrosivitet är dock så hög att ståldetaljer som exponerats fritt uppvisar betydande korrosion. I den mån man har kunnat inspektera vattensidans armering har man även här fått samma resultat. Observationerna från vattensidan omfattar ej så många typiska sprickor och fogar, eftersom dessa i regel

är belägna relativt långt under vattenlinjen, vilket försvårar inspektionen. Med avseende på korrosionsrisken är detta emellertid en fördel, eftersom syretillgången vid sprickor som konstant - eller till större delen av året - ligger under vatten är mycket begränsad.

Den största gruppen av undersökta anläggningar var mer än 20 år gamla vid inspektionen, och endast två anläggningar var från tiden efter 1950. Vid de äldre anläggningarna var cementhalten något högre och även täckskikten tjockare än vid senare uppförda anläggningar, vilket skulle betyda att korrosionsrisken är större vid de mera moderna konstruktionerna. Undersökningen omfattar emellertid flera observationsställen där täckskikten av olika anledningar blivit tunnare än avsett, och där betongen varit porös och urlakad, utan att detta resulterat i skador på armeringen. En slutlig värdering av undersökningsresultatet ger således att man ej har hittat något stöd för att läckande fogar och sprickor medför någon risk för allvarliga korrosionsskador på armeringen i svenska vattenbyggnadskonstruktioner. De undersökta anläggningarna omfattar något varierande miljöer och anses representera miljöer som är typiska för svenska vattenbyggnader, men omfattar inga konstruktioner i mera korrosiv industrimiljö.

Denna undersökning ingår som ett led i VAST:s utredning av skador i vattenbyggnadsbetong och dess syfte har varit, att klarlägga huruvida sprickor och otäta fogar medför korrosionsskador av betydelse på armeringen i dessa konstruktioner. Undersökningen visar entydigt att så ej är fallet, och då man likaledes ej kan hitta något tidigare rapporterat fall av betydande korrosionsskada på armeringen inom svensk vattenbyggnadsbetong, kan man dra den slutsatsen, att korrosion på armeringen i dessa sammanhang f n icke representerar något allvarligt problem.

# 5. Sprickors inverkan på korrosion av värmerör ingjutna i slipbruk

## 5.1 Orientering

Vid ingjutning av värmerör i bjälklagsbetong, eller vanligare i slipbruk ovanpå bjälklagsbetongen, har man vid ett antal tillfällen konstaterat korrosionsskador på rören. Orsakerna kan ha varit dålig kringgjutning av rören, porös, otät betong, otillräckligt täckskikt, skadlig inverkan av kloridhaltiga tillsatsmedel eller sprickor i betongen. Skadorna har i vissa fall upptäckts efter kort tid (mindre än 1 år) och i andra fall har det gått längre tid (4 - 5 år) förrän skadan varit så stor, att den upptäckts genom att läckage uppstått på värmesystemet. Vid tidigare undersökningar och skadeutredningar vid Cement- och Betonginstitutets kontaktavdelning /12 och 13/ har vikten av att rören är fullständigt ingjutna i en tät, väl gjutbar betong påvisats. Vid den första av dessa två undersökningar påvisades även att i de fall, där förutsättningarna för att korrosion skulle kunna äga rum förelåg accelererades angreppet av tillsats av kalciumklorid. Kalciumklorid ansågs emellertid ej vara primär korrosionsskapande faktor, men man rekommenderade att användning av kalciumklorid begränsades till endast cementrika bruk med god gjutbarhet och dosering max 1 % av cementvikten.

I denna undersökning studeras dels sprickors och sprickviddens inverkan på korrosionen, dels effekten av olika arbetsförfaranden vid ingjutningen samt tillsats av kalciumklorid under de studerade betingelserna. Exponeringen av provkropparna påbörjades den 1.8.61 och försöksresultaten hittills omfattar inspektion av extraprovkroppar för fastställande av lämplig tidpunkt för huvudinspektion samt huvudinspektion av en fullständig provserie efter $2^2/3$ års exponering. Enligt det ursprungliga programmet avsåg man att utföra huvudinspektionerna med ½ och 1 års intervall, men inspektionerna av extraprovkropparna indikerade, att angreppstakten var så långsam att man beslöt att uppskjuta de mera omfattande inspektionerna till dess man kunde vänta mera utslagsgivande resultat.

## 5.2 Program för undersökningen

Undersökningens program framgår av uppställningen i tabell 4.

Tabell 4

| Serie | Slipbrukets cementhalt kg/ $m^3$ | Sprickvidd mm | Täckskikt cm | Lagringsmetod | Antal observationer | Antal provkroppar | Anmärkn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 350 | 0 0,1 0,25 0,5 1,0 1,5 | 3 | a + b | 3 | 36 | |
| B | 250 | 0 0,5 1,5 | 3 | a + b | 2 | 12 | |
| C | 450 | 0 0,5 1,5 | 3 | a + b | 2 | 12 | |
| D | 350 | 0 0,5 1,5 | 3 | a | 2 | 6 | 2 % $CaCl_2$ |
| F | 450 | 0 0,5 1,5 | 3 | a | 2 | 6 | Vibrering |
| G | 350 | 0 0,5 1,5 | 1 & 5 | a | 2 | 12 | |
| H | 350 | 0 0,5 1,5 | 1 | a | 2 | 6 | Distansklotsar |

Lagringsmetoder

Lagringsmetod a har under tiden 1.8.61 - 15.6.62 (10½ mån) varit i fuktrum (c:a 95 % relativ fukthalt) vid + 20°C. Under tiden från 15.6.62 fram till inspektionen och vid den fortsatta lagringen har dessa provkroppar genomgått cykler av fuktning/torkning med två cykler per vecka. En veckas lagring består således av 1 dygn i vatten (20°C ± 2°), 2 dygn i luft och 1 dygn i vatten, 3 dygn i luft. Orsaken till att man ändrade lagringsbetingelserna för dessa provkroppar var, att man vid inspektion av fuktrumslagrade provkroppar efter c:a 10 månader fann att ingen korrosion

hade ägt rum på röret även vid sprickvidden c:a 1,5 mm. Sprickorna stod vattenfyllda och eftersom det icke var någon omsättning på vattnet i sprickorna blev vattnet kalkmättat, pH c:a 12, och syratillgången hindrades av vattnet i sprickorna, varför denna lagringsmetod ej gav betingelser under vilka korrosion kunde äga rum.
Cykler av fuktning och torkning valdes därför för att accelerera angreppet. Denna typ av exponering är även mera sannolik vid praktiska fall av sprickor i golvbetong med ingjutna stålslingor. Vid tidpunkten för inspektionen av en fullständig serie den 17.3.64 hade dessa provkroppar således lagrats 10½ månad i fuktrum och 90 veckor cykler fuktning/torkning. Av olika anledningar har emellertid fuktcyklerna avbrutits under c:a 10 veckor, varför provkropparna vid inspektionen hade genomgått c:a 160 fuktnings/torkningscykler.

Lagringsmetod b har under hela tiden från den 1.8.61 varit utomhus på CBI:s tak, Stockholm.

I anslutning till tabell 5 kan följande anföras betr de olika serierna:

Serie A, B, C och F avser att ge information betr sprickviddens inverkan under olika förhållanden och vid varierande brukskvalitet och olika gjutningsmetoder.

Serie D skall i jämförelse med t ex serie A visa inverkan av tillsats av $CaCl_2$ i tillåten dosering, medan serie G och H avser att informera betr inverkan av omsorgsfull ingjutning runt rören. (Serie H har distansklotsar som säkrar fullständig ingjutning även på rörens undersida, medan man i serie G ej vidtog några åtgärder för att hindra fickbildning på rörens undersida.)

## 5.3 Material

Vid försöken används i möjligaste mån material av samma typ som de uppdragsgivaren använde vid de byggen, där ingjutningen av värmerör utfördes och där sprickbildning i slipbruket hade föranlett igångsättandet av denna undersökning. Uppdragsgivaren önskade således att försöken

även skulle ge orientering om riskerna för att korrosionsskador skulle uppträda vid dessa utförda byggen.

Cement. Vid gjutningarna användes cement av typ "Gullhögen standard". En begränsad kemisk analys av detta är sammanställd i tabell 5 nedan.

Tabell 5: Analys på det använda cementet

| Ämne | Halt | Tillåtet enl cementbest 1961 |
|---|---|---|
| Sulfat $SO_3$ | 3,3 | Max 3,5 % |
| Magnesiumoxid MgO | 1,6 | Max 5 % |
| Klorid Cl (som $CaCl_2$) | 0,04 (0,06) | Max 1 % (som $CaCl_2$) |
| Slagg | 1 | Max 10 % |

Ballast. Bjälklagsbetong och golvbruk levererades till arbetsplatsen från betongfabrik. Från betongleverantören inhämtades uppgifter betr proportionering och ballastgradering, varefter material av CBI:s lager gavs samma sammansättning som det använda materialet. Siktkurvorna framgår av bilaga 4.

Vatten. Ledningsvatten ur Stockholmsvattenledningsnät användes vid gjutningarna (som på arbetsplatsen).

Värmerör. De ingjutna rören är 1/2", sömlösa, bruna rör, utförda av material enligt SMS 326 (DIN 2440 U), godstjocklek 2,75 mm. Riktanalys på rören (enligt fabriken):

Tabell 6

| Ämne | C | Si | Mn | P | S |
|---|---|---|---|---|---|
| Halt % | 0,12 | 0,12 | 0,5 | 0,04 | 0,004 |

Rören är av samma typ som används för sådana ingjutningar och levererades direkt från fabrik. Man kunde ej använda rör, som lagrats på byggplatsen, då man av hänsyn till värderingen av försöksresultaten måste använda icke ros-

tiga rör vid tillverkningen av provkropparna. En avrostning av rören före ingjutningen bedömdes medföra risk för större ändring i rörens ytegenskaper i förhållande till de rör som använts på bygget, än den ändring användandet av rör direkt från fabriken kan medföra. Ur teoretisk synpunkt skulle en nedsvarvning på c:a 1 mm av rörens ytskikt före ingjutningen vara att föredra, men man avstod från detta, eftersom man därvid kommer att avlägsna sig mera från de aktuella förhållandena på byggnadplatsen.

## 5.4 Tillverkning av provkroppar

Det tillverkades en provkropp för varje kombination av variabler och för varje observationstillfälle. Provkroppstyp är 10x10x80 cm balkar, som göts i två omgångar. Undre delen av balken, som motsvarar bjälklagsbetongen, göts av betong K250, konsistens trögflytande, blandningsförhållande 1:4,20:3,44 och var lika för samtliga provkroppar. Denna del av balken är armerad med 2 st Ø 8 mm, på dessa är fastsvetsade 6 st Ø 6 mm stålbitar, som sticker upp i det överliggande slipbruket. Detta är för att motverka skjuvbrott mellan de två lagen vid den senare böjningen av balken till önskad sprickvidd. Slipbrukssammansättningen varierades enligt programmet i tabell 4 och gjutningsdata för de olika serierna framgår av tabell 7.

Tabell 7

| Serie | Bruk | | vct | cm sättmått | Anmärkn |
|---|---|---|---|---|---|
| | C:a cem.halt kg/m³ | Blandn-förh | | | |
| A | -350 | 1:4,7 | 0,67 | 10 | |
| B | -250 | 1:6,5 | 0,84 | 9 | |
| C | -450 | 1:3,6 | 0,50 | 10 | |
| D | -350 | 1:4,7 | 0,65 | 10 | 2% $CaCl_2$ (teknisk vara c:a 75% vattenfri $CaCl_2$) |
| F | -450 | 1:3,6 | 0,53 | 7 | Vibrerats i formen |
| G | -350 | 1:4,7 | 0,67 | 10 | Täckskikt 1 o. 5 cm |
| H | -350 | 1:4,7 | 0,70 | 8 | Distansklotsar |
| X | -350 | 1:4,7 | 0,70 | 10 | Extraserie för observation utom ord. observ.tider |

Av praktiska skäl företogs gjutningarna med fuktigt grus och vattentillsatsen bestämdes av önskad konsistens, c:a 10 cm sättmått (med undantag av serie F, som skulle vibreras i formen och därför gjordes något styvare).

Vct varierar mellan 0,50 (för C-450) och 0,84 (för C-250).

Rören kapades i längder om 75 cm, rörändarna tätades med gummiproppar, och olja (Esso QD) som var påstruken som rostskydd under transporten, tvättades bort i två bad kristallolja efter att rostfläckar var bortputsade med smärgelpapper. Rören märktes och vägdes omedelbart före ingjutningen, avläsningsnoggrannhet 2/100 gram.

Rören ingöts i slipbruket c:a fem timmar efter gjutningen av "bjälklaget". Före pågjutningen borstades "laitance-hud" bort för att vidhäftningen skulle bli god. Vidhäftningen mellan slipbruk och bjälklag är således troligen bättre än den som kan påräknas i praktiken, men av provningstekniska skäl fordras en god vidhäftning mellan de två skikten vid framställningen av provkropparna. Mitt på varje balk ingöts en 0,5 mm tjock sprickanvisning till c:a 5 mm djup. Slipbruket handbearbetades i formen med murslev och balkarna gavs dessutom några stötar mot golvet för att bruket skulle flyta ut mot formsidorna. Balkarna böjdes till initiell spricka i institutets böjprovningspress efter 18-20 timmars lagring i laboratorieluft, varefter de överflyttades till en uppspänningsbänk, där de olika sprickvidderna finjusterades. Balkarna fastlåstes med önskad sprickvidd genom att balksidorna belades med glasfiberarmerad epoxiplast, som efter att ha hårdnat hindrade rörelser i balken. Sedan sprickorna fastlåsts belades samtliga balkytor - frånsett balkarnas <u>överyta</u> - med epoxiplast, så att fukt- och luftinträngning endast sker från överytan. Sedan balkarna plastbelagts lagrades de i laboratorieluft till dess att samtliga provkroppar var klara. Därefter fördelades balkarna efter programmet med 60 balkar enligt lagringsmetod a och 30 balkar enligt metod b (se punkt 5.2), samt 6 extrabalkar i varje lagringsställe.

## 5.5 Inspektion av provkropparna

### 5.5.1 Värderingsmetod vid inspektionerna

Vid inspektionerna av provkropparna användes följande metodik:

1. Rengöring av balkarna och mätning av sprickvidden vid överytan med sprickmikroskop.

2. Värdering av balkarnas yttre tillstånd innan rören togs ur. Härvid observerades eventuell förekomst av ytfrätning, spår av rost i och vid sprickorna, nya sprickor o dyl.

3. Uppdelning av balkarna genom lossmejsling av slipskiktet. Härvid kunde sprickvidden vid rörens undersida mätas.

4. Ingjutningen värderades, förekomst av fickbildning och porer längs rörets undersida antecknades.

5. Vid urtagningen av rören mättes täckskiktets tjocklek, och betongens karbonatisering från ytan och ned i sprickorna värderades genom användning av indikatorvätska (fenolftaleinlösning).

6. Ingjutningsbruket i balkarna med tillsatsmedel analyserades m a p halt kalciumklorid, och brukets porositet bestämdes för de olika serierna.

7. Rören värderades m a p korrosionens omfattning i och vid sprickorna samt längs rörens undersida vid luftfickor och håligheter i ingjutningsbruket. Vid värderingen användes bedömningsskalan enligt tabell 8 samt uppmätning av korroderad yta med beräkning av den korroderade ytans fördelning på olika korrosionsgrader.

Tabell 8

| Rostgrad | Observerad utbredning av rostangrepp |
|---|---|
| 0 | Inga rostangrepp |
| (0 - 1) | |
| 1 | Obetydliga ytliga rostfläckar |
| (1 - 2) | |
| 2 | Stora delar av ytan brunfärgad av rost |
| (2 - 3) | |
| 3 | Som 2, med enstaka punktangrepp/bladrost |
| (3 - 4) | |
| 4 | Rikligt förekommande punktangrepp/bladrost |
| (4 - 5) | |
| 5 | Mätbar tvärsnittsminskning/gropfrätning |

8. Rören vägdes, avrostades och vägdes igen för bestämning av viktförlust. Vid avrostningen användes avrostningsvätska efter följande recept: 10,0 g vardera av paratoluidin och hexametylentetramin nedföres i en 2000 ml mätkolv. Vid rumstemperatur tillsättes 100 ml (4,8N) teknisk saltsyra. Blandningen får stå tills en fällning har bildats. Därefter tillsättes 100 ml destillerat vatten samt tillräcklig mängd teknisk koncentrerad saltsyra för att få lösningen 4,8N (c:a 16 volymprocent). Lösningen blandas väl och kyles till rumstemperatur, varefter destillerat vatten påfylles till 2000 ml total volym.

   Stängerna får ligga kvar i badet tills all rost upplösts.

9. Djupet av korrosionsskadorna (gropdjup i frätgroparna) bestämdes genom användning av optisk mätmetod.

### 5.5.2 Orienterande inspektion

Extraprovkropparna hade som tidigare nämnts tillverkats för fastställande av lämplig tidpunkt för huvudinspektionen. Dessa balkar hade samma brukssammansättning som t ex serie A och sprickvidderna var c:a 1,0 mm och 1,5 mm. Sex stycken lagrades inomhus (lagringsmetod a fuktrum och sedan fukt/tork-cykler) och de övriga sex utomhus (lagringsmetod b).

Extrabalkarna inspekterades första gången efter 4 månaders exponering, varvid man observerade, att fuktrumslagrade balkar visade spår av rost, medan utomhuslagrade balkar visade begynnande rostangrepp omedelbart vid sprickorna på rörets översida.

Vid den andra inspektionen av extrabalkar, efter $9^1/2$ månaders exponering, fann man för fuktrumslagrade balkar vid max sprickvidd 1,5 mm, någon ytrost (rostgrad 1 - 2) vid sprickan till en bredd av c:a 2 cm på rörets översida. I övrigt var röret blankt och utan spår av rost. En utomhuslagrad balk visade ungefär samma utbredning av rosten vid sprickan (bredd c:a 2 cm) på rörets översida, men korrosionsgraden bedömdes till något starkare angrepp omedelbart i sprickan (grad 3-4).

Vid den tredje inspektionen av extrabalkar, efter 13 månaders exponering, hade fuktrumslagringen ändrats som tidigare nämnts till cykler av fuktning och torkning. Röret från den inomhuslagrade balken visade ett rostangrepp vid sprickan på rörets översida till en bredd av c:a 2 cm som vid senaste inspektionen, men graden bedömdes nu till 3-4 och rostgrad 4-5 omedelbart i sprickan. Den utomhuslagrade balken visade denna gång samma omfattning av korrosionen som den inomhuslagrade. Efter ytterligare 10 månaders exponering inspekterades extrabalkarna för fjärde gången. Resultaten var som tidigare att röret i balken som lagrats under cykler fuktning/torkning (inomhuslagring) var korroderat omedelbart vid sprickan (1,0 mm sprickvidd) till en bredd av c:a 1,5 cm. Korrosionsgraden varierade mellan 2 och 4, medan röret från den utomhuslagrade balken, samma sprickvidd, visade något större omfattning av korrosionsangreppet, bredd c:a 4 cm och enstaka punkter med rostgrad 4-5. Korrosionen var som tidigare koncentrerad till sprickan och på rörets översida. Fortfarande bedömdes korrosionen vara av så ringa omfattning, att man skulle vänta ytterligare någon tid innan huvudinspektion av en fullständig omgång rör gjordes.

En sammanfattande värdering av resultaten från inspektionerna av extrabalkar gav följande tendenser efter c:a 22 månaders exponering (gäller betong utan tillsats av $CaCl_2$ och cementhalt c:a 350 kg/$m^3$, d v s "normalt slipbruk").

1. Provkropparna visar inga yttre tecken (ytterligare sprickbildning avsprängda skikt o dyl) till skador orsakade av korrosion på rören.

2. De inspekterade balkarna visar att korrosionen är koncentrerad till rörens översida, omedelbart i och vid sprickorna.

3. Utbredningen av korrosionen är störst för den största sprickvidden.

4. Inga omfattande gropfrätningar har observerats.

5. Vid prov av karbonatiseringens inträngning från betongens överyta och även ned i sprickorna fann man, att från överytan var ett skikt av tjockleken 5-8 mm karbonatiserat samt att karbonatiseringen även trängt ned i sprickan till rörets överyta. Karbonatiseringsdjupet i sprickväggen var mindre än 1 mm.
(Anm: Karbonatisering av betongen sker genom att kolsyra ($CO_2$) från luften reagerar med kalkhydrat ($Ca(OH)_2$) från cementet och bildar kalciumkarbonat ($CaCO_3$). Härigenom reduceras betongens alkalitet från pH $\sim$12 ned mot pH c:a 7-8, vilket gör att stålet kan förlora det korrosionshämmande alkaliska skydd betong i allmänhet ger).

### 5.5.3 Inspektion av första fullständiga omgången rör

Balkarna för denna inspektion togs ur försöken den 17.3.64, således efter c:a 2 år $7^1/2$ månads exponering.

1. Ytgranskning av provkropparna
Efter rengöringen av balkarna konstaterades att man icke på några balkar kunde spåra yttre tecken på skador orsakade av korrosion på rören. Ej heller kunde man se rostutfällning eller rostfärgning på balkytorna. Provkropparna var samtliga fullt intakta. Någon ytfrätning och avnötning av ytskiktet hade skett. Detta gällde speciellt balkarna med låg cementhalt (250 kg/$m^3$) och var obetydligt på de med hög cementhalt (450 kg/$m^3$). Vidare fann man att plastförseglingen av balkarna var utan anmärkning samt att metoden att låsa sprickorna till önskad vidd med glasfiberarmerat epoxibandage på balksidorna hade fungerat tillfredsställande. Sprickvidderna befanns vid kontrollmätningarna vara - med ett par undantag - desamma som vid försökens igångsättande. Sprickorna var i någon mån förorenade med sand och smutspartiklar, men inga sprickor var fullständigt igentätade och ej heller kunde man se tecken till självläkning av några sprickor.

2. Kontroll av ingjutningen och ingjutningsskiktet (slipskiktet)

Efter spjälkning av balkarna (slipskiktet mejslades loss från undre balkhalvan) kunde ingjutningen av rören längs rörens undersida inspekteras. Härvid kunde även sprickvidden vid rörens undersida och täckskiktet över rören kontrollmätas. För de olika serierna gjordes följande observationer:

Utomhuslagrade bjälkar (lagring b):
Serie A, B och C visade fuktinträngning genom sprickorna och fuktinträngningen ökade med ökande sprickvidd och avtagande cementhalt i slipbruket. Täckskiktet för dessa balkar skulle enligt programmet vara 3 cm och kontrollmätningen visade, att täckskiktet varierade mellan 2,6 cm och 3,0 cm (medelv 2,8 cm). Sprickvidden vid rörens undersida varierade mellan $^1/2$ - $^1/3$ av vidden vid balkens överyta. Ingjutningen av rören var god, dock förekom enstaka större porer mot rören (diam c:a 4-5 mm). Vid dessa porer var rören lätt rostiga (rostgrad 1-2).

Fuktnings- och torknings-cykel-lagrade balkar (lagring a):

Även dessa balkar visade samma allmänna tendens till fuktinträngning och spridning av fukten genom sprickorna. Sprickorna har således samtliga varit öppna och möjliggjort korrosion på rören. I övrigt var ingjutning m m något olika för de olika serierna.

Serie A. Ingjutning i stort utan anmärkning. Vid enstaka mindre porer mot rören sågs tendens till rost (rostgrad 0-1). Täckskiktet varierade mellan 2,5 och 3,0 cm. Sprickvidd vid rörets undre del $^1/2$ - $^1/3$ av vidden vid överytan av balken.

Serie B. Betongen verkade något porös och lös, men i övrigt var resultatet detsamma som för serie A.

Serie C. Som serie A.

Serie D. Ingjutning i stort utan anmärkning (dock förekomst av enstaka luftporer mot rören. Vid dessa porer fanns kraftiga punktangrepp. Rören i övrigt utan rost på undersidan. Sprickvidd och täckskikt som för serie A.

Serie F. Ingjutningen utan anmärkning. Sprickvidd och täckskikt som för serie A.

Serie G. (Två serier 1 och 5 cm täckskikt). Vid dessa serier var bearbetningen avsiktligt utförd något sämre än i övriga serier. Rören hade långa luftfickor mot underlaget och var kraftigt korroderade i dessa fickor med utgångspunkt vid sprickorna (rostgrad 4-5). Täckskiktet varierade mellan 1,1 och 1,3 cm samt 3,7 och 4.4 cm. Sprickvidden vid rörets undre del var för serien med c:a 1 cm täckskikt $^1/2$ - $^2/3$ av vidden vid balkarnas överyta och för de med c:a 4 cm täckskikt c:a $^1/3$ av vidden vid ytan.

Serie H. Rören var vid ingjutningen uppallade på distansklotsar och ingjutningen var således fullständig. Täckskikten var c:a 1,1 - 1,3 cm.

De olika ingjutningsskiktens porositet bestämdes vid Statens Provningsanstalt och resultaten har sammanställts i tabell 9.

Tabell 9

| Serie | Cementhalt kg/m$^3$ | Porositet vol % | Anm |
|---|---|---|---|
| A | 350 | 20,0 | Varje värde är medelv av två bestämningar. |
| B | 250 | 22,0 | |
| C | 450 | 18,8 | |
| D | 350 | 19,9 | |
| F | 450 | - | |
| G | 350 | 19,9 | |
| H | 350 | 19,9 | |

Avgörande för det hårdnade brukets porositet är dels det använda vattencementtalet ($\frac{W}{C}$) och brukets hydratationsgrad uttryckt vid $W_n/C$ ($W_n$ är mängden icke-förångningsbart vatten vid den erhållna härdningsgraden), dels det färska brukets lufthalt $L_o$. Brukets porositet kan således uppskattas enligt följande:

$$P = C\left(\frac{W}{C} - \frac{W_n}{C}\right) + L_o$$

där:

$P$ = Porositet (ℓ/m$^3$)

$W$ = Total använd vattenhalt (kg)

$W_n$ = Icke förångningsbart vatten (i kg)

$C$ = Använd cementhalt (kg)

$L_o$ = Det färska brukets lufthalt

Vid denna uppskattning gör man en förenkling av problemet genom att inte ta hänsyn till den inre och yttre krympning som sker i samband med cementets reaktion med vatten och uttorkningen av betongen. Volymen av det kemiskt bundna vattnet, $W_n$, reduceras således med c:a 25 % i samband med bindningen till cementet, vilket ger porer i cementgelen. Denna effekt motverkas i viss mån av den yttre volymminskningen av bruket under uttorkningen. Totalt kan dessa effekter försummas i det aktuella sammanhanget.

Under gjutningarna mättes icke det färska brukets lufthalt eller dess volymvikt, varför man icke har några kända värden för $L_o$. En bedömning av $L_o$'s storlek och kontroll på att de uppmätta porositetsvärdena är rimliga kan man emellertid få, om man gör en uppskattning av hydratationsgraden $\frac{W_n}{C}$. Antas denna vara $\frac{W_n}{C} \sim 0{,}20$ får man:

Serie A: $P = 20 = 350\ (0{,}67 - 0{,}20) + L_o$

$$L_o \sim \underline{3{,}5\ \%}.$$

Serie B: $P = 22 = 250\ (0{,}84 - 0{,}20) + L_o$

$$L_o \sim \underline{6{,}0\ \%}.$$

Serie C: $P = 18{,}8 = 450\ (0{,}50 - 0{,}20) + L_o$

$$L_o \sim \underline{5{,}3\ \%}.$$

$L_o$ varierar mellan c:a 3-6 % och detta kan anses normalt för bruk med max stenstorlek 8 mm. Den höga lufthalten för det magraste bruket kan rimligen förklaras genom att man fått underskott på finmaterial och "kärvt", svårarbetat bruk, medan den höga lufthalten hos det feta bruket anses bero på, att det använda cementet har en viss luftporbildande effekt, som kommer starkast till uttryck vid högre cementhalt. En närmare utredning av dessa förhållanden ligger emellertid utanför ramen för denna undersökning.

Serie D hade vid gjutningen tillsatts 2 % $CaCl_2$ (75 %-ig teknisk vara) av cementvikten. För att kontrollera klo-

ridhalten i detta bruksskikt utfördes analys med avseende på halt Cl i prov av skikt D och som kontrollprov skikt A, se bilaga 5. Kloridhalten, räknat som teknisk vara $CaCl_2$, befanns vid dubbelprov vara 1,7 % och för kontrollprovet < 0,1 %. Kloridhalten i proverna med tillsats ligger således under den tillåtna maximalhalten.

Karbonatiseringen av ingjutningsskikten från ytan samt ned i sprickorna studerades som tidigare nämnts genom användning av indikatorvätska på friska brottytor av ingjutningsbetongen. Fig 21 a visar ett exempel på karbonatisering från betongytan. Inträngningsdjupet ökade något med ökande porositet i betongen och ökande sprickvidd. För slipbruk med cementhalt 350 kg/m³ och 450 kg/m³ var inträngningsdjupet efter 2²/3 år endast 2-3 mm från betongens överyta, medan bruket med cementhalt 250 kg/m³ visade karbonatisering från ytan ned till c:a 8-10 mm djup. Karbonatiseringen vid sprickorna trängde i allmänhet ned till rörens överyta och till ett djup i sprickväggarna av max 1 mm. Frånsett rörens överyta omedelbart i sprickorna låg således rören i alkalisk miljö. Fig 21b visar exempel på rörens läge i en provkropp och sprickans nedträngning till röret.

## 3. Värdering av rostutbredning och rostgrad på de urtagna rören

Som genomgående tendens för samtliga av de urtagna rören fann man, att den väsentligaste delen av korrosionsangreppet var koncentrerad till rörens övre hälft med centrum för angreppen i sprickan men med varierande spridning av angreppet ut från sprickan och varierande omfattning av angreppen för de olika serierna. Utöver dessa allmänna angrepp vid sprickorna fann man emellertid ytterligare två typer av korrosionsangrepp på rören. Dessa var:

a) Börjande gropfrätning ("pittingholes") koncentrerade till punkter på rörytan i anslutning till porer i ingjutningsskiktet (framförallt i serie D).

b) Omfattande korrosion längs rörens undersida i samband med luftfickor mellan rören och underbetongen orsakade av otillräcklig ingjutning av rören (framförallt i serie C).

Syretillgången vid sprickorna har varit riklig och korrosionsprodukterna här var i huvudsak "röd rost", medan man vid porerna fann flera exempel på "svart rost", vilket tyder på att syretillgången varit otillräcklig vid de innestängda porerna. Huruvida punktangreppen vid porerna avstannar som följd av brist på syre, kan ej bedömas förrän vid senare inspektioner.

Vid bedömningen av rostutbredning och omfattning av rostangreppen uppmättes den totala korroderade ytan och den indelades i olika korrosionsgrader enligt tabell 8. Exempel på rost av de olika korrosionsgraderna visas i fig 22. Ytterligare utfördes vägning och avrostning för bedömning av viktförlust samt mätning av korrosionsdjupet med mikroskop (Fritz Leitz TDS 50). Utöver korrosionsangreppet vid sprickorna antecknades, att man i serie D (med 2 % $CaCl_2$) fann djupa frätgropar (1,1-1,3 mm) vid porer mot rörytan, även i balken utan spricka, se fig 23, samt att serie G (samtliga prov) visade omfattande angrepp längs balkarnas undersida, se fig 24. Korrosionsdjupet här var 0,40-0,50 mm.

Resultaten från mätningarna av korrosionen vid sprickorna har sammanställts i tabell 10, bilaga 6, för sprickvidderna 0, 0,5 och 1,5 mm. I fig 25 visas vidare ett stapeldiagram över korrosionens omfattning vid max sprickvidd (1,5 mm) och lagring a (fuktning/torkningscykler) för samtliga serier. På denna fig visas även korrosionen längs rörens undersida i serie $G_1$ och $G_2$. ($G_1$ c:a 1 cm täckskikt, $G_2$ c:a 4 cm täckskikt).

## 5.6 Diskussion av försöksresultaten

Vid bedömning av resultaten tas i första hand hänsyn till uppmätningarna av den korroderade ytan samt indelningen av ytan efter graderingsskalan i tabell 8 vid okulärbesiktningen av rören, samt mätningarna av gropdjupen hos de avrostade rören. Däremot fann man vid dessa försök att värdering på grundval av viktförlust ej kunde användas. I viss mån gav mätningarna av viktförlust tendenser som är överensstämmande med resultaten från de övriga värderingsmetoderna, men mätningarna stördes i hög grad av att

# F Ö R O R D

Institutionen för byggnadsteknik vid Tekniska Högskolan i Lund består sedan den 1 juli 1966 av professurerna i byggnadsteknik I, byggnadsteknik II, byggnadsmateriallära och byggproduktionsteknik (tillkom den 1 juli 1967), laboraturen i byggnadsakustik samt speciallärarbefattningarna i geologi och geoteknik.

Från institutionen för byggnadsteknik kommer att utges dels bulletiner, där forskningsarbeten kan publiceras i original eller som särtryck, dels interna rapporter, där förhands- och delrapporter om forskningsarbeten - liksom examensarbeten och mindre undersökningar - avses att bli publicerade. De interna rapporterna är endast avsedda för spridning inom en snäv krets och bör inte åberopas av utomstående i skrifter.

I föreliggande bulletin 1 redovisas en licentiatavhandling, som påbörjades av författaren, civilingenjör Ulf A Halvorsen, under hans anställning vid Cement- och Betonginstitutet i Stockholm. Arbetet har avslutats vid institutionen, avdelning för byggnadsmateriallära. Arbetet behandlar de främsta riskmomenten vid vattenläckage genom sprickor i betongkonstruktioner, nämligen korrosion på ingjutet stål och nedbrytning av bindemedlet genom kalkurlakning. I avhandlingen redovisas dels relativt utförliga litteraturstudier på de två problemområdena, dels nya laboratorie- och fältundersökningar.

Som framgår av författarens eget förord har ett flertal institutioner och organisationer genom ekonomiskt stöd eller på annat sätt möjliggjort denna forskningsuppgift. Institutionen instämmer helhjärtat i författarens tack till dessa bidragsgivare.

Lund i augusti 1966

L E Nevander
Prefekt
Professor i
byggnadsteknik I

Sven G Bergström
Ämnesföreträdare
Professor i
byggnadsmateriallära

man även fick viktförlust genom att rören hade ett jämnt fördelat oxidskikt över hela ytan som även detta lossnade vid avrostningen. Man fick således viktförlust också i de fall rören bedömdes vara utan rost.

För undersökningens olika variabler fann man efter $2^2/3$ års exponering följande tendenser:

### 5.6.1 Inverkan av varierande brukskvalitet

För de tre brukskvaliteter undersökningen omfattar är det en tendens till ökande korrosion med lägre cementhalt, om korrosionen värderas efter storleken av den korroderade ytan. Däremot fann man ingen tendens till ökande gropdjup för bruk med lägre cementhalt (se fig 25, 26 och 27 samt tabell 10).

### 5.6.2 Sprickviddens inverkan

Sprickor mindre än 0,1 mm vid ytan (serie A, båda lagringarna) har ej givit någon korrosion. I övrigt ökas angreppet med ökande sprickvidd, se fig 28.

### 5.6.3 Inverkan av $CaCl_2$-tillsats

Kalciumkloridtillsatsen har varit under den normalt tillåtna maximidoseringen, och man fann att tillsatsen ej ger någon ökning av den korroderade ytan, men en stark ökning av korrosionsdjupet i frätgroparna. Fig 29 visar rör från bruk med och utan $CaCl_2$ vid i övrigt lika betingelser.

Man fann även att tillsatsen av $CaCl_2$ har givit upphov till djupa punktangrepp vid porer mot rörytan i provkroppen utan spricka. Rör i bruk med $CaCl_2$ bedöms således vara avsevärt mera känsliga för otillräcklig ingjutning och porositeter än rör i motsvarande bruk utan $CaCl_2$. Eftersom förutsättningarna vid ingjutning av rör i förhållandevis tunna slipskikt på bjälklagsbetong är sådana, att riskerna för förekomst av enstaka porer, luftfickor, sprickor och otillräckliga täckskikt måste bedömas som stora, även vid omsorgsfull gjutning, måste man avråda från att använda $CaCl_2$-tillsats till sådana bruk. Efter uppkomsten av ett enda genomgående hål i vattenförande rör kommer i regel den fortsatta förstöringen att ske snabbt.

### 5.6.4 Inverkan av varierande ingjutningsteknik

De ingjutningsmetoder som använts kan indelas i följande:

1. Omsorgsfull handpackning av trögflytande bruk runt rören med rören liggande på underbetongen (serie A).
2. Vibrering av trögflytande (något styvare än ovan) bruk med rören liggande direkt på underbetongen (serie F).
3. "Normal" handbearbetning av trögflytande bruk med rören liggande direkt på underbetongen (serie G). (Med "normal" avses här handbearbetning utan att speciellt noggrann packning längs rörens undersida utföres. Denna bearbetningsmetod anses sannolikt komma åtminstone någon del av ett större rörsystem, upplagt direkt på bjälklagsbetongen, till del även i de fall, där omsorgsfull kringgjutning av rören är föreskriven.)
4. "Normal" handbearbetning av trögflytande bruk med rören upplagda på distansklotsar, som möjliggör fullständig kringgjutning av rören.

Dessa olika gjutningsmetoder har visat sig ej ha någon effekt med avseende på korrosionen på rörens överyta i sprickorna, men däremot stor effekt när det gäller risken för korrosionsskador i samband med luftfickor längs rörens undersida. Serierna G (ingjutningsmetod 3 ovan) är således de enda serier, som visar omfattande och djupa skador på rörens undersida. Eftersom en omsorgsfull ingjutning enligt metod 1 ovan ej kan påräknas genomförd med säkerhet över hela rörsystemet, är användning av distansklotsar att rekommendera. Även vibrering av bruket har givit tillräckligt bra undergjutning av rören.

### 5.6.5 Inverkan av varierande täckskikt

Vid undersökningen har täckskikten varit c:a 1, 3 och 4-5 cm. Betr korrosionen i och vid sprickorna har man ingen klar tendens till att varierande täckskikt har inverkat på omfattningen av skadorna. De tjockaste täckskikten ger något mindre sprickvidd vid rören för samma sprickvidd vid ytan, än motsvarande rör med tunna täckskikt. Detta gör att spridningen av korrosionen blivit något mindre med ökande täckskikt. Korrosionsdjupet har dock ej påverkats.

Det är ännu för tidigt att bedöma om karbonatiseringen kan tränga ned till rörytorna i provkropparna med tunna täckskikt och således ge upphov till mera omfattande korrosion.

## 5.7 Slutkommentar

Försöksmetoden och den exponeringsmetod man nu använt har efter hittills utförda inspektioner visat sig fungera tillfredsställande. Försöken har givit klara tendenser m a p de undersökta variablerna. De farligaste angreppen av korrosion har man haft i serierna D (med $CaCl_2$) och G (ej fullständig undergjutning), med frätningsdjupen 1,3 mm och 0,46 mm. Sprickorna har allmänt orsakat korrosion på rören, men korrosionsdjupet har i dessa serier varit max 0,3 mm. Försöken fortsätter efter samma riktlinjer som tidigare och nästa inspektion av rör väntas bli utförd efter ytterligare några års lagring.

# 6. Sammanfattning, del I

I avhandlingens första del diskuteras hur sprickor i betongkonstruktioner inverkar på korrosionsangrepp på ingjutet stål. Inledningsvis genomgås korrosionsproblemet som det har yttrat sig i svensk betongpraktik fram till början på 1960-talet. Efter en genomgång av ett antal redovisade korrosionsskadefall framföres uppfattningen, att korrosionsskador på armering i svenska betongkonstruktioner hittills har förekommit i mycket begränsad omfattning och endast i samband med kombinerad effekt av gjutfel och dålig betong i mycket korrosiv atmosfär. I samband med värmeslingor ingjutna i golvbruk har man även haft ett antal skadefall, där orsaken bl a är att hänföra till okunnighet och slarvigt arbetsutförande.

Det ges en kort genomgång av de allmänna teoretiska förutsättningarna för korrosion på stål ingjutet i betong. Betongens korrosionsskyddande inverkan samt de tänkbara effekterna av sprickor diskuteras. Öppna sprickor in till ingjutet stål ger ur alla teoretiska synpunkter en ökad risk för korrosionsskador på stålen, men man kan ej ur teoretiska överväganden dra gränserna för vad som kan tillåtas under olika yttre betingelser. En genomgång av den del av korrosionslitteraturen som speciellt värderar sprickors in-

verkan på skaderiskerna visar, att man ej heller på grundlag av tidigare erfarenhet i form av fält- och laboratorieundersökningar med erforderliga krav på säkerhet kan värdera, vad som kan tillåtas i fråga om sprickor i olika typer av betongkonstruktioner vid förekommande miljötyper i Sverige. I fortsättningen redovisas resultaten från två undersökningar, som i de väsentligaste delarna utförts av författaren.

Den första är en fältundersökning som avsåg att utreda, i vilken omfattning sprickor i svenska vattenbyggnadskonstruktioner kan anses förorsaka allvarliga korrosionsskador på armeringen. Fältinspektionerna omfattar 11 anläggningar med ålder varierande mellan 10 och 55 år. 7 av dessa ligger i mellersta Sverige och 4 i södra Sverige. Vid inspektionerna har man sökt ut de delar av anläggningarna, där riskerna för korrosionsskador borde vara störst, och här frilades armeringen vid sprickorna. De flesta observationerna har gjorts på luftsidans armering, men även vattensidans armering har inspekterats vid flera anläggningar. Icke i något fall har man på ingjutna järn observerat rostangrepp av sådan omfattning, att detta kan anses ha någon praktisk betydelse. Järn som legat helt fria har däremot uppvisat betydande rostskador. Inspektionerna omfattar ingen anläggning i mera korrosiv industriatmosfär, men får anses representera anläggningar i miljöer, som är typiska för svenska vattenbyggnader. Resultatet av undersökningen är således att för dessa konstruktioner medför sprickorna ingen risk för betydande korrosionsskador på armeringen.

Den andra undersökningen är en långtidslaboratorieundersökning, som anknyter till de nämnda skadefallen man haft på ingjutna värmeslingor. Undersökningen syftar speciellt till att utreda korrosionsriskerna vid sprickor i golvbruket, när slingorna gjuts in i ett särskilt slipbruk ovanpå bjälklagsbetongen.

Provkropparna är 10x10x80 cm balkar, varav undre delen består av normal bjälklagsbetong och övre delen av slipbruk, vari rören har ingjutits. Genom att lägga en belastning på provkroppen har man åstadkommit en spricka i slipbruket, och denna spricka har sedan låsts till en given sprickvidd med hjälp av epoxiplast. Balkarna har sedan placerats dels

omväxlande i luft och vatten, dels utomhus. I undersökningen har ingått inverkan av varierande sprickvidd, brukskvalitet, ingjutningsteknik och tillsats av $CaCl_2$.

Rören uttogs efter $2^2/3$ års lagring. Vid uttagningen fann man rostangrepp, i huvudsak koncentrerat till rörens övre hälft med centrum för angreppen i sprickan. Man fann även gropfrätningar i samband med luftporer i ingjutningsskiktet för serierna med $CaCl_2$ samt i vissa fall omfattande korrosion längs rörens undersida i samband med luftfickor mellan rör och underbetong.

De hittills erhållna resultaten visar följande tendenser: Ytkorrosionens omfattning ökar med ökande sprickvidd. Tillsats av $CaCl_2$ ökar icke ytkorrosionens omfattning men ger gropfrätningar. Rör i bruk med $CaCl_2$ är ur korrosionssynpunkt avsevärt mera känsliga för porer och fel i ingjutningen än rör i bruk utan $CaCl_2$. Korrosionens omfattning vid sprickorna minskar med ökande cementhalt. Bearbetningsmetoden påverkar ej korrosionsspridningen på rörens översida vid sprickorna, men är av avgörande betydelse för risken för korrosionsspridning i samband med luftfickor mellan rörens undersida och underbetongen.

## Del II. Betongförstörelse genom kalkurlakning

### 0. Inledning

Det är sedan länge väl känt att betong, som under längre tid utsätts för strömmande vatten, under vissa förutsättningar kan skadas genom att cementets reaktionsprodukter löses och transporteras bort. Man har således flera exempel på att äldre betongkonstruktioner, som varit otäta och utsatts för ensidigt vattentryck, har totalförstörts. Vid moderna betongkonstruktioner har man emellertid i vanliga fall inga problem med att tillverka betong som ur dessa aspekter är tillräckligt vattentät i sig själv, men vattenläckage kan förekomma genom sprickbildning och otäta fogar.

Vid inspekterandet av dammar och övriga vattenbyggnadskonstruktioner, som är utsatta för ensidigt vattentryck, observeras ofta tjocka avlagringar av kalciumkarbonat på nedströmssidan i anslutning till läckande sprickor och fogar. Dessa uppstår genom att läckvattnet under passerandet genom dammen löser en del av betongens fria $Ca(OH)_2$, varefter denna utfälls och ombildas till $CaCO_3$ genom reaktion med $CO_2$ från luften i samband med att vattnet rinner längs med dammfronten på nedströmssidan och avdunstar. Detta påpekas bl a i VAST:s tidigare nämnda rapport från besiktningarna av ett antal svenska vattenbyggnadskonstruktioner, Bergström och Nilsson/23. I fig 30 visas ett exempel på dessa "kalkridåer" hämtat från denna rapport. Efter en diskussion av riskerna för omfattande betongförstörelse genom denna typ av urlakning finner förf, att man ej har tillräckligt grundlag för att avgöra hur allvarliga skaderisker av denna typ de läckande sprickorna representerar. Man rekommenderade att ytterligare undersökningar skulle göras. VAST uppdrog därför åt Cement- och Betonginstitutets kontaktavdelning att utföra dels en litteraturstudie över frågan, dels med-

verka vid ytterligare undersökningar som ansågs erforderliga. Författaren handhade den dagliga ledningen av dessa undersökningar vid CTI och senare vid LTH:s institution för byggnadsmateriallära. Kostnaderna för undersökningarna har huvudsakligen bestridits av VAST och Krångede AB. I samband med olika kemiska analyser har Cement- och Betonglaboratoriet i Limhamn medverkat utan kostnader för undersökningen.

## 1. Litteraturöversikt

Problemen i samband med kalkurlakning i vattenbyggnader av betong upptar en förhållandevis begränsad del av den mycket omfattande litteraturen om vattenbyggnadsbetong. I synnerhet gäller detta urlakning genom sprickor och fogar. I en mycket omfattande bibliografi över betong i dammbyggnader utarbetad år 1963 av Lyon och Tyler/25, refereras 830 publikationer från tiden 1900 - 1961, varav endast c:a 20 har direkt anknytning till läckning- och urlakningsproblemen.

Betongs beständighet i aggressivt vatten har emellertid studerats i stor omfattning i samband med t ex betongrör och betongkonstruktioner i havsvatten, men problemen i samband med mjukt vattens inverkan på betong är studerade i mindre omfattning. I det följande skall ges en översikt över ett 30-tal rapporter, uppsatser och diskussionsinlägg som behandlar problemet kalkurlakning ur betong och dess inverkan på betongens egenskaper. Litteraturen omfattar tiden från 1926 till 1964 och kan, med tanke på vad som sagts ovan, anses ge ett representativt urval av den existerande litteraturen i ämnet. Redovisningen sker i kronologisk ordning med början år 1926.

Vid genomgången av litteraturen har i första hand sökts informationer och data rörande följande punkter:

1. Allmänna kemiska förutsättningar för de hydratiserade cementprodukternas lösning i vatten av olika sammansättning.

2. Urlakningsmekanismen som den yttrar sig, när vattnet passerar betongen genom sprickor eller fogar till skillnad från ytangrepp och läckning genom porös, allmänt otät betong.

3. Sambandet mellan mängden urlakad kalk och nedgång i betongkvalitet uttryckt genom t ex tryckhållfasthet och permeabilitet.

4. Exempel på allvarliga betongskador, där skadorna haft sitt ursprung vid en läckande spricka eller fog.

5. Metoder att på betongprov från vattenbyggnadskonstruktioner studera urlakningsgrad och urlakningshastighet samt urlakningens betydelse för betongens kvalitet.

Schlyter/26 redogör för ett antal svåra svenska skadefall, där betong förstörts genom att genomströmmande vatten lakat ur cementets kalk. Skadorna var i flera fall totala på mindre än 10-15 år. Betr utlösningsmekanismen anges endast kvalitativt rent vattens kalklösande förmåga samt kolsyrans förmåga att i viss mån vara karbonatlösande och således accelerera angreppet i vissa fall. Förf visar flera exempel på snabb förstörelse av otäta betongrör som utsatts för kolsyrehaltigt vatten. De skador som redovisas är i första hand urlakning genom porös betong och är från tiden före 1926.

Baylis/27 diskuterar frågorna rörande de olika cementkomponenternas löslighet i vatten av varierande sammansättning. Vattnets förmåga att lösa $CaCO_3$ anges bero på vattnets pH och dess alkalinitet. Ju lägre pH och alkaliniteten är (som halt CaO mg/l) desto större är lösningsförmågan. Förf understryker betydelsen av låg porositet hos betongen för att beständigheten mot utlösning skall vara säkrad.

Förf föreslår att man som prov på urlakningsgrad i äldre betongkonstruktioner kan bestämma betongens "Calcium solubility index" (alkalinitetsprov). Detta prov innebär, att

man från de delar man önskar undersöka krossar ned provstycken efter ett närmare angivet förfarande. Proven skakas med destillerat vatten, och man bestämmer provets alkalinitet efter olika tidpunkter. Hög alkalinitet motsvarar enligt förf låg urlakningsgrad eller tät betong. Alkalinitetsprovet visar betongprovets halt av fri kalciumhydroxid. Förf anger att för betong som utsätts för urlakning eller klimatisk förvittring bör alkaliniteten, bestämd vid ytan (c:a 1 cm in), ej vara lägre än 200 p.p.m. (part per million), och vid c:a 1-2 cm djup bör den ej vara lägre än 1200 p.p.m.

1929 anordnades ett Symposium/28, där erfarenheterna från betongkonstruktioner från början av 1900-talet fram till 1929 presenterades. Ett stort antal exempel på skador av olika typer redovisas. Dessa kan indelas i tre grupper, a) Frostskador, b) Sprickbildning och c) Urlakning.

De urlakningsskador som visas representerar i huvudsak skador i samband med otät, porös betong, som genomströmmas av vatten. Från fotos av skador som uppsatserna behandlar, kan man även se urlakningsränder i fogarna mellan varje skikt betong (gjutningen utfördes i skikt av c:a 1 m höjd) och konsistensen var för det mesta styv till mycket styv, stampbetong. Dessa urlakningsskador i fogarna var emellertid obetydliga i jämförelse med övriga skadetyper.

I slutet av 1920-talet var betongdammars beständighet mycket aktuellt också i Norden i samband med omfattande skadeutredningar och undersökningar i Sverige och Norge. I Kungliga Vattenfallsstyrelsens Redogörelse/29 presenteras resultaten från en mycket omfattande utredning kring orsaken till observerad betongförstörelse i svenska vattenbyggnader såsom dammar, ledmurar och turbinintag. Utredningen utfördes under åren 1924-1929 och bakgrunden var dels de observerade skadorna inom Sverige, dels motsvarande erfarenheter från bl a Norge och USA. De skador man koncentrerade sig på var sådana man ansåg vara orsakade av vattnets nedbrytande effekt, och man konstaterade, att det var vid konstruktionsdelar utsatta för ensidigt vattentryck man fann dessa skador. Skadorna har i dessa fall varit

orsakade av vatten, som genomströmmar otät betong. Orsakerna till betongens undermåliga kvalitet diskuteras bl a med studium av cementets och sandens kvalitet. Av stort intresse även i dag är utredningens kartläggning av vattnets karaktär i svenska vattendrag, tabell 11.

Tabell 11. Medelvärden från vattenanalyser vid svenska kraftverk 1925-1928

| Plats | pH | fri $CO_2$ mg/l | bunden $CO_2$ mg/l | aggress. $CO_2$ mg/l ber. | Humushalt | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | mgPt/l | Ac hum mg/l |
| Porjus | 6.6 | 3.8 | 3.2 | 5.4 | 18 | 0.30 |
| Knutsbro | 6.8 | 7.8 | 12.4 | 7.9 | 28 | 0.47 |
| Älvkarleby | 6.5 | 5.5 | 4.5 | 6.2 | 99 | 1.65 |
| Norrfors | 6.5 | 6.0 | 4.4 | 6.7 | 28 | 0.47 |
| Trollhättan | 6.6 | 3.6 | 4.1 | 4.3 | 27 | 0.44 |
| Edsele | 6.6 | 4.1 | 4.1 | 5.0 | 28 | 0.46 |
| Motala | 7.2 | 3.0 | 10.6 | 3.0 | 17 | 0.28 |
| Stockholms vattenledning | 7.2 | 5.5 | 16.4 | 5.3 | 25 | 0.33 |
| Medeltal: | 6.7 | 4.9 | 7.5 | 5.5 | 34 | 0.55 |

Variationerna är små, och man drar den slutsatsen, att orsakerna till betongförstörelsen vid vissa kraftverk ej kan hänföras till några av de undersökta egenskaperna hos vattnet ($CO_2$, surhet och humus). Vid en jämförande undersökning av betong av olika förstörelsegrad användes dels Baylis'alkalinitetsprov, dels kemiska analyser på provbitarna. Dessa prov stöder användbarheten av det enklare alkalinitetsprovet vid bedömning av urlakad betong. Kemiska analyser på prov av frisk och av starkt skadad betong visar, att skadan i stort sett består av bortförandet av kalkhydrat. Halten CaO var i det urlakade provet reducerad till 40.2 % från 60.2 % i den oskadade betongen.

Intressant är att man i utredningen finner, att angreppstyperna kan indelas i tre:

a. Utlösning från en fri yta
b. Utlösning från en sprickvägg och
c. Utlösning från porös, mager, otät betong.

Av dessa anges a. oftast vara utan betydelse, b. mycket svår och komplicerad att bedöma och c. definitivt farlig och förstörande.

De allmänna förutsättningarna för vattens angrepp på betong, speciellt m a p angrepp på betongrör, diskuteras av Frost och Virgin/30 i en redogörelse för en mycket omfattande svensk undersökning av betongs beständighet mot vatten. Utredningen omfattar följande:

1. Litteraturstudier
2. Undersökning av skadefall rörande betongrör
3. Laboratorieprov med vattenledningsvatten och kolsyrehaltigt vattens inverkan på betongrör av olika kvalitet.
4. Laboratorieprov av olika cementtypers resistens mot vatten av varierande sammansättning (extraktionsförsök).

Undersökningen visar att orsaken till betongskadorna vid vattnets verkan på betong är vattnets utlösning av kalk ur cementet. Intensiteten beror på betongytans och vattnets beskaffenhet och vattenomsättningens storlek. Rent vatten har stor lösande förmåga, medan hårt vatten verkar mindre lösande. Karbonatisering av betongen verkar starkt reducerande på utlösningen, speciellt vid rent vatten. Kolsyrehaltigt vatten ökar angreppet och en halt av 30-50 mg/l aggressiv kolsyra anses farlig för oskyddad betong. Angreppshastigheten är främst beroende av betongens täthet, och vid otät betong, där vatten sipprar igenom betongen, angrips cementet av alla typer vatten, och i högre grad ju större vattenomsättningen är.

Förf anser, att även sprickor och fogar i en i övrigt tät betong kan ge angreppsyta för genomsipprande vatten och ge upphov till skador.

Sundius/31 diskuterar under vilka betingelser vattnets eventuella halt av fri, aggressiv kolsyra kan vara en avgörande faktor för angreppshastigheten vid vattens nedbrytning av betong. Kolsyrans inverkan anges i hög grad vara beroende av på vilket sätt angreppet sker. I många fall kan kolsyran genom reaktion med kalkhydrat bidra till att man genom utfällt kalciumkarbonat får ett tätande, svårlösligt skikt i betongytan, vilket försenar angreppet.

Vid betongrör med hög vattenomsättning längs med väggarna kommer hög $CO_2$-halt i vattnet att bidra till att karbonatytskiktet löses upp och kolsyran medverkar i detta fall till att accelerera angreppet. Detta angrepp är emellertid ett rent ytangrepp och sker i regel mycket långsamt. Om man däremot har en otät betong, där vattnet rinner (eller sipprar) genom betongväggen, anser författaren att kolsyran endast kan ha en gynnsam och tätande effekt genom att utfällda karbonater kan täta betongens porer. Förstöringen sker alltså i sådana fall snabbare om vattnet ej innehåller kolsyra.

Samtidigt med de svenska utredningarna av betongdammarnas tillstånd pågick en motsvarande utredning i Norge, där man på samma sätt hade erfarenhet av allvarlig betongförstörelse på en del vattenbyggnader. Dessa utredningar har redovisats i en rapport utgiven av Den Norske Ingeniørforening/32. Av rapporten framgår att ett 80-tal större och mindre norska dammar och kraftverk har inspekterats m a p förekomst av skador. Samtliga befanns i större eller mindre mån vara skadade, och flertalet av skadorna ansågs ha uppkommit genom att rent och även kolsyrehaltigt vatten har kunnat tränga genom betongen, och därigenom bortföra betydande mängder av cementets kalk. Skadorna anges ofta vara koncentrerade till vissa områden av konstruktionerna, medan mellanliggande områden kan vara utan skador. Utredningen innehåller även resultat från försök med olika tätningsämnen samt rekommendationer för nygjutningar och reparationsåtgärder.

Olika sätt att genom laboratorieförsök studera betongs resistens mot urlakning samt försök att beräkna livslängden för betong, som utsätts för urlakning, redovisas av Tremper/33 . Förf utgår från tidigare undersökningar som visat, att hårdnad cement är löslig i vatten och att lösligheten ökar med ökande surhetsgrad hos vattnet. I dessa tidigare undersökningar har det hårdnade cementets resistens mot olika vattentyper studerats genom extraktionsförsök på nedkrossad, hårdnad cement. I den här redovisade undersökningen har man använt provkroppar, som utsätts för strömmande vatten på så sätt, att vattnet passerar ytorna hos provkropparna utan att pressas genom betongen.

(Förf anser dock att resultaten även representerar förhållandena vid vatten, som sipprar genom betong, vilket emellertid är något tveksamt). Av resultaten har följande speciellt intresse:

1. Angreppet ökar proportionellt mot sjunkande pH vid variationer mellan pH = 7 till pH = 6. För vatten med pH > 7 är angreppet obefintligt.

2. Endast vid mycket små vattenmängder och låg vattenhastighet får man reducerad angreppshastighet.

3. Hög vattenhastighet vid vatten med fasta partiklar (fin sand o dyl, eroderande) accelererar angreppet.

4. Överensstämmelsen mellan fältobservationer och laboratorieprov var god.

5. Ytbehandling reducerar angreppshastigheten.

6. Angreppshastigheten reduceras avsevärt vid användning av högklassig betong.

7. Urlakning av kalk orsakar nedgång i betonghållfasthet. Vid 50 % reduktion i ursprunglig kalkhalt anses hållfasthetsförlusten vara total.

8. Logaritmen av mängden urlakad kalk ökar i direkt proportion till logaritmen av exponeringstiden, log L = K log T. Detta använder förf till en metod att beräkna livslängden för en betongkonstruktion utsatt för ytangrepp, när urlakningen efter en viss tid är känd - eller kan uppskattas - och totalförstörelse väljes till tidpunkten, när 50 % av ursprunglig kalkhalt har urlakats.

9. Provkropparna har ett ytskikt av 1 á 2 mm tjocklek som är totalt urlakat (13 % av ursprunglig kalkhalt kvarstod), medan betongen innanför detta skikt visade likformig urlakningsgrad in till c:a 40 cm djup. Urlakningen i detta skikt var av storleken 4-9 % av ursprunglig kalkhalt, högsta värdet för lägsta undersökta betongkvalitet.

Hallström/34, redogör för olika länders erfarenheter av betongförstörelse i konstruktioner utsatta för ensidigt vattentryck. Flertalet av skadorna har orsakats av genomströmmande vatten i otät betong. Nedbrytningen kan delas in i flera stadier. Det första stadiet är, när vattnet passerar betongen genom porer och sprickor, varvid betongens fria kalciumhydroxid löses och föres bort. Kemiska analyser på hårdnad cement visar en halt av 13-17 % kalciumhydroxid. Förf anser att den del av kalciumhydroxiden, som finns i form av kristaller i hög grad medverkar till betongens hållfasthet och täthet.

Det andra stadiet i nedbrytningsprocessen är, när man får en kontinuerlig nedbrytning av de hydratiserade kalciumsilikaterna och klinkerkomponenterna, som ej har hydratiserat. Vid dessa reaktioner frigörs ytterligare mängd kalciumhydroxid, som lakas ur med det genomströmmande vattnet. Urlakningen av fri $Ca(OH)_2$ och nedbrytning av kalciumsilikater sker parallellt, men eftersom lösningen av fri kalciumhydroxid är den snabbaste reaktionen, kommer man först att få en på fri kalk totalt urlakad betong, varefter nedbrytningen av hydratiserade kalciumsilikater fortsätter tills dess att cementet totalförstörts.

Förf redogör även för utförda försök med hydratiserat cements resistens mot utlösning. Försöken utfördes med nedkrossade prov av cement med olika kemisk sammansättning samt med tillsats av puzzolaner. Från resultaten kan nämnas, att för icke-karbonatiserat cement var destillerat och mjukt vatten avsevärt mer aggressivt än vatten med fri kolsyra, medan man för karbonatiserat cement fann ökad utlösning med ökande mängd fri kolsyra i vattnet. Förf drar emellertid den slutsatsen av dessa försök, att den enda vattentyp, som kan tänkas vara icke-aggressiv gentemot betong är vattenlösningar mättade med kalciumhydroxid.

Ruettgers et al/35, redovisar de omfattande täthetsprovningarna som utfördes som förförsök i samband med byggandet av Boulder-Dam i avsikt att säkra mot skador orsakade av läckning och urlakning. Försöken avsåg bl a att bestämma betongens permeabilitet vid olika materialsammansättning och varierande vattentryck. Vidare studerades effekten av varierande härdningsvillkor för betongen samt inverkan av provkroppsform och storlek.

Ett av huvudsyftena med permeabilitetsstudierna var att studera sambandet läckning-urlakning och nedgång i betongkvalitet. Som supplement till tidigare refererade urlakningsförsök, som i huvudsak varit extraktionsförsök (Werner, Frost och Virgin) och ytutlösning (Tremper), utfördes vid Bureau of Reclamation omfattande perkulationsförsök med vatten, som pressas genom betongprovkroppen. Resultaten från de olika försöken har inritats på diagram (se fig 31), och man får ett klart samband mellan urlakad mängd CaO och total mängd

passerat vatten i liter per gram cement.

Vid försöken bestämdes även urlakningens inverkan på provkropparna tryckhållfasthet, och resultaten har inritats på diagram i fig 32. Försöken går till en urlakning av c:a 0,15 lb CaO per lb cement, vilket motsvarar c:a 25 % av den ursprungliga halten CaO, och för denna urlakningsgrad är hållfasthetsnedgången av storleken 15-20 %. Förf bygger i sin fortsatta diskussion av tidpunkten för betongens totalförstörelse orsakad av urlakning, på Trempers och Hallströms uppsatser och antar att betongen kan anses förstörd, när 40 % av den ursprungliga kalkhalten har urlakats (Tremper antar totalförlust av hållfasthet, när 50 % av kalken urlakats), vilket enligt förf skulle motsvara c:a 50 % hållfasthetsförlust. Denna urlakningsgrad kan väntas, när 35 cuft vatten per pound cement, eller c:a 2 lit per gram cement, passerat. Denna uppskattning representerar emellertid höggradig extrapolering från försöksresultaten.

Betr urlakningens inverkan på betongens permeabilitet anger förf, att man vid en urlakning av 25 % av den ursprungliga kalkhalten ej fann någon märkbar ökning av betongens permeabilitet.

Mary/36, anger i ett diskussionsinlägg till Ruettgers uppsats, att det av Ruettgers angivna sambandet mellan total mängd passerat vatten per viktenhet cement och urlakningsgrad endast kan gälla, när vattnet passerar genom en porös, allmänt otät betong, och icke när läckningen koncentreras till sprickor,lokala gjutsår o dyl.

I ett annat diskussionsinlägg till samma uppsats anger Meyers/37, att man vid laboratorieförsök med små provkroppar och hög vattenhastighet ej får in effekten av utfällning av kalciumkarbonat i betongen, vilket man i praktiken får när vatten med löst kolsyra och bikarbonat passerar en tjock dammkonstruktion. För vatten som innehåller aggressiv kolsyra måste därför korrosionsriskerna bedömas med hänsyn till, om kalciumkarbonaten utfälls inne i betongen - och där verkar porfyllande - eller om vattnet för kalciumkarbonat eller kalciumbikarbonat ur densamma. Det senare torde endast kunna bli fallet vid grovt läckage.

Dessa frågor är emellertid enligt Meyers ej laboratoriemässigt utforskade.

Ruettgers/38, lämnar i slutkommentaren till diskussionen ytterligare försöksresultat över sambandet hållfasthet-kalkurlakning, och resultaten är inritade i fig 35. Dessa tyder på att man först efter det att c:a 16-20 % av cementhalten (angivet som procent urlakad kalk med 65 gram CaO per 100 gram cement som utgångsvärde = 100 %) har urlakats, får någon påtaglig effekt på betongens hållfasthet. Med c:a $^1/_3$ av cementet urlakat har man fått c:a 11 % hållfasthetsförlust jämfört med initiell hållfasthet hos genomfuktade provkroppar. Vid denna urlakningsgrad har ingen ökning av permeabiliteten observerats.

Vattnets halt av kolsyra är under alla former av kalkurlakning av betong en faktor, som måste beaktas. Terzaghi/39, diskuterar detta i en uppsats, där han redogör för de olika former, i vilka kolsyra kan finnas i vatten och klargör de kemiska reaktioner, som kan äga rum, när kolsyran i vattnet kommer i kontakt med betong samt förutsättningarna för att dessa reaktioner skall kunna ske. Följande grundekvationer gäller:

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 = CaCO_3 + 2H_2O \qquad [1]$$

$$Ca(OH)_2 + Ca(HCO_3)_2 = 2CaCO_3 + 2H_2O \qquad [2]$$

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2 \qquad [3]$$

Ekv 1 anger att kalciumhydroxid från betongen reagerar med vattnets kolsyra och man får kalciumkarbonat som fälls ut, antingen på ytan eller i betongens porer. Ekv 2 anger att kalciumhydroxid och kalciumbikarbonat bildar kalciumkarbonat, som fälls ut som vid ekv 1. Förutsättningen för att ekv 3 skall kunna ske, är att vattnet innehåller ett överskott av kolsyra (aggressiv kolsyra) och man får enligt denna (ekv 3), att svårlöslig kalciumkarbonat ($CaCO_3$) går över till mycket lättlöslig kalciumbikarbonat och kan som sådan lakas ur betongen. Förf redogör för olika metoder att bestämma mängden aggressiv kolsyra i ett vattenprov och anger sambandet mellan fri kolsyra och kalciumbikarbonatkoncentrationen för olika vattentyper.

Förf diskuterar även angreppshastighet och hållfasthetsnedgång vid urlakning av kalk. Författarens erfarenheter från en utredning i samband med en skadad kajkonstruktion tycks stödja Trempers resultat betr sambandet kalkurlakning-hållfasthetsnedgång (se nedan).

Den aggressiva inverkan av kolsyran gäller främst ytangrepp på betong, och förf anger, att i de fall vattnet passerar genom en otät betong, kommer angreppet att ske snabbt - även om vattnet ej innehåller aggressiv kolsyra.

Ytterligare information betr inverkan på betong av hög halt aggressiv kolsyra i vatten samt den hållfasthetsreducerande effekten av kalkurlakning lämnas av Terzaghi/40 i rapporten från en utredning av orsakerna till betongskador vid en hamnanläggning i USA. Utredningen visade, att skadorna hade orsakats av a) sprängande reaktioner mellan sulfater och cementets reaktionsprodukter och b) angrepp och urlakning genom vattnets mycket höga halt av aggressiv kolsyra.

Urlakningen konstaterades bl a genom mikroskopanalyser av betongprov med olika skadegrad. Medan oskadad betong innehöll c:a 10 % kristallinskt kalciumhydroxid i cementpastan, fann man vid skadade betongprov att endast 0-1 % av pastan bestod av kalciumhydroxid. Betr sambandet hållfasthetsnedgång-kalkurlakning anges, att för två prov hade hållfastheten reducerats med 50 %, när c:a 25 % av betongens ursprungliga kalkhalt hade urlakats. Då man emellertid i detta fall hade en kombinerad effekt av sulfatangrepp och kalkurlakning, är det osäkert, huruvida värdena direkt kan jämföras med andra uppgifter om sambandet urlakning-hållfasthetsnedgång.

Mather/41, anger i anslutning till denna utredning, att de observerade hållfasthetsförlus erna ej enbart kan anses bero på urlakningen av den fria kalciumhydroxiden, utan det förekommer även en avspaltning av kalk från den hydratiserade kalciumsilikatgelen, som således successivt försvagas. Terzaghi/42, är i princip överens med Mather om att hållfasthetsnedgången orsakas av både urlakning av fri kalk och urlakning från kalciumsilikatgelen i betongen.

Kalciumhydroxidkristallerna bidrar till betongens hållfasthet genom att fylla porer och öka betongens täthet, men det anses klarlagt att hållfasthetsnedgången fortsätter efter det att all den fria kalken urlakats. Den största delen av hållfasthetsförlusten orsakas av nedbrytning av gelkomponenterna. Förf anser att en orsak till att man fått betydande spridning i resultaten betr sambandet urlakad kalkmängd och hållfasthetsnedgång är, att man i vissa fall får en utfällning av den urlakade kalken i betongen (som kalciumkarbonat) och således i läckvattnet mäter låg urlakningsgrad, även om effekten på hållfastheten i det närmaste kan vara densamma som om kalken helt förts ur betongen. Tremper och Terzaghi har således avsevärt större hållfasthetsförluster per procent urlakad kalk än Ruettgers et al. Vid de två förstnämndas försök hade vattnet hög halt aggressiv kolsyra, medan den sistnämnda använde vatten utan kolsyra.

Ett intressant exempel på att man vid vattenbyggnader kan ha yttre tecken på omfattande kalkurlakning i form av tjocka "kalkridåer" utan att man vid undersökningar på utborrade prov kan observera någon försämring av betongens kvalitet, ges i ett inlägg till ovanstående debatt av Holley/43, som redovisar resultaten från en undersökning av tillståndet i en c:a 25 år gammal betongdamm. Betongen i dammen hade under åren uppvisat en lätt läckning, som i det närmaste hölls i balans av avdunstningen på luftsidan. Man observerade emellertid en avsättning av tjocka lager urlakad kalk på luftsidan, och man önskade genom borrprov undersöka betongens kvalitet. Borrkärnorna visade inga för ögat synliga tecken på förstöring, och hållfastheten var tillfredsställande, detta trots att dammen visade klara tecken på omfattande kalkurlakning. Förf anger emellertid inga siffror som möjliggör bedömning av läckningsmängd och urlakningsgrad.

Även i Sovjet har betongdammars beständighet visats stort intresse under de senaste 20 åren. År 1953 anordnades ett ryskt symposium betr nedbrytning av betong. Där diskuterar bl a Adamovich/44 kalkurlakning och permeabilitetskoefficienter hos injekteringsbruk med vct varierande mellan 0,7 och 7,0 med de flesta försöksvärdena för vct $\sim$ 3,0 och $\sim$ 7,0. Permeabilitetskoefficienten K, efter 90 dygns härdning uppmättes för dessa vct till att ligga mellan $10^{-6}$ - $10^{-7}$ cm/sek.

Moskvin/45 ger vidare en allmän översikt över vattens angrepp på betong. Vattens korroderande inverkan på betong indelas av Moskvin i tre olika grupper allt efter vattnets karaktär och innehåll av lösta ämnen.

Grupp 1. Utlösning och urlakning av cementkomponenterna genom att betongen utsätts för strömmande vatten av mjuk, ren karaktär. Denna typ av korrosion är framförallt verksam, när vatten passerar igenom otät betong.

Grupp 2. Vatten som innehåller salter och kemiska ämnen, som reagerar med komponenter i cementet och härigenom förvandlar svårlösliga och bindande komponenter till lättlösliga ämnen, som urlakas eller avsättas i betongens porer utan hållfasthetsbildande effekt. Härunder hör exempelvis effekten av kolsyra, magnesiumsalter o dyl.

Grupp 3. Inverkan av vatten som innehåller ämnen, som reagerar i betongen under stark volymökning och därigenom verkar sprängande på betongen, exempelvis sulfater.

Oftast uppträder dessa tre angreppstyper i kombination, och i detta sammanhang är angreppen av typ 1 och 2 - var för sig eller kombinerade - av det största intresset.

Förutsättningarna för omfattande urlakning av typ 1 är följande:

1. Vatten med hög lösningskapacitet, d v s rent vatten eller vatten med ämnen som ökar cementkomponenternas löslighet i vatten.

2. Stor kontaktyta vatten/cement, d v s porös, otät betong.

3. Stor vattenomsättning (långvarig, stor läckning).

Vid tät betong, där angreppet sker från ytan eller i en sprickvägg, bestäms urlakningshastigheten av diffusionshastigheten för kalciumklorid genom betongen ut mot angreppsytorna. Förf anser, att i sådana fall är angreppshastigheten mycket långsam.

För korrosion av typ 2 och kombination av typ 1 och 2, när vatten med aggressiv kolsyra passerar genom t ex en betongdamm, redogör förf enligt följande, fig 33. Korrosionen genom dammen uppdelas i tre zoner. I början får man korrosion av typ 2 genom reaktioner mellan kalciumhydroxid och kolsyra under bildandet av bikarbonat, som är mycket lättlöslig i vatten. Vid fortsatt lösning av kalciumhydroxid från betongen längre in kommer bikarbonaten att ombildas

till kalciumkarbonat, som fälls ut och ger en tätande effekt i zon 2. För betong med låg permeabilitet kan man således få fullständig tätning. Vid fortsatt läckning - om den tätande effekten ej är tillräcklig - kommer vattnet efter passerandet av zon 2 att vara rent och verka som t ex destillerat vatten, varför man får en urlakning av typ 1 i sista zonen (zon 3). Om läckningen fortsätter lång tid, kommer zonerna att flyttas genom betongen, som skisseras i figuren, och resultatet kan bli total förstöring av betongen. Ett tecken på långt framskridet stadium av angreppet är, om vattnet som kommer ut ur betongen på luftsidan, innehåller kalciumkarbonat eller kalciumbikarbonat.

Exempel på utredda skadefall, där kalkurlakning varit medverkande orsak till nedbrytning av betong, finns även hos Molinari/46 och Idorn/47. Den förstnämnda redovisar ett fall av allvarliga ytskador på betongfundament i en 16 år gammal byggnad i São Paulo. Grundvattnet innehöll upp till 41 mg fri kolsyra per liter, och angreppet var störst nära ytan av grundvattnet. Skadorna ansågs orsakade av urlakning av cementets kalk, starkt accelererad genom kolsyrans inverkan. Även den senares rapport representerar omfattande skador på ett betongfundament, som under längre tid utsatts för aggressivt grundvatten. Denna konstruktion var från början av 1900-talet och c:a 50 år gammal vid tidpunkten för utredningen. Angreppet har ej enbart koncentrerats till ytorna, utan effekten är märkbar genom hela betongmassan. Dock visar de yttre skikten den längst framskridna förstörelsen, och kemisk analys av förstörd betong visar att cementet i det närmaste är totalt urlakat. Angreppet anses vara av rent kemisk natur, och i första hand som en kombinerad effekt av aggressiv kolsyra och hög sulfathalt i grundvattnet. Angreppet har gått från ytan och in i betongen. Data för betongens ursprungliga kvalitet och sammansättning saknas, men man kan förmoda, att kvaliteten har varit förhållandevis låg.

När det rör sig om ytangrepp på fria betongytor anses vattnets halt av aggressiva ämnen ha avgörande betydelse för angreppens framskridande. Under förutsättning av ringa aggressivitet och betong av normalt god kvalitet, har man många exempel på att betongrör under längre tid kan utsättas

för rinnande vatten utan att skador uppstår. Cay et al./48, redovisar en undersökning, där rörväggarna i betongrör från vattenledningar, varierande i ålder mellan 3 och 25 år, har undersökts med avseende på kalkurlakning och betongförstörelse. Vattnet i ledningarna har varit av olika karaktär, pH varierar mellan 6.7 och 8.0 och totalhårdheten varierar mellan $dH^{o}1$ (mjukt vatten) till $dH^{o}10$ (medelhårt vatten). Det anges ej huruvida vattnet innehåller aggressiv kolsyra, och dess aggressivitet med avseende på ytangrepp på betongrör måste bedömas som relativt ringa. Analyserna visade inga tecken på betongförstörelse, frånsett ett totalt urlakat lager i ytan av tjockleken 1-2 mm.

En översiktsutredning av frågorna i samband med kalkurlakning ur betong och därav orsakad betongförstörelse lämnas av Markestad/49 i en uppsats, där han redogör för olika typer av kemisk nedbrytning av betong. Betr vattnets inverkan på betong anges först rent allmänt en översikt över de teoretiska förutsättningarna för hårdnat cements sönderdelning under inverkan av vatten, varefter förf redogör för några av de tidigare utförda undersökningarna av olika cementtypers och betongs resistens mot urlakning. Enligt förf har vattnets aggressivitet gentemot betong studerats efter följande tre metoder:

1. Extraktion av kalk från nedkrossad, hårdnad cementpasta (Extraktionsmetoden, vilken använts av bl a Frost och Virgin, Werner, Sundius och Assarson).

2. Vatten pressas genom betongen i provkropparna (ofta avsiktligt framställda något otäta och porösa för att få resultat inom rimlig tid). (Perkulationsmetoden, vilken använts av Ruettgers et al).

3. Vatten passerar ytorna av provkropparna, antingen genom att provkropparna placeras ute i vattendragen (fältprov) eller utförs i laboratoriet (Ytutlösningsmetoden använd av bl a Tremper).

Man bemärker, att ytutlösning från sprickväggarna i en konstruktion ej kan anses ha studerats genom någon av de tre nämnda metoderna. Perkulations- och extraktionsmetoderna kan anses representera förhållandena, när vatten genomströmmar en allmänt otät betong, medan ytutlösningsmetoden motsvarar betingelserna för t ex rör i en vattenledning eller dammfronten vid en betongdamm.

Uppnådda resultat över sambandet passerad vattenmängd-

urlakad kalkmängd för olika cementtyper visas i fig 34. Betr olika vattentypers inverkan redovisar förf resultaten från Frosts och Virgins försök.

Av egna försök nämner förf en undersökning av karbonatutfällningens betydelse vid kolsyrehaltigt vatten som passerar genom en otät betong. Vid dessa försök påvisas, att ett skikt av utfälld kalciumkarbonat kontinuerligt förflyttas från vattensidan till luftsidan allteftersom urlakningen fortskrider. Gången i denna process är, att det kolsyrehaltiga vattnet först ger en reaktion mellan kolsyra och kalciumhydroxid, varvid man får utfälld kalciumkarbonat vid ytan, varefter vattnet vid vidare passage genom betongen fungerar som rent vatten. När sedan nytt kolsyrahaltigt vatten (karbonataggressivt) tränger in till det karbonatiserade skiktet förmår detta att lösa karbonatet och bilda vattenlöslig bikarbonat. När detta bikarbonathaltiga vatten stöter på fri kalciumhydroxid längre in i betongen, får man en ny utfällning av kalciumkarbonat och sedan upprepas det hela tills karbonatskiktet har förflyttats genom betongen.

I samband med studier av betongs permeabilitet har Markestad/50, även studerat frågan om beräkning av betongens livslängd under inverkan av kalkurlakning.

Förf redogör i denna uppsats för en av honom utarbetad och utprovad vattentäthetsprovningsmetod. Metoden baseras på perkulationsprincipen, och man mäter dels vattengenomströmningen för beräkning av betongens permeabilitet, dels utförs analyser på vattnet för bestämning av urlakningshastighet. Vid provningarna används destillerat vatten och provkropparna skyddas mot inverkan av kolsyra. På grundval av den vid försöken bestämda permeabilitetskoefficienten:

Darcys lag

$$K_c = \frac{Q}{A_c} \cdot \frac{L_c}{HT} \quad (Q = K_c \frac{H \cdot A_c}{L_c} T) \qquad [4]$$

H = tryckhöjd (cm)

$L_c$ = genomströmningslängd (cm)

Q = vattengenomströmning $cm^3$/dygn

$A_c$ = genomströmningsyta $cm^2$

T = tid (ett dygn är enheten = 1)

och Ruettgers antagande, att betongen kan anses förstörd när 40 % av ursprunglig kalkhalt har urlakats och att detta inträffat, när c:a 2000 $cm^3$ destillerat vatten har passerat varje gram cement, beräknas provkropparnas livslängd

$T_1 = \frac{2000 \cdot C}{Q \cdot 365}$ år (C är cementhalt). Förf anger emellertid inga nya försöksresultat över sambandet urlakning-hållfasthetsförlust.

Denna metod att beräkna livslängd för vattenbyggnadsbetong är emellertid enligt författarens uppfattning icke tillämpbar på moderna betongdammar, där läckningen lokaliseras till sprickor och fogar. Även antagandet betr sambandet urlakningsgrad och passerad vattenmängd är diskutabelt (se senare kommentar sid 64.)

De traditionella metoderna att studera urlakningsgrad har varit olika grader av kemiska analyser av betongen, supplerad med okulär besiktning av proverna. Larsen/51 redogör för en nyutvecklad metod att mikroskopiskt bestämma halten av fri, kristallinisk kalciumhydroxid i hårdnad cementpasta. Metoden består i princip av att man studerar tunna slipsnitt av betongprov genom ett polarisationsmikroskop. Med det polariserade ljuset inkopplat kan man direkt skilja ut kalciumhydroxiden i cementpastan. Man orienterar mikroskopets avläsningsskala så, att skalan endast täcker cementpasta utan att det polariserade ljuset är inkopplat. Sedan kan man med ljuset inkopplat räkna antalet delstreck, som täcker kalciumhydroxid, och får på detta sätt ett relativt mått på halten kalciumhydroxid i cementpastan. För att få ett statistiskt, tillräckligt siffermaterial upprepas mätningarna i 25 slumpmässigt utvalda punkter.

Det anses att man vid denna metod får en tillräckligt säker kvantitativ bestämning av halten fri kalciumhydroxid i cementpastan. Enligt författarens bedömning får man dock endast relativa mått på halten fri kalciumhydroxid i volymprocent av cementpastan i dess olika snitt.

Metoden har visat sig användbar vid bedömning av betong som skadats genom urlakning. Förf anger t ex från en undersökning, att man med denna metod fick fram värden på 17-27 % (volymprocent) $Ca(OH)_2$ i oskadad betong, medan motsvarande värden för dålig betong var 0-7 %.

Ett representativt bidrag till litteraturen som behandlar betongrörs beständighet lämnas av Nielsen och Skovgård/52. På grundval av litteraturstudier och utförda beräkningsexempel ger förf en översikt över mekanismen vid invändigt ytangrepp på betongrör som innehåller mjukt, kolsyrahaltigt vatten. De anser, att det genom försök och praktisk erfarenhet är bestyrkt, att i fall av högklassig, tät betong i rören, begränsas angreppet till ett ytskikt av någon millimeters tjocklek.

Inledningsvis får man en stark urlakning av ytskiktet, varefter man delvis erhåller ett tätande och upplösningsretarderande kalciumkarbonatskikt något in i ytskiktet. Den fortsatta urlakningen i en tät betong kommer att gå mycket långsamt, beroende på karbonatskiktet och på det skydd man får av det urlakade skiktet, som består av grus, kiselgel samt järn och magnesiumföreningar. En förutsättning för detta är, att man ej har stark eroderande verkan på väggen av t ex grus och sandförande vatten.

Den senare tidens mest betydande bidrag med direkt relation till frågan om betongdammars beständighet mot kalkurlakning lämnas av Sällström/53 i en preliminär rapport från pågående undersökningar vid Statens Vattenfallsverk. I denna rapport redogörs för omfattande perkulationsprov med porösa bruksprovkroppar av varierande sammansättning. Vid provningarna har studerats urlakningsresistensen hos provkroppar tillverkade av LH-cement, LH-cement + trass (viktproportion 75:25 LH:trass) och slaggcement. Det använda

vattnet har varit vattenledningsvatten med pH varierande mellan c:a 7.7 och 8.6 och totalhårdhet c:a 5-7°dH. Vattnet kan anses mycket litet aggressivt mot betong rent allmänt och med en något låg kalkutlösningskapacitet.

Vid försöken har studerats urlakningshastighet och urlakningens inverkan på brukets hållfasthet. Ytterligare har studerats sambandet mellan alkalinitetsvärden, erhållna vid det av Baylis angivna alkalinitetsprovet och urlakningsgraden. Förf sammanfattar de viktigaste resultaten enligt följande:

"1) För bruk med rent LH-cement blev kalkutlösningen ungefär dubbelt så stor som för bruk med trass- eller slaggcement. Utlösningen skedde till en början mycket snabbt men avtog starkt redan under första dygnet.

2) Brukets hållfasthet minskade hastigt i början av urlakningen. Rent LH-cementbruk uppvisade den största procentuella hållfasthetsförlusten. För att åstadkomma en 50 % hållfasthetsnedsättning erfordrades mer än dubbelt så stor vattengenomgång för trass-cementbruket som för rent LH-bruk.

3) För bruk med rent LH-cement erhölls ett nästan rätlinjigt samband mellan hållfasthetsförlust och utlöst kalkmängd. För bruk med trass eller slaggcement syntes hållfasthetsförlusten vid en given kalkförlust bli större än för rent LH-bruk.

4) Den allmänna hållfasthetsnivån var väsentligt mycket högre för slaggcementbruket än för övriga brukssorter.

5) Alkalinitetsprovet syntes ge god indikation på brukets urlakningsgrad genom de klara samband som erhölls med vattenmängd, utlöst kalkmängd och relativ hållfasthet."

Betr hållfasthetsförlusten skall tilläggas, att brukets allmänna hållfasthetsnivå vid försöken var c:a 30-60 kp/cm$^2$, vilket ger någon osäkerhet vid bedömningen av en motsvarande urlakningseffekt på hållfastheten hos betong med ursprunglig hållfasthet c:a 300 kp/cm$^2$. Förutsätter man dock att de här uppnådda resultaten representerar urlakningens effekt även vid normal betong, ser man att hållfastheten har sjunkit till 50 % vid en urlakning motsvarande c:a 50 % av cementets ursprungliga kalkhalt. Detta uppnås vid en passerad vattenmängd av c:a 3 lit per gram cement.

Ruettger et al anger c:a 40 % urlakningsgrad vid 50 % hållfasthetsförlust, vilket uppnås när c:a 2 lit vatten passerat varje gram cement. Med tanke på att dessa värden endast kan anses baserade på ett begränsat försöksmaterial, är överensstämmelsen förvånansvärt god. Ruettgers använde vid sina försök destillerat vatten, som således har högre kalkutlösningskapacitet än det ledningsvatten, som användes i Säll-

ströms försök. Vidare är cementtyperna olika, varför man ej kan vänta fullkomlig överensstämmelse.

Betr alkalinitetsprovets värde som kontrollprov av skadad betong är det av intresse att jämföra alkalinitetsvärden som anges av Haylis för oskadad betong, c:a 1200 p.p.m. och de som Sällström redovisar för icke-urlakat bruk, 900-1200 p.p.m. Även här är överensstämmelsen förvånande god, men frågan om möjligheten att använda alkalinitetsprovet för direkt kontroll av betong som utsätts för urlakning är dock ännu ej tillräckligt klarlagd.

En uppsummering av det genomgångna materialet visar att den befintliga litteraturen omfattar i första hand rapporter och diskussionsinlägg, som rör det hårdnade cementets resistens mot lösning i vatten och urlakning av betongen, antingen från en yta eller vid läckning av vatten genom en betongkonstruktion. Utöver den här beskrivna litteraturen finns ytterligare litteratur av bl a cementkemiska grundläggande verk (t ex Lea/54), och böcker som mera allmänt behandlar betongförstörelse (t ex Biczók/55 och Liesche u. Paschke/56). I dessa böcker redogörs bl a för betong och cements nedbrytning under inverkan av vatten av olika karaktär. Det lämnas emellertid inga väsentliga nya försöksresultat rörande de i detta sammanhang viktiga frågorna nedbrytningshastighet, samband urlakning-hållfasthetsförlust m m. Ytterligare finns kalkurlakningsproblemet i någon mån diskuterat i litteraturen rörande det likartade problemet saltutblomstring på betongytor (Flümel und Jung/57). Vidare finns det flera undersökningsrapporter, som behandlar urlakningsproblemet i betongrörledningar, där vattnet varit mer eller mindre kolsyrehaltigt och betongaggressivt. Dessa uppsatser ger emellertid endast bekräftelser på det som anges i de redovisade uppsatserna och ger inga nya informationer betr de frågor man ställer i samband med urlakning i läckande sprickor och fogar i vattenbyggnader.

Sammanfattningsvis kan man således säga, att litteraturgenomgången visar att man i förhållandevis stor omfattning har studerat riskerna för betongförstörelse i samband med vatten som genomströmmar en otät betong, och vatten som passerar en fri betongyta, som t ex i ett rör. Vidare har

utförts flera laboratorieförsök för att bestämma olika cementtypers resistens mot nedbrytning genom olika vattentypers inverkan. De försöksmetoder man har använt vid de redovisade undersökningarna har varit extraktionsförsök (nedkrossad, hårdnad cementpasta), perkulationsförsök (otät betong och högt vattentryck) eller ytutlösningsförsök (laboratorieförsök samt omfattande fältförsök med vattenledningar). Icke i något fall har man emellertid redovisat försök, där man studerat utlösningsprocessen som erhålles, när vatten passerar en spricka eller fog i en i övrigt tät betong. Denna typ av utlösning anses dock skilja sig från de förut nämnda typerna (yta och otät betong), men till vilken grad kan för närvarande ej anses klarlagt. Betr skador så finns i litteraturen redovisade flera exempel på total nedbrytning av otät betong, utsatt för ensidigt vattentryck och läckning. Skadorna har i olika fall ofta varit totala vid enstaka partier av konstruktionerna, medan mellanliggande områden har varit i det närmaste oskadade. Ytskador, där tät betong utsätts för passerande vatten, har i normala fall endast varit mycket begränsade, skadade skikt har varit av tjockleken mindre än 5 mm. Endast vid fall av vatten med hög halt aggressiv kolsyra har man fått betydande ytskador. Halten aggressiv kolsyra anses endast vara av avgörande betydelse, när det gäller ytutlösning, medan man vid övriga typer av urlakning ej kan anse vattnets halt av fri kolsyra ha någon avgörande betydelse. I dylika fall är mjukt vatten med hög kalklösningskapacitet det farligaste.

Litteraturen visar inga fall av omfattande betongförstörelse, där man anser att skadorna har haft sitt ursprung i en läckande spricka eller fog.

Betr sambandet kalkurlakning-betongkvalitetsförsämring så förefaller det som om man hittills endast haft ett mycket begränsat försöksmaterial att basera bedömningen av detta på. Tremper och Ruettgers har i sina försök ej kommit längre än till c:a 35 % urlakningsgrad och extrapolerar utifrån detta vid vidare värdering av hållfasthetsförlusten. I fig 35 har inritats de tillgängliga resultaten från de undersökningar som ger data rörande denna fråga, och man ser att det är betydande skillnad mellan olika undersöknings-

resultat. Orsakerna till dessa skillnader har diskuterats av bl a Terzaghi. På grundval av tidigare tillgängligt material har man genomgående enats om att räkna med att betongen kan anses förstörd vid 50 % hållfasthetsförlust, och att detta kan väntas inträffa vid en urlakningsgrad av c:a 40 %. Jämfört med de senare resultaten från Sällström förefaller det som om detta - på något svagt grundlag valda - värde kan anses rimligt. Sambandet hållfasthetsförlust - kalkurlakning kan dock ännu ej anses tillräckligt klarlagt. Betr sambandet urlakningsgrad och läckmängd anser författaren, att det är tveksamt, huruvida man kan anta, att det existerar ett fast samband mellan urlakningsgrad och vattenläckning i liter per gram cement på så sätt, att t ex 50 % hållfasthetsförlust uppnås, när 2-3 lit vatten passerat per gram cement såsom antagits av t ex Ruettger, Markestad och Sällström. Dessa resultat har uppnåtts efter perkulationsförsök med porösa provkroppar och snabb vattengenomgång. Under passerandet genom provkroppen hinner vattnet ej att mättas m a p kalciumhydroxid, och kalkkoncentrationen i vattnet vid dessa försök ligger hela tiden långt under mättnadsgraden. Vid den mycket långsamma vattengenomsippring man har i en modern betongdamm, kommer vattnet att uppta avsevärt mera kalk per liter, troligen kan man räkna med att det mättas m a p $Ca(OH)_2$, och hållfasthetsförlusten vid en viss vattengenomgång måste således bli större än det som har angivits. Detta gäller vid läckning allmänt genom betongen och ej genom sprickor och fogar.

Betr urlakningens effekt på betongens täthet anger Ruettger, att man ej har kunnat påvisa någon ökad permeabilitet även vid urlakning upp till $^1/_3$ av betongens ursprungliga kalkhalt. Sambandet urlakning - täthet tycks emellertid ej ha varit föremål för mera omfattande undersökningar.

## 2. Diskussion av urlakningsmekanismerna

### 2.1 Allmänna cementkemiska förutsättningar

För att man skall kunna diskutera mekanismerna vid nedbrytning av betong genom urlakning av cementets hydratationsprodukter, är det nödvändigt att känna de viktigaste kemiska föreningarna som bildar bindeämnen i den hårdnade betongen och dessas stabilitet i vatten. I Sverige används tre olika typer portlandcement, snabbt hårdnande (SH), standard (Std) och långsamt hårdnande (LH), varav de två senare är de som är aktuella i samband med dammbyggnader. Cementets kemiska sammansättning varierar något, men i tabell 12 visas exempel på analyser för de tre nämnda typerna och detta kan anses ge en representativ bild av de olika ämnenas förekomst.

Tabell 12. Exempel på sammansättningen hos de i Sverige vanligast förekommande cementen (enligt Håkanson/58)

| | | Snabb-cement % | Standard-cement % | LH-cement % |
|---|---|---|---|---|
| Kalciumoxid | $CaO$ | 67.0 | 63.5 | 64.7 |
| Kiselsyra | $SiO_2$ | 20.7 | 20.1 | 24.2 |
| Aluminiumoxid | $Al_2O_3$ | 4.7 | 5.8 | 3.8 |
| Järnoxid | $Fe_2O_3$ | 2.3 | 3.3 | 2.9 |
| Magnesiumoxid | $MgO$ | 2.0 | 2.6 | 2.0 |
| Kaliumoxid | $K_2O$ | 0.1 | 0.9 | 0.1 |
| Natriumoxid | $Na_2O$ | 0.2 | 0.5 | 0.2 |
| Svavelsyreanhydrid | $SO_3$ | 1.9 | 1.5 | 1.5 |
| Glödförlust | | 0.9 | 1.4 | 0.6 |

Den totala kalkhalten räknat som CaO i de aktuella cementtyperna är således c:a 64 % (vikt). För en betong med cementhalt 300 kg/m³ motsvarar detta 192 kg CaO, eller räknat som Ca, 137 kg per m³ betong.

Den teoretiska mineralsammansättningen (beräknad enligt Bogue) ges för de tre angivna cementanalyserna i tabell 13.

Tabell 13. Mineralkomponenternas fördelning i nedanstående tre cementtyper

| Mineralkomponent | | Snabb-cement | Standard-cement | LH-cement |
|---|---|---|---|---|
| $C_3S$ | Trikalciumsilikat | 76 | 57 | 46 |
| $C_2S$ | Dikalciumsilikat | 2 | 15 | 34 |
| $C_3A$ | Trikalciumaluminat | 9 | 10 | 5 |
| $C_4AF$ | Tetrakalcium-aluminatferit | 7 | 10 | 9 |

Vid cementets reaktioner med vatten bildas i första hand kalciumhydrosilikater, kalciumhydroxid samt kalciumaluminat-järnföreningar. Dessa reaktioner och reaktionsprodukternas sammansättning och karaktär är ej fullständigt klarlagda, men man anser att cementet främst får de limmande egenskaperna från kalciumhydrosilikaterna, som bildas genom tri- och dikalciumsilikaternas reaktioner. Enligt Czernin /59 är följande reaktioner sannolika:

Trikalciumsilikat, $C_3S$ ger:

$$2\ (3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2 \qquad [5]$$

Vid fullständig hydratation av $C_3S$ får man c:a 60 % (vikt) kalciumhydrosilikater (Tobermorit) och c:a 40 % (vikt) kalciumhydroxid ($Ca(OH)_2$).

Dikalciumsilikat, $C_2S$ ger:

$$2\ (2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO2\ SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2 \qquad [6]$$

Vid fullständig hydratation av $C_2S$ får man c:a 82 % kalciumhydrosilikater och c:a 18 % kalciumhydroxid.

Den första av dessa reaktioner är den snabbaste och ger de väsentligaste bidragen till cementets bindande egenskaper

och avger även den största mängden kalciumhydroxid. Detta kalkhydrat avges mycket snabbt och vatten som tillsättes betongen är efter kort tid en lösning mättad m a p kalciumhydroxid. Denna kalciumhydroxidhaltiga lösning är en förutsättning för att kalciumhydrosilikaterna skall bildas och vara stabila.

Vid de övriga cementmineralernas hydratation avges ingen kalciumhydroxid, utan det förbrukas något av det redan avgivna som bindes i andra föreningar. Den totala mängd fri $Ca(OH)_2$ man således erhåller i hårdnad betong varierar med cementets mineralsammansättning, men en uppskattning av värdena för cement med mineralsammansättning som i tabell 13 ger att man vid fullständig hydratation kommer att få en mängd fri kalciumhydroxid mellan c:a 23-30 % räknat som viktsprocent av hydratiserat cement. Det lägsta värdet avser LH-cement och det högsta värdet SH-cement, medan värdet för Std-cement är c:a 25-26 %. Cementet kan räknas vid fullständig hydratation ha bundet c:a 28 viktsprocent $H_2O$ (Czernin/59). Beräkningarna kan endast göras approximativa och avser att ge en uppfattning om den ungefärliga storleken av den kalciumhydroxidmängd man kan påräkna i hårdnad betong. Med tanke på det begränsade vetande man har om den verkliga hydratationsgraden för cementet i en betongkonstruktion, som t ex en betongdamm, kan noggrannheten i beräkningen troligen anses tillräcklig. De angivna värdena förutsätter fullständig hydratation, vilket man alltså icke uppnår i de aktuella konstruktionerna, där man även efter långvarig härdning måste påräkna en avsevärt lägre hydratationsgrad. Bizcók/55 anger, att det är rimligt att räkna med att c:a 11-14 % av cementvikten föreligger som fri $Ca(OH)_2$ i hårdnad betong, Hallström/35 anger att man vid kemisk analys på prov av hårdnad betong funnit 13-17 % av cementvikten som kalkhydrat och Lea/54 anger 10-15 % som normala värden. Detta motsvarar, att man vid en cementhalt av c:a 300 kg/m³ får c:a 35-45 kg fri $Ca(OH)_2$ per m³ betong. Beroende på vattenhalten i betongen kommer någon del av kalkhydraten att finnas i vattenlösning och den övriga delen förekommer i form av kalciumhydroxidkristaller, som i viss mån bidrager såväl till betongens täthet som till dess hållfasthet. Kalciumhydroxidkristallernas specifika vikt $d = 2.24$ g/cm³ (Handbook/60). Den uppskat-

tade mängden fyller således c:a 15-20 liter i fast volym per m³ i den hårdnade betongen. En total urlakning av den fria kalken motsvarar enligt detta en porositetsökning för betongen av upptill 2 % (volym).

Kalciumhydroxidkristallernas hållfasthetsbidragande effekt kan troligen enbart tillskrivas deras funktion som porfyllnad. Använder man den inom betongteknologin erkända "tumregeln", att man kan räkna med 5 % tryckhållfasthetsreduktion vid en ökning av porositeten med 1 %, ger detta att man endast kan räkna med c:a 10 % tryckhållfasthetsreduktion som följd av urlakning av betongens fria kalk, se även fig 32, som i viss mån stöder denna uppskattning. Övrig observerad hållfasthetsnedgång under urlakning orsakas således genom nedbrytning av kalciumhydrosilikaterna.

## 2.2 Hydratationsprodukternas stabilitet i rent vatten

Kalciumhydroxids löslighet i vatten visas i fig 36 (enligt Taylor/61), varav det framgår att lösligheten avtar med ökande temperatur. En mättad kalciumhydroxidlösning vid de aktuella temperaturerna i samband med urlakning i en svensk betongdamm innehåller enligt detta mellan 1,3-1,7 g $Ca(OH)_2$ per liter.

Under samma betingelser är lösligheten för kalciumkarbonat och kalciumbikarbonat följande:

| | | |
|---|---|---|
| $CaCO_3$ | : löslighet | 0,013 g/lit $H_2O$ |
| $Ca(HCO_3)_2$ | : löslighet | 165,000 g/lit $H_2O$ |

På grund av den kemiskt sett mycket komplicerade sammansättningen hos hårdnad betong kan man icke på samma sätt teoretiskt ange betongs löslighet i vatten. Man vet emellertid tillräckligt för att kunna ange de principiella stegen i en nedbrytning av cementets reaktionsprodukter, när de utsätts för genomströmmande vatten. De enklaste betingelserna har man, när vattnet är kemiskt rent (destillerat vatten). Förhållandena, när vatten av den karaktär man har vid svenska kraftverksbyggnader passerar genom betongen, kan emellertid till stor del jämställas med urlakningsförhållandena i destillerat vatten (se senare). Kalciumhydrosilikaternas sta-

bilitet i en vattenlösning varierar med lösningens innehåll av kalciumhydroxid, t ex angivet som koncentration CaO i lösningen i g/lit samt av de bildade kalciumhydrosilikaternas uppbyggnad angivet vid mol-förhållandet CaO : $SiO_2$.

I fig 37 visas stabiliteten för silikaterna i kalklösning som funktion av kalkkoncentrationen i lösningen (enligt Lea/54, även diskuterat av Rutle /62). Mol- förhållandet $CaO/SiO_2$ är enligt ekvationerna 5 och 6 lika med 1.5 i hårdnad cementpasta. Undersökningar av t ex Braunauer och Kantro/63 visar emellertid, att man i realiteten får en serie av olika kalciumhydrosilikater med kontinuerligt varierande förhållande $CaO/SiO_2$ från 1,0-2,0 De mest kalkrika av silikaterna är enligt fig 37 endast stabila i en nära mättad kalciumhydroxidlösning, c:a 1,1-1,2 g CaO/lit $H_2O$, och vid lägre kalkkoncentrationer i vattnet sker därför en avspaltning av kalk till dess att jämvikten återställs. Den slutliga nedbrytningen (hydrolysen) av kalciumhydrosilikaterna sker emellertid icke förrän kalkkoncentrationen i vattnet underskrider c:a 90 mg CaO/lit $H_2O$. Ytterligare en förutsättning för att nedbrytningen skall fortskrida är, att vattnet är i rörelse då man i annat fall snabbt får en kalkkoncentration i vattnet som är tillräcklig för att de hydratiserade silikaterna skall vara stabila. Om de angivna förutsättningarna är uppfyllda, kommer man emellertid att få en kontinuerlig nedbrytning av kalciumhydrosilikaterna till dess att det endast återstår ett löst kiselskelett och vissa urlakade järn- och aluminiumoxider utan bindande egenskaper. Exempel på långt framskriden nedbrytning av beskriven typ har man som nämnts i äldre betongdammar, som varit otäta (porösa) och utsatta för direkt genomströmning av mjukt vatten med stor kalklösande kapacitet.

Vid diskussioner av den här angivna urlakningsmekanismen förutsättes ofta, att vattnet först lakar ur den lättlösliga kalciumhydroxiden och att den för kalciumhydrosilikaternas stabilitet erforderliga kalkkoncentrationen i vattnet upprätthålles genom att de fria kalciumhydroxidkristallerna lösas. Därefter, när all fri kalciumhydroxid är urlakad, anses det att nedbrytningen av kalciumhydrosilikaterna börjar. Detta är emellertid enligt författarens

åsikt en alltför idealiserad bild av urlakningsförhållandena i en betongkonstruktion. Troligen sker det vid urlakningen i hög grad ett samspel mellan den fria kalciumhydroxiden, kalciumhydrosilikaterna av varierande stabilitet och ohydratiserade cementkomponenter. Bidraget till urlakningen blir störst från den mera lättlösliga kalciumhydroxiden, men parallellt med denna urlakning sker redan från början en nedbrytning av kalciumhydrosilikater. Detta stöds bl a av de mikroskopundersökningar som redovisas av Larsen/51. Han visar, att man även i betong, som uppvisar ett långt framskridet stadium av nedbrytning, finner en viss mängd kvarvarande fri kalciumhydroxid.

Också de icke hydratiserade cementmineralerna medverkar under utlakningen, dels genom hydratisering och nybildning av kalciumhydrosilikater, dels genom att direkt nedbrytas. Det kan således anses rimligt att räkna som man gör i relation till den ursprungliga cementmängden vid beräkningar av urlakningsgrad utan reduktion för hydratationsgraden.

Bland de första som använde mikroskopisk analys för studium av urlakningsgrad var Assarson och Sundius/64, som studerade slipsnitt av betong som representerade olika förstörelsestadier från frisk till starkt urlakad betong. I prover av ostörd betong påvisades förutom kalciumhydrosilikater en påtaglig mängd kalciumhydroxidkristaller avsatta i porerna samt ohydratiserade klinkerskorn, huvudsakligen bestående av disilikat. Vid ökande urlakningsgrad påvisades att mängden kalkhydrat och klinkerrester avtog och totalt saknades i de mest urlakade partierna. Proverna av betong, som ansågs vara mest urlakad, visade emellertid att det ej sker en homogen urlakning av hela den berörda betongen, utan proven bestod dels av partier av frisk, tillsynes opåverkad betong med väsentliga mängder fri kalciumhydroxid, dels av porösa och håliga partier som bestod av urlakade silikater och var utan spår av bibehållen klinkersubstans och kalciumhydroxid.

## 2.3 Faktorer som inverkar på cementets urlakningsresistens

De faktorer som i första hand har intresse i det aktuella sammanhanget är följande:

a) Cementets kalkhalt och mängden fri $Ca(OH)_2$

b) Inverkan av eventuella kalkbindande tillsatser

c) Inverkan av karbonatisering av $Ca(OH)_2$

d) Vattnets hårdhet

e) Vattnets innehåll av fri kolsyra ($CO_2$).

Dessa faktorer avgör hur snabbt det hydratiserade bindemedlet nedbrytes under förutsättning av att nedbrytningen får ske obehindrat, som t ex i samband med extraktionsförsök på nedkrossad, hårdnad cementpasta eller vid perkulationsförsök med användning av mycket porösa provkroppar. Av avgörande betydelse för skaderisken i en verklig betongkonstruktion är sedan sådana faktorer som betongens täthet, betongytans tillstånd och förekomst av sprickor i betongen. Dessa faktorer diskuteras senare i samband med diskussion av de aktuella angreppsformerna.

Dagens kunnande om cementets urlakningsrisker bygger till en stor del på de tidigare nämnda undersökningarna av Assarson och Sundius/64, Frost och Virgin/31 samt Werner/65, och den efterföljande cement- och betongtekniska litteratur som diskuterar dessa frågor bygger i stor utsträckning på dessa grundläggande undersökningar. Då det senare icke - enligt författarens vetande - har redovisats något som ger anledning att tvivla på de tidigare angivna resultaten, anses dessa numera närmast klassiska undersökningar gälla även för dagens förhållande.

I fig 38 visas resultaten av Assarson och Sundius/64, filtreringsförsök på icke-karbonatiserad, nedkrossad, hydratiserad cement. Genomströmningshastigheten var 200 $cm^3$ per dygn och provet vägde 15 g. Resultaten visar, att man under den första tiden får en i det närmaste mättad $Ca(OH)_2$-lösning, då det fria kalkhydratet mycket snabbt löses. Förf beräknar, att det de tre första dygnen utlösts c:a 12 %

av provets halt fri $Ca(OH)_2$ och endast c:a 6 % kalk från de hydratiserade silikaterna. Det sker emellertid redan från början en avspaltning av kalk från silikaterna. Vid början av perioden C (fig 38) är all fri $Ca(OH)_2$ borta och den rena hydrolysen av slikaterna bestämmer den fortsatta urlakningshastigheten. Den streckade linjen X - och fortsättningen av kurvan i området C - antyder hydrolysens förlopp.

En motsvarande bild av nedbrytningsförloppet ger Werner/65 i försök med extraktion av kalk från nedkrossad hydratiserad cementpasta. Även vid dessa försök var proven skyddade mot inverkan av kolsyra, och i båda fallen användes destillerat vatten. Werner utförde jämförande försök med hårdnad cement med den normala mängden fria kalciumhydroxiden och hårdnad cement, där den fria kalciumhydroxiden effektivt bundits genom tillsats av 30 % $AS_2O_3$ (Arsenik), fig 39. Hydrolysen av kalciumhydrosilikaterna sker parallellt i de två fallen, men den totala urlakningen sker så mycket snabbare i det normala provet, som motsvaras av den tillgängliga fria kalciumhydroxiden.

Genom användning av specialcement som slaggcement eller tillsatser av puzzolan, kan man reducera den tillgängliga mängden lättlöslig kalciumhydroxid och således minska urlakningshastigheten. De vanligen använda slaggcementen består av en blandning av vanlig portlandcement och en viss mängd hydraulisk slagg, och effekten på urlakningsresistensen anses bestå dels av reduktion i den totala mängden CaO i cementet och den fria $Ca(OH)_2$ i det hydratiserade cementet, dels är det möjligt att de hydratiserade silikaterna, som ges av slaggen, i sig själva är mera resistenta mot vatten. Närmare data, som ger information häron, saknas emellertid. Puzzolantillsatsers effekt består i att puzzolanerna reagerar med den angivna fria kalciumhydroxiden och bildar kalciumhydrosilikater, som anses vara av samma karaktär som de silikater, som bildas vid cementets reaktioner. Vid användning av puzzolancement, där en viss del av portlandcementet, vanligen 30-40 %, ersatts med puzzolan, har man dels reducerat den totala mängden tillgänglig CaO, dels har man kalken huvudsakligen bunden i de mera svårlösliga hydrosilikaterna. Effekterna av slagg- och puzzolancement kan i första hand väntas vara märkbara i det inledande urlakningsskedet, där man för vanlig portlandcement får en snabb urlakning av fri kalciumhydroxid. Detta framgår av fig 34, som visar en sammanställning över försök med olika cement (Lea/54). Försöken avser den första delen av urlakningen, där inverkan av fri kalciumhydroxid gör sig starkast gällande. Vid fortsatt urlakning kommer urlakningshastigheten att bli ungefär

densamma för de olika cementtyperna, på samma sätt som i fig 39.

Definierar man emellertid livslängden för en betongkonstruktion utsatt för kalkurlakning, som antalet år till viss urlakningsgrad, får man en markant gynnsam effekt genom användning av puzzolaner eller slaggcement (Övriga betongtekniska aspekter utelämnas i detta sammanhang.)

Sällström/53, fick i sina jämförande försök med LH-cement, trasscement (75 % LH + 25 + trass) och slaggcement, att erforderlig genomströmmad vattenmängd per gram bindemedel för att tryckhållfastheten skulle reduceras till 50 %, var c:a 3 lit för LH-cement och c:a 9 lit för trasscement. Hållfasthetsförlusten vid en given kalkförlust var större för slaggcement och trasscement än för ren LH-cement, men den totala effekten på livslängden av att använda dessa specialcement är enligt Sällströms försök gynnsam.

Frågan om trassens gynnsamma effekter är emellertid, trots ovanstående, ej klar och entydig. I försök vid Cement- och Betonglaboratoriet i Limhamn har man således icke kunnat påvisa någon gynnsam effekt av trasstillsats till cementet (Olavi/66.) I dessa försök bestämde man avkalkningsdjupet från en yta som passerades av destillerat vatten. En jämförelse mellan dessa två försök ger följande skillnader, som kan förklara den dåliga överensstämmelsen i resultaten. Sällström använde porösa provkroppar som vattenlagrades vid delvis förhöjd temperatur. Härdningstiden vid urlakningens början räknat som ekvivalent härdningstid vid 20°C enligt tid-temperaturfunktionen, Σ dygn (t+10°) var för serierna med trass 100 - 165 dygn. Detta ger m a p trassens medverkan i reaktionerna mycket gynnsamma härdningsförhållanden. Möjligen är den ekvivalenta härdningstiden vid + 20° ännu högre än det, som ges genom användning av Saul-Bergströms tid-temperaturfunktion, eftersom puzzolanaktiviteten starkt acceleras genom höjning av temperaturen, se t ex Lea/54. Tid-temperaturfunktionens giltighet för betong med puzzolaner har emellertid enligt författarens vetande ej undersökts.

Vid Olavis försök användes normbruk 1:3, sammansatt och komprimerad enligt Statliga Cementbestämmelser/67 med fallbord. Härdningstiden vid urlakningens början var c:a 60 dygn vid + 20°C. Provkropparna delades efter den angivna 60-dygnshärdningen och urlakningen sker

från snittytan. Härdningsförhållandena är således avsevärt mera ogynnsamma m a p puzzolanreaktionerna. Detta både genom provkropparnas avsevärt större täthet och lägre vct, och genom den kortare härdningstiden. De verkliga förhållandena i en betongdamm ligger troligen någonstans mittemellan de här använda härdningsmetoderna, och man kan ej säkert ange till vilken grad de av Sällström påvisade effekterna av puzzolantillsats kan påräknas i praktiken.

Då man emellertid i Sverige har dammkonstruktioner i vilka puzzolantillsats har använts, bör man kunna skaffa säkrare information om dessa frågor genom att göra urlakningsförsök på utborrade betongprover från konstruktioner utförda med de aktuella cementtyperna.

Med karbonatisering av betongen eller det hårdnade cementet menar man den reaktion som sker, när den lättlösliga fria kalciumhyrdoxiden reagerar med koldioxid och ombildas till mera svårlöslig kalciumkarbonat enligt ekvationen:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad [7]$$

Löslighet i $H_2O$:
$Ca(OH)_2$ c:a 1200 mg/lit
$CaCO_3$ c:a 13 mg/lit

Denna reaktion sker normalt från ytan i en betong genom inverkan från luftens koldioxidhalt och har störst betydelse i samband med betongs resistens mot yturlakning. Reaktionen kan emellertid även ske i samband med att koldioxiden tillförs genom vattnet. Karbonatiseringens effekt på urlakningsresistensen måste ses i samband med effekten av vattnets hårdhet och dess innehåll av aggressiv kolsyra.

Vattnets hårdhet bestäms huvudsakligen av dess innehåll av sulfater och bikarbonater av kalcium och magnesium, och det som i detta sammanhang har intresse är innehållet av bikarbonater, som bestämmer den s k temporära hårdheten. (Bikarbonaterna fälls ut vid kokning och kallas temporär hårdhet (eller karbonathårdhet), medan sulfaterna icke fälls ut, och kallas permanent hårdhet, summan av dessa utgör totalhårdheten).

Vattnets hårdhet anges normalt i hårdhetsgrader, varav oftast använd i Sverige är de tyska hårdhetsgraderna $^{o}$dH, där 1$^{o}$dH motsvarar 10 mg CaO/lit.

Klassificeringen av vatten efter hårdhetsgrad kan t ex göras enligt följande (tyska grader) Biczók/55:

| | $^{o}$dH |
|---|---|
| Mjukt | 0 - 6 |
| Moderat hårdhet | 6 - 15 |
| Hårt | 15 - 24 |
| Mycket hårt | 24 - 30 |
| Extremt hårt | >30 |

Vattnets halt av kolsyra indelas av t ex Liesche u. Paschke/56 enligt följande schema: (Med"kolsyra" menas huvudsakligen koldioxidgas löst i vatten).

| | | |
|---|---|---|
| Fast bunden kolsyra<br>Halvt " " | Bunden kolsyra | Total kolsyra |
| Tillhörande kolsyra<br>Aggressiv (kalklösande) kolsyra | Fri kolsyra | |

Den bundna kolsyran föreligger i karbonater medan den halvt bundna finns i bikarbonater, vilket illustreras av ekvationen

$$Ca\,(HCO_3)_2 \rightleftharpoons Ca\,CO_3 + CO_2 + H_2O \qquad [8]$$

Detta är en jämviktsekvation, där det fordras en viss mängd fri kolsyra i lösningen för att jämvikten skall uppehållas. Det är den ovan kallade tillhörande kolsyran. Ytterligare mängd fri kolsyra motsvarar då det som betecknas aggressiv kolsyra och orsakar att reaktioner [8] går mot vänster, om bikarbonaten löses och transporteras bort, och ytterligare mängd kalciumkarbonat kan lösas.

Metoder att beräkna mängden aggressiv kolsyra i vatten finns angivna i litteraturen och refereras bl a Warris/68, men i vanliga fall bestäms den experimentellt genom "Heyers' marmorförsök", där man mäter

den mängd kalciumkarbonat vattenprovet kan lösa ur pulvriserad marmor. Betydelsen av förekomst av aggressiv kolsyra i kalkurlakningssammanhang hänger samman med den tidigare angivna skillnaden i vattenlöslighet.

Den samlade effekten av vattnets hårdhet och dess innehåll av aggressiv kolsyra, samt karbonatiseringen av det hårda cementet har studerats speciellt av Frost och Virgin/69, som i sina försök använde destillerat vatten i jämförelse med utpräglat mjukt vatten och hårt vatten och tre olika mängder aggressiv $CO_2$. Med dessa 9 olika vattentyper utfördes extraktionsförsök på karbonatiserad och icke-karbonatiserad, hydratiserad, nedkrossad cementpasta. Vattentypernas sammansättning och huvudresultaten återges i fig 40 och 41 och tabell 14.

Tabell 14

| Vattensort: | | Destillerat vatten | Vattenledn-vatten | |
|---|---|---|---|---|
| Beteckning: | | V | Stockholm S | Djursholm D |
| Indunstningsåterstod ..... | mg/lit | - | 113 | 410 |
| Glödningsåterstod ..... | " | - | 101 | 373 |
| Kalk, CaO ..... | " | - | 34 | 116 |
| Magnesia, MgO ..... | " | - | 7 | 22 |
| Bunden kolsyra, $CO_2$ ..... | " | - | 38(30-40) | 190 |
| Fri kolsyra, $CO_2$ ..... | " | c:a 3 | c:a 4 | 18 |
| Aggressiv kolsyra, $CO_2$ .... | " | c:a 3 | c:a 4 | 0 |
| Klor, Cl ..... | " | - | 12( 8-15) | 45 |
| Svavelsyra, $SO_3$ ..... | " | - | c:a 16 | 50 |
| Vätejonkonc, pH: | | | | |
| direkt bestämd ..... | | 5·7 | 7·4 | 7·5 |
| beräknad ..... | | - | 7·45 | 7·49 |
| Total hårdhet, tyska grader..... | | - | 4·4 | 14·7 |
| Temporär " , " " ..... | | - | 2·4 | 12·1 |

Av resultaten framgår att man för karbonatiserad cementpasta, vilket i viss mån motsvarar förhållandena vid en fri betongyta, får en stark ökning i urlakningen med ökande mängd aggressiv kolsyra och minskande hårdhet hos vattnet. Kombinationen destillerat vatten med hög halt löst $CO_2$ ger den snabbaste urlakningen. För icke-karbonatiserad ce-

mentpasta, vilket närmast motsvarar förhållandena vid urlakning inuti betongen, får man ännu mera markant effekt i form av ökande urlakning vid minskande hårdhet hos vattnet, medan ökande halt aggressiv kolsyra endast ökar urlakningen, om vattnet är hårt, och reducerar urlakningen vid mycket mjukt vatten. Störst urlakning ger här kombinationen av destillerat och kolsyrefritt vatten. Under dessa förhållanden är således vattnets mjukhet den dominerande faktorn och avgörande för vattnets kalklösningskapacitet.

Efter ytterligare utredningar av Granholm, Werner och Giertz-Hedström/70, som speciellt studerade betongrörs beständighet mot urlakning, uppställdes den välkända indelningen av vattens angreppsförmåga på betong i fyra grupper enligt tabell 15.

Tabell 15. Olika vattentyper och deras angreppsförmåga på betong

| Vattentyp | Vattnets sammansättning | | Vattnets angreppsförmåga |
|---|---|---|---|
| | Karbonathårdhet tyska grader 1) | Aggressiv kolsyra mg/lit | |
| I | större än 2,0 | mindre än 15 | praktiskt taget ingen |
| II | större än 2,0<br>2,0-0,2 | 15-40<br>mindre än 15 | obetydlig |
| III | större än 2,0<br>2,0-0,2<br>mindre än 0,2 | 40-90<br>15-40<br>mindre än 15 | påtaglig |
| IV | större än 2,0<br>2,0-0,2<br>mindre än 0,2 | större än 90<br>större än 40<br>större än 15 | stor |

1) 1 tysk grad = 10 mg CaO per lit vatten.

Indelningen enligt denna tabell avser emellertid ytangrepp på betongrör (eller motsvarande), där karbonatiseringseffekten gör sig starkt gällande. Med anledning av det som refererats ovan måste bedömningen m a p urlakning inuti en betongdamm ändras avsevärt, så att vatten med karbonathårdhet <2,0 och aggressiv kolsyra <15 mg/lit ändras från typ II - obetydlig angreppsförmåga, till typ IV - stor angreppsförmåga.

I vatten av de aktuella typerna vid angrepp på svenska vattenbyggnader är i allmänhet hårdheten < 1 $^{o}$dH och halten aggressiv kolsyra < 10 mg/lit (se tabell 11 och senare vattenanalyser), och dessa vattentyper har m a p icke-karbonatiserad betong, stor angreppsförmåga.

## 2.4 Värdering av riskerna för skadlig urlakning i en konstruktion

I föregående avsnitt diskuteras cementens allmänna urlakningsresistens under förutsättning att vattnet har i det närmaste fri tillgång till de urlakningsbara hydratationskomponenterna, och att de lösta ämnena förs bort och nytt vatten tillförs för fortsatt urlakning. Vid urlakningsangrepp på en betongkonstruktion är det emellertid i tillägg till den diskuterade effekten av vattentyp och cementtyp, flera andra faktorer, som har avgörande betydelse för angreppshastigheten och därmed även för betongens livslängd, när den utsatts för vattens urlakande inverkan. Dessa faktorer kan sammanfattas som betongens vattentäthet och angreppsformen, d v s om angreppet sker på en fri betongyta (t ex betongrör eller dammfront), direkt genomströmning av betong eller genomströmning lokaliserad till sprickor och fogar. I det följande skall sammanfattas en del tillgängliga data på betongs vattentäthet samt diskuteras de principiella skillnaderna för de tre nämnda angreppsformerna och deras farlighet under olika förutsättningar.

### 2.4.1 Betongs vattentäthet

Vid undersökningar av betongens vattentäthet eller permeabilitet utgås normalt från att Darcy's lag för vattengenomsippring i porösa material gäller:

$$Q = K \frac{H \cdot A}{L} \qquad [9]$$

Läckmängden Q är enligt [9] proportionell mot tryckgradientens $\frac{H}{L}$ och genomströmningsytan A. H är vattnets tryckhöjd och L är betongens tjocklek. Proportionalitetsfaktorn K betecknas permeabilitetskoefficienten, och det är den som anges som mått på betongens vattentäthet. Permeabilitetskoefficienten bestäms normalt i laboratorieförsök på laboratorieframställda provkroppar, men har även bestämts i provkroppar som utborrats ur färdig konstruktion. För beräkning av K mätes antingen passerad vattenmängd, t ex Ruettger et al/36 och Markestad/50, eller inträngningsdjupet genom spräckning av provkroppen, Vuorinen/71. De värden som redovisas varierar från K = $10^{-5}$ cm/sek för mycket porös betong, till K = $10^{-10}$ cm/sek för mycket god betong, och för

speciellt högklassig betong, som vid centrifugalgjutna betongrör, har uppmätts $K = 10^{-11}$ cm/sek (Rosenquist/72). De väsentligaste faktorerna som bestämmer sprickfri, homogen betongs permeabilitetskoefficient är vattencementtalet (vct), maximala stenstorleken och hårdningsbetingelserna.

En bearbetning av Ruettgers/36, resultat har utförts av Bergström och Nielsen/73, och återges i fig 42. De sämsta vardena representerar betong med största stenstorleken. För normal vattenbyggnadsbetong med vct = 0,5-0,6 kan man enligt detta räkna med värden mellan $K = 10^{-8} - 10^{-10}$ cm/sek. Detta variationsområde överensstämmer väl med erfarenheterna inom Statens Vattenfallsverk enligt Sällström/74, som uppger att man för sprickfri och homogen betong har en permeabilitet motsvarande $K = 10^{-9} - 10^{-10}$ cm/sek, och att man på utborrade provkärnor erhållit $K \sim 10^{-9}$ cm/sek.

Det är emellertid flera osäkerhetsmoment förknippade med att överföra dessa permeabilitetsvärden, som man erhållit i laboratoriet med homogen och sprickfri betong, till att gälla permeabilitetsförhållandena i en betongkonstruktion. Faktorer som bidrager till osäkerheten är eventuella inverkningar av gjutfel, sämre bearbetning vid gjutningen, andra härdningsbetingelser och framförallt inverkan av inre vattenseparation, sättningar och inre sprickbildning. Alla dessa faktorer bidrager eventuellt till att man får en större permeabilitet i en konstruktion än vid laboratorieproverna. F n saknas närmare information om dessa faktorers betydelse.

Vid "Institutt for Vassbygging, NTH" har man emellertid planer på att utföra permeabilitetsmätningar "in situ" på någon norsk "platedam", där man har stor tryckgradient och lättåtkomliga, plana ytor, (Myran/75). Resultaten från denna typ undersökningar bör kunna belysa dessa osäkerhetsmoment.

### 2.4.2 Olika angreppsformer

Under den följande diskussionen av angreppsformerna vid kalkurlakning av den aktuella typen förutsättes följande grundekvationer ( se bl a Terzaghi/40) vara gällande:

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 = CaCO_3 + 2H_2 \qquad [10]$$

$$Ca(OH)_2 + Ca(HCO_3)_2 = 2\,CaCO_3 + 2H_2O \qquad [11]$$

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightleftarrows Ca(HCO_3)_2 \qquad [12]$$

Anm: Kolsyra, $H_2CO_3$, förekommer endast till en obetydlig del i vattenlösning, medan största delen $CO_2$ förekommer som löst gas (koldioxid) i vattnet, varför $H_2CO_3$ även kan skrivas $H_2O + CO_2$.

Dessutom inverkar även även koldioxidgas, som t ex genom luftens halt av $CO_2$, i direkt reaktion med kalciumhydroxid enligt [13]:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O \qquad [13]$$

Vid diskussionen förutsättes ytterligare att vattnet är mjukt (hårdhet < $1^{o}$dH) och innehåller en mindre mängd aggressiv kolsyra (5-10 mg/lit), vilket kan anses vara representativt för vattnet vid svenska kraftverksdammar. När vattnet passerar betongen får man en ständig växling mellan de angivna reaktionerna [10-12], och angreppet kan vantas utvecklas olika beroende på angreppsformen.

## Direkt genomströmning av otät betong

När vatten av den angivna sammansättningen passerar genom en betongdamm, sker i princip nedbrytningen som skisserats i fig 43 och nedan. Vattnet innehåller, när det går in i betongen, en mindre mängd $CO_2$, och upptar $Ca(OH)_2$ från betongen och man får reaktion enligt ekvation [10]. På grund av $CaCO_3$'s ringa löslighet i vatten fälls detta ut och det bildas ett delvis karbonatiserat skikt i betongen (skikt II i fig 43). När vattnet fortsätter sin väg genom betongen fungerar det i princip som destillerat vatten och löser $Ca(OH)_2$, maximalt intill mättnad, och kan transportera detta ut ur betongen, (skikt III i fig 43), och den fortsatta nedbrytningen av det hydratiserade cementet kan i princip ske som tidigare beskrivits.

Vid luftsidan sker antingen en avdunstning av vattnet på ytan eller nära ytan, beroende på läckmängd och uttorkningsförhållanden, och man får en reaktion enligt ekvation [13], varvid ytterligare ett karbonatiserat skikt bildas. Detta bildas även utan läckning genom direkt reaktion mellan betongens $Ca(OH)_2$ och luftens $CO_2$,(skikt IV i fig 43). Vid större läckmängd kan man få vatten som rinner längs med delar av dammfronten och utfällda kalciumkarbonatridåer. När nytt vatten tränger in i betongen har det, beroende av mängden fri $CO_2$, en viss förmåga att lösa $CaCO_3$ enligt ekvation [12], men det lösta bicarbonatet fälls återigen ut som karbonat enligt ekvation [11], när vattnet träffar på $Ca(OH)_2$ i skikt III. Det karbonatiserade skiktet kommer således att förflytta sig genom betongen från vattensidan mot luftsidan. Detta har observerats i laboratoriet av Markestad/49, och överensstämmer även med Moskvins/45, beskrivning av urlakningsförloppet, jmfr fig 33.

Skikt I i fig 43 antyder, att man närmast vattensidan kan få ett mera urlakat skikt genom att även en viss kalkomsättning med vattnet i dammens magasin kan ske. Detta skikt är normalt mycket tunt och urlakningen denna väg kan jämföras med urlakning från en fri yta som diskuteras i nästa punkt. Effekten av koldioxid och utfällda kalciumkarbonater, som skisserats ovan går i tätande och läckningsreducerande riktning, och innehåll av fri koldioxid är således vid denna typ av urlakning normalt gynnsamt. För koldioxidfritt vatten får man urlakning enligt fig 43, men utan förekomst av skikt II.

Det ovan angivna skisserar de principiella stegen vid en urlakning under direkt vattengenomströmning i betong. Avgörande för hastigheten i nedbrytningsprocessen och således för betongens livslängd är betongens täthet - eller permeabilitet - och i normala fall kan man sedan länge göra betong tillräcklig vattentät för att den här angivna urlakningseffekten skall kunna försummas.

I tätande riktning verkar även, som angivits, de utfällda kalciumkarbonaterna samt den fortsatta hydratiseringen av ohydratiserade klinkerkorn som sker, när vatten tränger in till kornen. Även det karbonatiserade skiktet (skikt IV) mot luftsidan verkar läckningsreducerande genom att det har lägre permeabilitet än den okarbonatiserade betongen.

Som stöd för påståendet att denna typ av urlakning i normala fall är utan betydelse, kan man göra följande beräkningsexempel:

(Effekterna av karbonatisering och fortsatt hydratisering försummas, vilket gör att man är på säkra sidan).

Exempel

| | | |
|---|---|---|
| Betongdammplatta | tjocklek | $L = 1$ m |
| Vattentryck | | $H = 50$ m $= 5 \cdot 10^3$ cm |
| Genomströmningsyta | | $A = 1$ m$^2$ |
| Permeabilitetskoefficient | | $K \sim 10^{-8}$ cm/sek (se avsnitt 2.4.1) |

$$\text{Läckmängd} \quad Q = 10^{-8} \cdot \frac{5 \cdot 10^3 \cdot 10^4}{100} \cdot 24 \cdot 3600 = 432 \text{ cm}^3/\text{dygn}$$

d v s max $\underline{\sim 0{,}5 \text{ lit/dygn}}$

Den berörda betongvolymen är $V = 1$ m$^3$ och kan räknas innehålla 300 kg cement. Räknar man med det extrema fallet, att vattnet mättas m a p $Ca(OH)_2$, när det passerar genom betongen, får man en maximal urlakning motsvarande:

$$1{,}9 \quad 0{,}5 = 0{,}95 \text{ g } Ca(OH)_2/\text{dygn}$$

eller: $\underline{0{,}72 \text{ g CaO/dygn.}}$

Räknar man betongen förstörd vid 50 % urlakning får man livslängden (cementet räknas innehålla 65 % CaO):

$$T_1 = \frac{300 \cdot 0{,}65 \cdot 10^3}{0{,}72 \cdot 365} \simeq \underline{750 \text{ år}}$$

Räknar man med det av Markestad m fl angivna kriteriet att betongen förstörts, när c:a 2 lit vatten passerat per gram cement får man livslängden:

$$T_2 = \frac{300 \cdot 10^3 \cdot 2}{0{,}5 \cdot 365} \simeq \underline{3300 \text{ år}}$$

Vilka av dessa värden som ger den bästa uppskattningen är något osäkert, men även om man använder de mest ogynnsamma förutsättningarna har man tillräckligt stöd för uppfattningen, att urlakningsrisken kan försummas vid den här beskrivna typen av angrepp. Den valda permeabilitetskoefficienten $K \sim 10^{-8}$ cm/sek är troligen även den vald på säkra sidan, vilket innebär att modern vattenbyggnadsbetong normalt är ännu mindre permeabel. Det framgår emellertid klart av beräkningen

att betongens permeabilitet är den avgörande faktorn för betongens livslängd. Höjs t ex permeabilitetskoefficienten med en faktor 10, så reduceras $T_1$ ovan till 75 år.

Vatten passerande en fri betongyta

Detta fall är ofta diskuterat i samband med undersökningar av betongrörs beständighet mot urlakning och koldioxidhaltigt vatten, se t ex Nielsen och Skovgård/52, och motsvarar även förhållandena i vissa vattenvägar i vattenbyggnader. För en del av dessa tillkommer emellertid ofta en rent eroderande effekt, som accelererar eventuell skadeutveckling. Vid den fortsatta diskussionen av urlakningsmekanismen bortses i första hand från vattnets (och partiklar i vattnets) eroderande effekt. De principiella zoner som kan tänkas uppstå vid denna typ av urlakning är skisserade i fig 44. I de flesta fall har man redan från början ett karbonatiserat ytskikt hos betongen innan den utsätts för vatten, men om betongen utsätts för vattnet innan betongytan karbonatiserats enligt ekvation [13], kommer det att bildas ett sådant skikt på samma sätt som beskrivits tidigare. De principiella stegen vid denna typ av angrepp blir således, att vattnet som innehåller en viss mängd fri $CO_2$ förmår att lösa en del kalciumkarbonat genom att överföra detta till lättlöslig bikarbonat enligt ekvation [12], och detta förs bort med det passerande vattnet. I detta fall kommer lösningen av $CaCO_3$ och således angreppet att ske snabbare ju mer aggressiv $CO_2$ vattnet innehåller. Efter en tid har de olika zoner bildats som angivits på fig 44. Mot vattnet har man först en urlakad zon (zon I), som består av i det närmaste kalkfri kiselgel och vissa andra olösliga järn- och magnesiumföreningen. Därefter har man ett karbonatiserat skikt (zon II), som urlakas från ena sidan och till en viss grad byggs på från den andra sidan genom att något koldioxidhaltigt vatten tränger in i betongväggen. Innanför detta skikt har man en zon (zon III), där det sker lösning av $Ca(OH)_2$, som sedan diffunderar ut mot utan, där kalkkoncentrationen är lägre. Sedan har man zon IV, som karakteriseras som opåverkad av vattnets urlakande effekt. Det här angivna avser den principiella uppbyggnaden av de olika zonerna. M a p angreppshastighet och de olika zonernas tjocklek, har man i första hand erfarenheterna från betongrör att bygga på. I vanliga fall finner man att det urlakade ytskiktet snabbt uppträder som ett skyddande ytskikt, som reducerar vattenomsättning och urlakning från de innanför liggande skikten. Nielsen och Skovgård/52 konkluderar efter en litteraturstudie och värdering av befintliga data från undersökningar av betongrörs

beständighet, att när det urlakade ytskiktet uppnått några få millimeters tjocklek sker den fortsatta urlakningen så långsamt, att effekten är utan betydelse i samband med betong av god kvalitet. Endast vid hög halt av aggressiv kolsyra och porösa, otäta rör får angreppet skadlig omfattning.

Vatten som passerar genom en spricka i en betongdamm

Detta är normalfallet vid den läckning som uppträder i nyare vattenbyggnadskonstruktioner utsatta för ensidigt vattentryck, där vattnet passerar genom konstruktionen via sprickor och otäta fogar. De urlakningszoner, som kan tänkas uppträda vid denna form av angrepp har skisserats i fig 45, som anger urlakningsförhållandena vid en idealiserad spricka. Zonerna I och II är samma ytzoner som skisserats för sprickfri betong på vattensidan i fig 43 och uppgår troligen normalt endast till några millimeters sammanlagd tjocklek vid de låga halter fri $CO_2$ man har i de aktuella vattentyperna.

Den första av urlakningszonerna som har speciell anknytning till förhållandena i sprickväggarna är zon III vid sprickans början på vattensidan. Vattnet som tränger in här innehåller en viss mängd fri $CO_2$ och upptar sedan $Ca(OH)_2$ från betongen och man får en reaktion enligt ekvation [10]. Det $CaCO_3$ som härvid bildas fälls ut i sprickor (eller förs bort med läckvattnet, om läckningen är tillräckligt stor). När vattnet sedan passerar zon IV är det som mjukt, koldioxidfritt vatten, och eftersom betongen i sprickväggarna är okarbonatiserad får man ungefär samma urlakningsbetingelser som när destillerat vatten passerar okarbonatiserad betong, jfr fig 40 och 41. Vattnet upptar således $Ca(OH)_2$ från sprickväggarna och transporterar detta ut ur betongen.

Vid luftsidan har man zon V som består av ett jämnt ytskikt av karbonatiserad betong, som bildats enligt ekvation [13], dels av ett koncentrerat lager av utfälld $CaCO_3$ som bildas vid eller under sprickans utlopp på luftsidan i samband med att vatten avdunstar eller rinner längs betongytan (se fig 30).

Så långt de principiella stegen vid urlakningsangrepp i en spricka eller en läckande fog. När det gäller bedömning av i vilken riktning ett sådant angrepp kommer att utvecklas och värdering av nedbrytningshastigheten kan man emellertid icke stödja sig på ett erfarenhetsmaterial av samma vikt och omfattning som vid de två övriga beskrivna formerna av

urlakningsangrepp. För små sprickor med liten läckmängd är det troligt att den tätande effekten av utfällda kalciumkarbonater och fortsatt hydratisering av ohydratiserade klinkerkorn i sprickväggarna kommer att reducera läckningen till dess att man får en självtätning - eller självläkning - av sprickan. Denna form av "autogen läkning" av sprickor finns beskriven i litteraturen, se t ex Rasheeduzzafar/77 och Bogue/78, och den har observerats på dammar av bl a Nilsson/79. För större sprickor, d v s sprickor som är tillräckligt stora för att ge en mer omfattande läckning i form av vatten-utsippring eller -rinning längs och under sprickan på nedströmssidan, överväger den urlakande effekten från zon IV och vattnet innehåller större vikt- och volymmängd lösta ämnen, när det kommer ut ur dammen än när det går in, och man kan icke påräkna självtätning av sprickan. Den ringa mängd aggressiv $CO_2$ man har i de aktuella vattentyperna, normalt < 10 mg/lit, är i dessa fall en nackdel, eftersom den tätande effekten av utfälld $CaCO_3$ övervägs av mängden bortförd $Ca(OH)_2$ (se bilaga 7 med utförda vattenanalyser vid Storfinnforsen).

Det är denna senare typ av sprickor som är aktuell i de fall man kunnat observera, att läckningen pågått över flera år utan att man ser någon klar tendens till reduktion genom självtätning. Problemställningen för vidare undersökningar av kalkurlakningsriskerna vid sprickor blir således: Vilken utveckling kan förväntas m a p betongförstörelse genom kalkurlakning, när vatten med kalklösande kapacitet motsvarande destillerat vattens, passerar genom en spricka? Denna fråga kan man f n icke besvara fullständigt utan här kan endast skisseras en kvalitativ bedömning av tänkbar utveckling och inverkande faktorer.

Följande faktorer anses medverka vid bestämmandet av nedbrytningshastigheten:

1. Cementkomponenternas löslighet i vatten
2. Lösningshastigheten
3. Hydrolyshastigheten vid hydrolys av kalciumhydrosilikater
4. Diffusionshastigheten för $Ca(OH)_2$ genom betong och urlakad kiselgel
5. Vattensippring genom betongen ut mot sprickan (dränerande effekt av sprickan)
6. Vattnets genomströmningshastighet i sprickan

Under den första tiden av läckningen är det stor tillgång på lättlösliga föreningar, huvudsakligen fri $Ca(OH)_2$ i sprickväggarna, och läckvattnets halt av kalk kan väntas vara högst i det inledande urlakningsstadiet, se fig 38. Efter en tid är den fria kalciumhydroxiden i sprickytorna urlakad och den fortsatta urlakningshastigheten kommer att bestämmas av avspaltningen av kalk från kalciumhydrosilikaterna i ytan, diffusion av kalciumhydroxid från betongen längre in i sprickväggen samt strömning (sippring) av kalkmättat vatten från den kringliggande betongen genom att det uppstår ett tryckfall ut mot sprickan.

I sprickväggarna kommer det att bildas ett skikt av urlakad kiselgel och oläsliga järn- och magnesiumföreningar som beskrivits tidigare, och urlakningshastigheten kommer att reduceras allteftersom detta skyddande skikt bildas. Läckningshastigheten vid den aktuella typen sprickor är normalt tillräckligt stor för att vattnet ej skall hinna mättas med kalciumhydroxid under passerandet genom betongen. Kalkinnehållet i vattnet vid sprickan på nedströmssidan är normalt långt under mättnad (se vattenanalyserna, bilaga 7 ).

Variationen i läckningshastigheten ger således icke direkt motsvarande variation i urlakningshastihet utan vid ökad läckningshastighet får man sänkt kalkkoncentration i läckvattnet. Den resulterande effekten på urlakningshastigheten kan endast bestämmas genom fältmätningar eller laboratorieundersökningar.

Detta gäller även den samlade effekten av samtliga angivna faktorer, som anses påverka kalkurlakningsmekanismen i sprickor. Tillgängliga data och kännedomen om hastigheten i de medverkande mekanismerna är otillräckliga för en kvalificerad bedömning av skaderisken och en säker uppskattning av nedbrytningshastigheten. För att skaffa närmare information om dessa frågor har man hittills utfört följande:

1. Fältinspektioner och observationer på äldre konstruktioner
2. Läckmätning och vattenanalyser
3. Utborrning av betongkärnor för värdering av betongens tillstånd invid sprickorna

Undersökningarna har i första hand begränsats till dessa punkter, eftersom man härigenom relativt snabbt kunde få svar på frågorna om eventuella nära förestående risker och reparationsbehov på befintliga konstruktioner.

# 3. Utförda undersökningar

## 3.1 Fältinspektioner

De fältinspektioner som har rapporterats av Bergström och Nilsson/23 omfattade 6 anläggningar med ålder från c:a 5-30 år. Förekomst av kalkutfällningar har allmänt observerats i samband med läckande sprickor, men besiktningarna gav inga exempel på allvarlig yttre betongförstörelse med utgångspunkt från sprickorna. Enstaka lokala skador vid gjutfogar bedöms vara orsakade av en kombinerad effekt av läckning och frost. Vid diskussionen av riskerna för urlakningsangrepp i sprickväggarna hävdar förf, att man borde kunna studera dessa genom att inspektera fria betongytor, som varit utsatta för vatten över en längre tid, t ex dammarnas uppströmssida. Enligt diskussioner av olika angreppsformer i föregående avsnitt kan man emellertid icke anse, att förutsättningarna för angrepp i sprickorna är desamma som på fria ytor. Trots detta ansågs det vara av intresse att studera förekomsten av eventuell betongförstörelse från ytorna på betongkonstruktioner som under längre tid utsatts för överströmmande vatten. Som lämpligt studieobjekt fanns en c:a 50 år gammal avloppstunnel vid "Västerdalälvens Kraftverk" samt intag och turbinsumpar vid "Bergviks gamla kraftstation".

Avloppstunneln var c:a 1400 m lång och var utfodrad med betong i vissa delar, speciellt vid sugutloppen från kraftstationen och vid tunnelutloppet. Tunneln hade vid inspektionen utsatts för vattengenomströmning under c:a 50 år, den övre hälften som trycktunnel och den undre c:a 70 % fylld. Vattenhastigheten var 1-2 m per sek. Betonggjutningen vid sugutloppen var speciellt noggrant utförd med slätputsade ytor, medan övriga gjutningar vara mera grovt utförda. Betongen vid sugutloppen var i utmärkt skick med max 1 å 2 mm tjockt löst ytskikt, medan den övriga betongen verkade mera lös och urlakad i ytan. Det lösa ytskiktet var här 1-2 cm tjockt och gick vid gjutforgar något djupare in i väggen. Som allmänt omdöme gäller emellertid, att urlakningsskadorna bedömdes vara utan betydelse för tunnelns funktion.

"Bergviks gamla kraftstation" var vid inspektionen c:a 45 år gammal och undersökningen omfattade intagen och väggarna i turbinsumparna på vattensidan. De tillgängliga data från gjutningarna var mycket ofullständiga. Betongen i själva turbinsumparna angavs gjuten med blandningsförhållande 1:4:4 och vissa stöd- och ledmurar hade utförts med mager betong, 1:5:7 med stor halt "sparsten".

Besiktningen visade att väggarna i sumparna var fullt intakta med endast 1-2 mm ytfrätning, varunder ytan var mycket hård och betongen tät och svår att mejsla i, se fig 46 (samt fig 18, del I). Vid den magra fyllnadsbetongen i ledmurarna observerades omfattande betongförstörelse på luftsidan, se fig 47 a och b. Dessa skador bedömdes vara uppkomna genom en kombinerad effekt av urlakning genom den magra betongen och frostangrepp. Vattensidan var inte angripen i samma grad.

Vid de besiktningar som utfördes i den under del I beskrivna korrosionsundersökningen på vattenbyggnader kunde även förekomst av ytskador på en del konstruktioners uppströmssida studeras. De konstruktionsdelar man hade tillgång till var i huvudsak regleringsdammarnas stödpelare vid landfästen, flottningsutskov, luckutskov och avloppstunnlar. För de angivna konstruktionsdelarna gäller allmänt att de var hårt utsatta för mekanisk nötning av is och timmer samt stark frostverkan i tillägg till eventuell yturlakning. I allmänhet var ytorna uppluckrade och anfrätta upp till 1 á 2 cm djup med lokalt mera djupt gående skador vid gjutfogar, se t ex fig 48.

Dessa observationsställen ger emellertid inga renodlade urlakningsskador, utan huvudorsaken till ytangreppen bedöms vara frostväxlingarna vid regleringsdammarna samt de hårda mekaniska påfrestningar ytorna utsätts för.

Krångfors kraftstation vid Skellefteå byggdes i två etapper, den första avslutades år 1928 och den senare år 1948. Vid den senare påbyggnaden förstärkte man och tätade den gamla dammen genom att gjuta en ny platta bakom den gamla frontplattan. Samtidigt ökade man dammens höjd genom påbyggnad. Dammen visar exempel på omfattande avlagringar av urlakad kalk, och den inspekterades i februari 1965 för studium av skador och värdering av reparationsbehov. De mest omfattande avlagringarna av kalk var koncentrerade till utloppen för läckage mellan den gamla och den nya betongen. Inga skador kunde ses på den nyare betongen. Urlakningen anses huvudsakligen ske vid porösa, otäta delar av den gamla betongen samt i fogen mellan gammal och ny betong och kan endast studeras på borrprov från dessa partier.

De utförda fältinspektionerna ger stöd för uppfattningen att ren yturlakning från fria betongytor, som utsätts för överströmmande vat-

ten, i normala fall med tät, homogen betong i ytorna är en mycket långsam nedbrytningsprocess som bör kunna anses betydelselös vid de aktuella konstruktionerna. Inspektionerna ger inga informationer om angreppsutvecklingen i sprickväggarna i de fall urlakningen sker genom läckande sprickor. För att närmare kunna studera denna angreppsform måste man utföra läckagemätningar och analyser på vattnet före och efter passage genom dammen, så att man kan få en uppfattning om storleken av de kalkmängder som förs ut ur betongen. Vidare måste man utföra utborrning av prov från betongen i sprickväggarna för att på dessa studera graden av betongförstörelse, som orsakats av läckningen genom sprickorna. Dessutom bör mekanismen mer i detalj kunna studeras genom laboratorieförsök.

## 3.2 Läckningsmätning och vattenanalyser

Under vintern 1962 påbörjade Krångede AB observation av läckning och kalkurlakning vid några typiska sprickor vid bolagets damm i Storfinnforsen. Läckningsmätningarna sker genom att läckvattnet samlas upp i rännor som klistrats på dammfronten under de sprickor man önskar undersöka. Observationsställena består av ränna 1 och ränna 2 på monolit 47, se fig 49, och ränna 3 på monolit 43, se fig 50. Ränna 1 är den övre rännan i fig 49 och är en avledningsränna, som leder bort eventuellt vatten från sprickorna över den spricka man önskade undersöka. Den undre rännan, ränna 2, samlar således upp vattnet enbart från en spricka. Vid ränna 3 på monolit 43 har man ej monterat en motsvarande avledningsränna, och observationerna från ränna 2 är således de som ger de bästa informationerna betr läckningen genom en enda spricka.

Vid monolit 47 inbyggdes mätställena med en isolerande bakvägg och utrymmet uppvärmdes så att temperaturen där ligger mellan + 10 °C och + 15 °C. Genom denna åtgärd önskar man studera effekten av en värmeisolerande bakvägg m a p självläkning av mindre sprickor och läckningsreduktion genom att sprickvidden reduceras vid högre temperatur under vintern.
Vid monolit 43 har man utomhusklimat med temperaturvariationer mellan c:a + 20 °C och ÷ 20 °C. En fullständig beskrivning av observationsställena och de förberedande arbetena har lämnats av Nilsson/80.

Vid matrännorna görs regelbundna observationer över läckmängd (lit/tim),

samtidigt som man får kontinuerliga observationer betr vatten- och lufttemperatur vid mätställena. Dessutom tas vattenprover för vattenanalys dels vid mätrännorna, dels från vattnet på uppströmssidan av dammen. Vattenproverna från uppströmssidan tas vid dammfronten på c:a 25 m djup samt i vissa fall vid ytan eller vid turbinsumparna. Provtagningarna utförs av driftspersonal vid dammen, och vattenanalyserna sker vid Cement- och Betonglaboratoriet i Limhamn. Vattenanalyser utfördes under den första tiden något oregelbundet men tas sedan den 1.7.64 regelbundet 1 gång per månad. Vattenproverna har analyserats m a p pH-värde och aciditet samt halterna av Ca, K, Na och Fe. Genom att räkna differensen mellan vattnets halt Ca i mg/lit vid nedströms - respektive uppströmssidan får man ett värde på den mängd Ca (eller CaO) som lakas ur betongen per lit passerad vattenmängd vid olika läckningshastigheter. Om man sedan multiplicerar dessa värden med läckmängden i lit/tim, får man fram värden på urlakningshastigheten vid olika tidpunkter mätt som utlöst Ca i mg/tim (mg/h).

Observationsresultaten och analysvärdena m a p pH och Ca-halt för perioden 1962-1966 har sammanställts och bearbetats i bilaga 7. En förutsättning för att man på detta sätt skall få kännedom om den urlakning som sker inne i sprickan är, att man kan anse vattenproverna, som tas ovan dammen, vara representativa för vattnets tillstånd, när det tränger in i sprickan. Det är här tänkbart att denna föutsättning ej är fullständigt uppfylld genom att det kan ske en ytutlösning från dammens vattensida som orsakar att vattnet har en något högre halt Ca, när det tränger in i sprickan än det som de angivna vattenanalyserna ger. Detta diskuteras bl a av Myran/75, som en möjlig orsak till att vattenanalyserna ger indikationer på högre grad av betongförstörelse i sprickorna än det man vid inspektion och undersökning av betongen kan observera. Utlösningen från en fri betongyta sker emellertid som tidigare beskrivits mycket långsamt, bl a genom karbonatiseringseffekten, samtidigt som vattenomsättningen längs dammfronten gör att ytutlösningens inverkan på kalkkoncentrationen i vattnet bör kunna försummas. För närmare information om denna effekts storlek fordras emellertid detaljstudier av vattenprovtagningen vid dammfronten.

Vattenanalyserna är något ofullständiga för större delen av året 1963 samt första hälften av 1964 men är i övrigt i det närmaste fullstän-

diga för det inbyggda utrymmet, monolit 47. Vid monolit 43 (utomhus) försvåras provtagningen vintertid på grund av isbildning, varför man under vinterperioden icke har några observationer.

I bilaga 8 är uppritat diagram över samhörande värden på läckning i lit per tim (ℓ/h) och utlöst Ca i mg per tim (mg/h) vid ränna 2 i det uppvärmda utrymmet för hela observationstiden.

Utomhus har man stora årsvariationer med mycket stark läckning under den kalla årstiden och mycket låg läckning under sommaren och den första delen av hösten. Även i det inbyggda utrymmet har man någon årsvariation, men värdena är ej så extrema som utomhus. Vid ränna 2 varierade läckningen under 1965 mellan < 1ℓ/h och c:a 10 ℓ/h. Man finner här en markant reduktion i läckningen från försökens början. Läckningen under perioden 1964/65 är endast ungefär 1/3 av läckningen under perioden 1962/1963. Urlakningshastigheten, mätt som kalkkoncentration i läckvattnet, varierar mellan 6 och 38 mg Ca/ℓ, men det framgår inget klart samband mellan läckningshastighet och kalkkoncentration i läckvattnet. Ett förväntat samband är att koncentrationen skall öka med lägre läckningshastighet. Spridningsintervallet (differensen mellan max- och minimivärdet) är vid ränna 2 avsevärt lägre än vid de två andra rännorna. Vid dessa rännor har man störande inverkan från läckningen genom andra sprickor och vid ränna 3 gör isbildningen vintertid som nämnts att observationerna blir ofullständiga. Den totala urlakningshastigheten, angiven som urlakad Ca i mg per tim (mg/h), följer i stora drag variationerna i läckningshastighet. Kalkkoncentrationen i läckvattnet har således icke ändrats väsentligt under observationsperioden, men den totala urlakningen visar en reduktion, som ungefär motsvarar läckningsreduktionen. Detta är alltså en gynnsam effekt av bakväggen och uppvärmningen, men det är ännu för tidigt att avgöra, huruvida det sker en självläkning av sprickan eller om läckningsreduktionen endast har orsakats av att sprickvidden minskats genom temperaturhöjningen. Läckningen vid mätrännan utomhus visar ingen klar tendens till att ha ändrats under observationstiden, men observationerna här måste betraktas som osäkra genom de svåra mätningsförhållandena, som råder under en stor del av året.

De pågående läckmätningarna och vattenanalyserna anses vara mycket värdefulla som en kontroll och uppföljning av läckningens utveckling och av kalkurlakningen vid sprickorna, och de har föreslagits få fortsätta ytterligare flera år. Provtagningstekniken bör emellertid för-

bättras och man bör ha avledningsrännor över samtliga sprickor, som man önskar undersöka. En förbättring av rännorna har föreslagits som skisserats i fig 51.

Effekten av en isolerande bakvägg och uppvärmning av utrymmet mellan väggen och dammytan har varit gynnsam m a p läckningen, och därigenom även m a p kalkurlakning. Bedömningen av den läckningsreducerande effekten av isoleringen och uppvärmningen är emellertid något osäker eftersom man ej har läckningsmätningar vid den inbyggda monoliten för perioden innan bakväggen uppfördes. Vid ränna 3, monolit 43, har man nu mätningar över drygt 4 år, och man överväger möjligheten att bygga in och värma upp även utrymmet vid denna monolit för att få en säker bedömning av bakväggens effekt.

De uppmätta läckningsvärdena och resultaten av de kemiska analyserna av vattnet kan användas vid en uppskattning av storleken av den totala mängd kalk som lakats ut ur dammen genom en enda spricka under dammens första 11 år. (11 år motsvarar dammens ungefärliga ålder när provkärnorna ur betongen borrades sommaren 1963, och sprickorna kan räknas ha uppkommit redan från början.) Mätningarna från ränna 2 används vid beräkningarna, eftersom dessa är de som bäst motsvarar förhållandena vid urlakning genom en någorlunda väldefinierad spricka. Sprickorna är närmast horisontella och mätningarna omfattar delarna av frontplattan mellan stödpelarna och dilatationsfogarna mellan monoliterna (T-monoliter). Plattans tjocklek vid mätställena är c:a 180 cm och avståndet från stödpelarna till dilatationsfogarna är 300 cm. Minimum sprickyta är således $1{,}8 \cdot 3{,}0 = 5{,}4\ m^2$. På grund av att sprickorna är oregelbundna blir emellertid den verkliga sprickytan väsentligt större.

Medelurlakningen under det första observationsåret vid ränna 2 är c:a 250 mg Ca/h och sjunker sedan avsevärt under senare år och är c:a 60 mg Ca/h för åren 1964/1965. Eftersom man emellertid får räkna med att den urlakningsreducerande effekten av bakväggen gör sig gällande redan under första året, samt att tillgången till lättlöslig kalciumhydroxid varit större de första åren, är det rimligt att räkna med att medelurlakningen under dammens första 11 år har varit något högre än 250 mg Ca/h. Det räknas i fortsättningen med 300 mg Ca/h som medelvärde för denna period. En uppskattning som denna är givetvis osäker men bör kunna ge en orientering om vilka mängder det kan röra sig om. Detta ger således att $\frac{3{,}0 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 11}{10^4} = \underline{29\ kg}$ Ca har lakats ur genom denna

spricka fram till tidpunkten för provborrningarna. Den aktuella betongen har en cementhalt på c:a 300 kg/$m^3$ (std) och som tidigare har angivits motsvarar detta c:a 192 kg CaO, eller c:a 137 kg Ca per $m^3$ betong.

Den uppskattade urlakningen motsvarar således en totalt urlakad betongvolym av c:a 200 lit. Om urlakningen sker som framskridande yturlakning från sprickorna, ger denna beräkning att en c:a 4 cm tjock betongskiva genom dammen har urlakats totalt, eller c:a 2 cm urlakning in från sprickan till bägge sidor.

## 3.3 Utborrning av provkärnor

### 3.3.1 Storfinnforsdammen

Läckningsmätningarna och vattenanalyserna vid Storfinnforsdammen indikerade att omfattande betongförstörelse kunde ha skett i betongen intill sprickorna. Man borrade därför ut provkärnor som passerade sprickorna i olika lägen i dammen för att studera, på vilket sätt urlakningen fortplantade sig in i betongen från sprickväggarna. Kärnborrningen utfördes sommaren 1963, och totalt utborrades 7 kärnor med diam 13,2 cm och 13 kärnor med diam 4,2 cm, motsvarande 4,3 borrmeter av de största kärnorna och 30 borrmeter av den mindre typen. Som lämpliga provtagningsställen utvaldes dels en spricka i monolit 42 (spricka 42:7), som i fråga om läckning och kalkutfällning bedömdes vara jämförbar med de sprickor som användes för läckningsmätningarna, dels en gjutfog i monolit 7. De utvalda provställena bedömdes vara representativa för kalkurlakningsförekomsten som den yttrar sig vid ett flertal av de läckande sprickorna och fogarna i dammen. Vid borrningen fördes den stora borrkronan parallellt med sprickan/fogen så att denna låg c:a mitt i provkärnan, se fig 52. De små kärnorna borrades vertikalt, så att de korsade sprickorna i olika lägen i frontplattan, se fig 53. Borrhålens placering och riktning har inritats på fig 54 a och b.

Borrningen visade att sprickorna i det närmaste gick rakt igenom dammen, och att sprickorna ej visade någon tendens till omfattande förgrening in i dammen. Vid en av kärnorna delades emellertid sprickan upp till två sprickor, när den närmade sig uppströmssidan.

Av borrningstekniska och praktiska skäl kunde de långa kärnorna ej tagas ut i hela stycken, utan de delades i lämpliga sektioner. Betongen i kärnorna var, visuellt bedömt, god och sammanhängande, och man stötte icke på något fall av allvarliga gjutskador och sår. Vid sprickorna fick man i regel prov, där sprickornas läge och form klart framgick. Vid ett par tillfällen tappades några bitar och korn från sprickorna genom att borrkronan skar sig fast vid sprickan eller att den inre delen ej följde med vid utdragningen av kärnan. Som helhet gäller emellertid att man mycket väl fick med prover av betongen vid sprickorna utan att tappa några bitar.

I samband med provtagningarna utfördes en okulär besiktning av betongen vid sprickorna, och resultaten från dessa besiktningar var entydigt de samma för samtliga utborrade prov, d v s både för kärnorna som passerade sprickor och för de som passerade gjutfogar.

Betongen in mot sprickorna (eller fogarna) var uppluckrad och lös endast mycket ytligt i själva sprickväggarna. Detta lösa skikt var brunaktigt i färgen och uppgick till maximalt 2 å 3 mm tjocklek. I övrigt kunde ingen förstöring av betongen ses vid den rent okulära besiktningen. Eventuell nedgång i hållfasthet och ökad porositet som följd av urlakning kan således endast bedömas genom mer noggranna analys- och provningsmetoder. Besiktningsresultatet är emellertid m a p frågan om betongens kvalitet vid sprickorna positivt och ger entydigt besked om att hittills har ingen allvarlig betongförstörelse som följd av urlakning skett vid de undersökta sprickorna under den period som läckningen pågått.

### 3.3.2 Krångfors Kraftstation

De tidigare nämnda besiktningarna av Krångfors Kraftstation visade att det pågick urlakning av kalk från dammen genom sprickor i frontplattan och i synnerhet genom läckningen i fogarna mellan gammal och ny betong. En del begränsade vattenanalyser, som utförts vid kraftstationen, visade att läckvattnets hårdhet, mätt med tyska hårdhetsgrader ($^{o}$dH) ökade 0,3 - 0,7 $^{o}$dH under vägen genom dammen. Detta motsvarar en mycket måttlig urlakning av c:a 5 mg Ca/ℓ vid den läckning, som f n pågår. Då urlakningen under dammens tidigare år troligen varit högre, vilket bl a de förhållandevis rikliga kalkavlagringarna tyder på, utförde man provborrning för att närmare studera eventuella skador på den äldre

betongen. Borrningarna utfördes våren 1965. Borrhålens placering framgår av fig 55 a och b. Kärnorna 1-4 passerar både den äldre och den yngre betongen (från 1928 resp 1948) och innehåller även prov från fogarna mellan gammal och ny betong. Den läckning som sker genom otäta områden och sprickor i den gamla delen av betongdammarna, leds enligt inspektionerna till en stor del längs med fogen mellan dessa två gjutningsdelar. Kärnorna kan således i första hand ge information om de ungefärliga kvalitetsnivåerna på betongen från de två etapperna samt i vilken omfattning skador genom urlakning har skett i fogarna. Kärna 5 anses ge ett referensprov på ostörd betong från den första utbyggnadsetappen.

Kärnorna 6 - 8 är prov som är utborrade vid sprickor i frontplattan till en anslutningsdamm, som uppfördes år 1928. Vid denna konstruktionsdel har man omfattande sprickbildning och kalkutfällningar, se fig 56.

Totalt utborrades 8 kärnor med diam 10,7 cm till en samlad längd av c:a 7,5 m. Resultaten från besiktning och provning av kärnorna är sammanställda i bilagorna 9 och 10.

Av proverna framgår speciellt att man vid ett par av kärnorna funnit klara exempel på förhållandevis djupt gående urlakning vid läckande fogar (hål 2 och 4), där de lösa "totalt" urlakade skikten har en tjocklek från 5-20 mm med en viss reservation för det högsta värdet, eftersom vissa delar av betongen vid fogen totalt saknades. Möjligen har dessa lätt sönderfallande bitar spolats bort under borrningarna. Man finner även, att den äldre betongen i frontplattan är dålig och ej har kunnat ge tillfredsställande borrkärnor.

De grova och delvis subjektivt präglade bedömningsmetoder som använts vid dessa första värderingar av betongens tillstånd ger emellertid ej underlag för en indelning i olika urlaknings- och skadegrader utan kan endast ge indikationer på, att det i vissa områden av betongen skett omfattande nedbrytning genom urlakning. För ett grundligare studium av urlakningsgraden i olika lägen av betongen måste tillgripas metoder som kemiska analyser eller mikroskopiska studier av tunnslips. Detta har ej utförts på proverna från Krångfors Kraftstation.

## 3.4 Ultraljudmätningar vid Storfinnforsdammen

I samband med utborrningen av provkärnor från Storfinnforsdammen utfördes några försök att studera betongens kvalitet genom mätning av dess ljudhastighet. Under de senaste årens strävan att utveckla icke-förstörande provningsmetoder för kontroll av t ex betongkvalitet har man även försökt använda ljudhastighetsmätningar på betong vid fältundersökningar, se t ex Breuning/81 och 82. Metoden är emellertid mycket känslig för inhomogeniteter i betongen, varierande fukthalt, förekomst av grova stenar, sprickor och porositeter m m. Möjligheterna att med denna metod lokalisera mindre variationer och reduktioner i betongens kvalitet förefaller således vara mycket begränsade. Enligt Breuning bör man emellertid kunna bestämma den ungefärliga nivån av betongens kvalitet och även lokalisera områden med speciellt dålig betong. En grov indelning av betongens tillstånd vid olika ljudhastigheter visas i tabell 16.

Tabell 16. Sambandet ljudhastighet - betongkvalitet (enligt Breuning/82)

| Ljudhastighet km/sek | Betongens tillstånd |
|---|---|
| Över 4,60 | Mycket god |
| 3,65 - 4,60 | God |
| 3,05 - 3,65 | Dålig - God |
| 2,10 - 3,05 | Dålig |
| Under 2,10 | Mycket dålig |

De angivna värdena förutsätter att betongen är homogen och sprickfri. Ultraljudmätningarna vid Storfinnforsdammen utfördes bl a för att man skulle få erfarenhet av metodens användbarhet som ett supplement till utborrning av provkroppar vid fältundersökningar av skador. Man önskade bl a undersöka om en eventuell försämring av betongens kvalitet i anslutning till läckande sprickor och fogar kunde observeras genom att sådana områden visade nedgång i ljudhastigheten genom betongen. Mätningarna försvårades emellertid p g a att man icke kunde mäta genom dammen på olika avstånd från sprickorna, utan man var hänvisad till att mäta längs betongytan på dammens nedströmssida. Värde-

na ger således endast information om ytskiktets kvalitet. Dessa områden av betongen är i mindre grad utsatta för urlakning, medan risken för frostskador är avsevärt högre genom att läckningen gör att betongen i ytan har hög fukthalt.

Vid mätningarna användes CBI:s utrustning, "Ultrasonic Materials Tester", type UCT/2, tillverkad av Cawkell i England. En utförlig beskrivning av utrustningen har bl a lämnats av Petersons/83.

Vid fältmätningarna bestämdes ljudhastigheten genom betongen invid en dilatationsfog mellan två av monoliterna (monolit 7 och 8) samt på olika avstånd från en gjutfog, som visade omfattande läckning och urlakning (grad 4 vid värdena efter den skala 1-5 som användes vid fältinspektionerna, se sid 19). Mätpunkternas placering framgår av fig 57 och bilaga 11. Resultaten från mätningarna är sammanställda i bilaga 12.

Som en kontroll på mätningarna utfördes även ett antal mätningar i laboratoriet på provkroppar, som utsågats ur två av de utborrade provkärnorna. Den ena av kärnorna (nr 13 b, se fig 54 b) passerar den läckande gjutfogen i monolit 7, och den andra kärnan (nr 15) har borrats in i monolit 8 vid dilatationsfogen mot monolit 7. Resultaten av mätningarna har sammanställts i bilaga 13 och 14. De uppmätta ljudhastigheterna vid fältmätningarna och vid laboratoriemätningarna ligger i samma nivå, mellan 4,3 km/sek och 5,9 km/sek med de flesta värdena i området 4,6 - 5,0 km/sek. Två mätvärden var extremt låga, 2,3-2,5 km/sek, men avläsningarna var mycket osäkra vid dessa två mätningar, varför de ej kan tilläggas någon vikt. Mätningarna indikerar att betongen är av god till mycket god kvalitet, men det ringa antalet observationer ger inget underlag för ytterligare uppdelning av den undersökta betongen i olika kvalitetsområden. De utförda mätningarna är mycket begränsade och kan karakteriseras som ett rent orienterande försök. Metodens användbarhet för undersökningar av den avsedda typen har ej kunnat klarläggas. För detta fordras det ett avsevärt större antal mätningar kombinerade med provtagning för kalibrering av mätningarna, vilket ej var möjligt under de utförda fältarbetena. En möjlig nytta av provningsresultaten har man i samband med upprepning av mätningarna efter t ex 5 á 10 år.

## 3.5 Analyser av betongen i kärnorna

### 3.5.1 Kemisk analys

Den okulära besiktningen av kärnorna från Storfinnforsdammen visade att de synbara skadorna i sprickväggarna var begränsade till ett ytligt skikt av max 2 á 3 mm tjocklek. Om man utgår från att angreppet sker som koncentrerat ytangrepp är det dålig överensstämmelse mellan den observerade skadeomfattningen och det man väntat sig på grundval av de utförda vattenanalyserna. För att få att säkrare underlag vid uppskattning av vilken urlakad kalkmängd som motsvaras av de observerade skadorna, har man utfört kemisk analys på en av kärnorna. Den kemiska analysen utfördes vid Cement- och Betonglaboratoriet i Limhamn, och man undersökte betongen i området intill sprickan i kärna 6 b (se fig 54 a). Vid analyserna bestämdes provernas halt av CaO och $SO_3$ på olika avstånd från sprickytan och genom att sätta halten CaO i relation till halten $SO_3$ får man ett relativt mått på urlakningsgraden. Denna metod förutsätter, att betongens ballast icke innehåller löslig kalk eller svavel, och att cementets halt av $SO_3$ kan anses ha bundits i svårlösliga föreningar och således icke kan urlakas av vatten under läckningen. Enligt CBL kan dessa förutsättningar anses vara uppfyllda. Resultaten från analyserna visas i tabell 17.

Tabell 17 Kemisk analys på provlärnor

| Provets läge | $CaO/SO_3$ | Urlakningsgrad % | Anm |
|---|---|---|---|
| Lösa bitar i sprickan | 30 | 33 | 100 % urlakningsgrad motsvarar att cementet totalt urlakats m a p CaO |
| Sprickväggens yttre skikt 0-1 mm | 38 | 15 | |
| 1-5 mm in från sprickan | 40 | 11 | |
| 30 mm " " " | 45 | < 1 | |

Värdet $CaO/SO_3$ = 45 anses i det närmaste motsvara förhållandet $CaO/SO_3$ i det använda cementet, och dessa analyser indikerar således att urlakningen är obefintlig, när avståndet från sprickan överstiger 30 mm.

Urlakningsgradens variation med avståndet från sprickan har skisserats i fig 58, och i tabell 18 anges en ungefärlig medeluralkningsgrad i olika skikt in mot sprickan.

Tabell 18. Urlakningsgrad vid sprickan (enl CBL:s analyser)

| Skikt | Avstånd från sprickan, mm | Urlakningsgrad, medel % |
|---|---|---|
| I | 0-1 | 20 - 25 % |
| II | 1-10 | 10 - 12 % |
| III | 10-30 | 5 % |
| IV | > 30 | < 1 % |

### 3.5.2 Mikroskopisk tunnslipsanalys

Vid SBI (Statens Byggeforskningsinstitut) i Köpenhamn har man utvecklat en metod för att genom mikroskopiska studier på tunnslipsprov av betong bestämma provernas halt av kalciumhydroxid. Metoden finns beskriven av Larsen/51, och framställningen av tunnslipsproverna kan studeras i en uppsats av Andersen och Hjorth-Petersen/84. Metoden har enligt Larsen använts vid undersökningar av betong som skadats genom olika former av kalkurlakning, och man har funnit god korrelation mellan de studerade provernas halt av $Ca(OH)_2$ och övriga metoder att karakterisera betongens tillstånd. Vid metoden bestäms endast betongens halt av $Ca(OH)_2$ i olika delar, men man kan förutsätta att urlakningen av $Ca(OH)_2$ och den allmänna nedbrytningen av kalciumhydrosilikaterna till en stor del sker parallellt.

Som ett supplement till den kemiska undersökningen av betongen har man även låtit utföra tunnslipsanalyser på betong från två av kärnorna från Storfinnforsdammen. De undersökta kärnorna är:

Kärna 6 a. Avsnittet 245-298 cm. Spricka vid 277 cm.
" 5 b. " 195-290 cm. " " 256 cm.

Kärnorna är m a p lokalisering och utseende jämförbara med kärna 6 b, som undersöktes vid CBL. Av dessa kärnor har totalt uttagits och ana-

lyserats 9 tunnslip. Tunnslipsprovernas lokalisering i kärnorna har inritats i fig 59 (efter Larsen/85), och proverna har arrangerats så att man skulle få god information om variationen av halten $Ca(OH)_2$ på olika avstånd från sprickorna. Tunnslipsproverna omfattar således betong på ett avstånd av upp till 50 cm från sprickan, dock med de flesta mätningarna från området 0 - 1 cm från sprickan. Utförandet av mätningarna och resultaten har rapporterats av Larsen/85.

Huvudresultaten från dessa undersökningar är att betongen i ytskiktet mot sprickan är i det närmaste totalt urlakad på fri kalciumhydroxid in till 2 á 3 mm djup. Därefter stiger halten kalciumhydroxid i porerna mycket raskt, och när avståndet från sprickan överstiger c:a 15 mm karakteriseras betongen som opåverkad av urlakningen. I fig 60 återges från rapporten ett generaliserat diagram för $Ca(OH)_2$-innehållets variation med avståndet från sprickan. Förekomsten av de i figuren antydda zonerna B och C är svårförklarlig, och det kan här endast anges, att de utförda tunnslipsanalyserna antyder, att det kan bildas en ackumuleringszon med hög halt $Ca(OH)_2$ in mot det totalt urlakade området. I övrigt överensstämmer resultaten från dessa analyser mycket bra med resultaten från de kemiska analyserna, och de båda överensstämmer med resultaten av den okulära besiktningen av kärnorna.

## 3.6 Värdering och diskussion av erhållna resultat

De utförda fältinspektionerna visar exempel på att urlakningen från fria betongytor, som utsätts för vatten av den karaktär som är aktuell vid flertalet av de svenska vattenbyggnaderna, sker mycket långsamt. Betong som utsatts för stora vattenmängder i c:a 50 år var urlakad och lös i ett skikt av endast några millimeters tjocklek. Fältinspektionerna visade flera exempel på stora mängder urlakad kalk i anslutning till läckande sprickor och fogar vid olika anläggningars luftsida. Urlakningens effekt på betongens kvalitet kunde emellertid ej värderas vid fältinspektionerna.

Läckningsmätningar och vattenanalyser visar att det sker en fortskridande urlakning av kalk genom läckvattnet från sprickor och fogar. En uppskattning av medelurlakningen genom en spricka för Storfinnforsdammens 11 första år ger, att c:a 29 kg Ca har lakats ur genom denna spricka, eller 300 mg Ca per tim. Värdena är osäkra men överensstämmer väl med resultat från liknande undersökningar redovisade av

Sällström/86, som anger värden motsvarande en urlakning av storleken 0,5 - 1,0 kg Ca per år vid en läckande gjutfog och upp till 10-15 kg Ca per år vid en dilatationsfog. De angivna värdena för urlakningshastigheten är tillräckligt stora för att inge farhågor betr betongens bestånd invid sprickorna.

För att närmare studera betongens tillstånd i sprick- och fogväggarna har man borrat ut provkärnor som passer en läckande spricka och en gjutfog i olika lägen i dammen. Samtliga borrkärnor har besiktigats okulärt, och vissa delar har analyserats kemiskt och undersökts mikroskopiskt. Resultaten av de tre använda besiktningsmetoderna överensstämmer väl och visar att betongförstörelsen från sprickytan och in omfattar i första hand ett starkt urlakat skikt på intill 3 mm tjocklek. Därefter avtar urlakningen snabbt och de använda metoderna visar ingen mätbar urlakning, när man kommer 15-30 mm in i betongen från sprickytan.

Den ungefärliga urlakningsgraden på olika avstånd från sprickan enligt CBL:s analyser visas i tabell 18. För att få en uppfattning om vilka kalkmängder den observerade urlakningen motsvarar kan man göra en överslagsberäkning med följande förutsättningar:

Urlakningsytan: (dubbla sprickytan)
För en plan spricka är ytan på det aktuella snittet i dammen c:a 5,4 $m^2$. Med hänsyn till sprickans oregelbundna form och mindre förgreningar anses det rimligt att räkna med 2 å 3-dubbla ytan. Sprickytan räknas således till $\sim$15 $m^2$ och urlakningsytan blir A $\sim$30 $m^2$.

Urlakningsgrad

Urlakningsgraden räknas i förhållande till ostörd betong med c:a 137 kg Ca per $m^3$.

Med dessa förutsättningar och skiktindelning som i tabell 18 får man följande beräkning av urlakad mängd Ca från sprickväggarna:

$$(0,2\cdot 1 + 0,12\cdot 9 + 0,05\cdot 20)\ 137\cdot 30\cdot 10^{-3} = \underline{9,35\ kg}$$

Den observerade urlakningen i sprickytorna motsvarar enligt denna beräkning endast c:a 1/3 av den kalkmängd som enligt uppskattning på sid 92 har förts bort med läckvattnet under tiden fram till utborrningen av kärnorna.

Det synes således vara dålig överensstämmelse mellan resultaten från de utförda läckningsmätningarna och observationerna på utborrade betongkärnor. Det finns många tänkbara förklaringar till detta. I första hand måste det understrykas att de utförda beräkningarna är grova, och de anges endast i avsikten att pejla in den ungefärliga nivån på de värden man söker. Vidare kan följande faktorer inverka på resultaten och ge orsak till att bedömningen blir osäker:

a) De utborrade provernas representativitet

Det är möjligt att urlakningen sker mer koncentrerat till vissa områden i betongen, t ex närmare vattensidan eller vid eventuella förekomster av gjutfel och otillräckligt komprimerad betong. Vid borrningarna i Krångfors förekom både områden med mera djupt gående skador och områden med endast ytliga skador. Även Assarson och Sundius/64 anger att man observerade, att skadorna ofta var lokaliserade till vissa områden, medan näraliggande områden kunde vara oskadade. Mot denna förklaring i detta aktuella fallet talar emellertid de entydiga resultaten vid värderingen av samtliga borrkärnor från Storfinnforsdammen, där inga områden med inhomogen och porös betong observerades.

b) Urlakningsytans storlek

Det är möjligt att sprickorna är avsevärt mera förgrenade inne i dammen än vad som antagits, så att tillförseln av kalk sker från en större volym av betongen. De utborrade kärnorna visade emellertid ej någon tendens till förgrening av sprickmönstret.

c) Vattenprovernas representativitet

Provtagning av läckvatten sker på nedströmssidan under delvis svåra förhållanden. Störande inverkan från andra sprickor och fogar, avdunstning av vatten under provtagningen samt ytterligare lösning av kalk från utfällningar i rännorna, om dessa är otillräckligt rengjorda, kan ge för höga urlakningsvärden. Det har vidare framhållits att vattenproverna från dammen på uppströmssidan ej med säkerhet är representativa för det vatten, som tränger in i sprickorna. Yturlakning från vattensidan kan bidraga till att ge för höga värden på urlakningen i sprickväg-

garna. Vid uppskattningen av urlakningen under dammens 11 första år har värdena från urlakningsmätningarna det sista av dessa 11år använts som underlag, vilket ger en osäker bedömning.

d) Mera djupgående urlakning

Det är även tänkbart att man i tillägg till den rena yturlakningen som observerats på sprickytorna, har en mera djupgående urlakning, som berör en större del av betongvolymen i anslutning till varje spricka. Den drivande mekanismen i en sådan urlakning kan vara, att det sker en långsam vattenströmning genom betongen ut mot sprickorna till följd av ett tryckfall mot dessa. Sprickorna kan s a s dränera den omgivande betongen. För en närmare beräkning av denna effekts storlek fordras bättre kännedom om portrycksförhållandena i betongen och tryckförhållandena i sprickor samt betongens permeabilitetskoefficient.

Läcknings- och urlakningsförhållandena vid sprickor och fogar kan således långtifrån anses klarlagda genom de utförda undersökningarna. De många osäkerhetsmomenten gör att de angivna värdena endast får anses gälla som orienterande värden m a p storleken av de sökta effekterna. Störst vikt bör läggas på resultaten från provborrningarna. För Storfinnforsdammen fann man att angreppshastigheten vid sprickväggarna var så låg, att urlakningen här ej anses medföra allvarliga risker för betongens bestånd. Vid Krångfors var emellertid vissa prover så dåliga (se bilaga 10) att ytterligare provning fordras, innan reparationsbehovet kan värderas.

Specialundersökningar bör utföras för att utreda vattenprovernas representativitet och lämplig provtagningsteknik. Vidare bör permeabilitets- och strömningsförhållandena i en betongdamm med sprickor närmare utredas, teoretiskt och/eller experimentellt. Det är ytterligare önskvärt med specialstudier av kalkdiffusionsförhållandena i betong med läckande sprickor. Alla dessa studier är omfattande och tidskrävande undersökningar, som fordrar betydande forskningsinsatser.

## 4. Sammanfattning, del II

Avhandlingens andra del omfattar studier och undersökningar rörande riskerna för betongförstörelse genom kalkurlakning och har speciell inriktning på problemet som det uppträder vid läckning genom sprickor och otäta fogar i förhållandevis moderna vattenbyggnadskonstruktioner. Tidigare utförda fältinspektioner redovisar flera fall av omfattande läckning av denna typ med lätt synbara tecken på, att det sker en samtidig kalkurlakning som följd av läckningen, se t ex fig 30.

Av den redovisade litteraturstudien framgår att man i stor omfattning har studerat kalkurlakning och nedbrytning av betong i samband med otät, porös betong, där vattnet sipprar direkt genom betongen eller vissa områden av den. Vidare har urlakningsriskerna vid angrepp från en fri betongyta med vatten av olika aggressivitet gentemot betong studerats i samband med bl a utredningar av betongrörs beständighet. Däremot har man - enligt författarens kännedom - ej tidigare redovisat några utredningar eller undersökningar, där man speciellt beaktar urlakningsmekanismerna vid läckning som koncentreras till sprickor och fogar i en i övrigt tät betong.

Efter en allmän genomgång av de cementkemiska förutsättningarna, som är av intresse i detta sammanhang, diskuteras hydratationsprodukternas stabilitet i rent vatten samt ges en översikt över faktorer, som inverkar på cementets urlakningsresistens. Bl a diskuteras effekterna av karbonatisering av betongen och inverkan av fri, marmoraggressiv koldioxid i det vatten som betongen utsätts för. Av detta framgår att hög halt aggressiv koldioxid i vattnet accelererar angrepp på karbonatiserade betongytor, medan det för icke-karbonatiserad betong - som t ex inuti en betongdamm - är mjukt, kolsyrefritt vatten som har störst kalkurlakningskapacitet, se fig 40 - 41.

Vid värdering av riskerna för skadlig urlakning i en betongkonstruktion måste man, utöver de faktorer som avgör det hårdnade cementets allmänna urlakningsresistens, även ta hänsyn till betongens täthet och det sätt på vilket angreppet sker. Vid diskussionen av detta kommer man fram till, att det måste särskiljas på de tre angreppsformerna:

1. Direkt genomströmning av otät betong
2. Vatten som passerar en fri betongyta
3. Vatten som passerar genom en spricka.

Se fig 43 - 45.

Av dessa tre är den första definitivt farlig och mycket välkänd och välutredd men knappast aktuell som angreppsform på förhållandevis moderna betongkonstruktioner.

Den andra angreppsformen är aktuell t ex vid betongrör, men är enligt ett omfattande erfarenhetsmaterial utan betydelse i dag under förutsättning att det icke rör sig om speciellt aggressivt avloppsvatten.

Den tredje formen anges representera normalfallet vid läckning genom sprickor och fogar i betongkonstruktioner utsatta för ensidigt vattentryck. Det anses att man f n ej har tillräckligt underlag för att avgöra,under vilka omständigheter denna form av urlakning är farlig för betongens bestånd. För att skaffa närmare information om denna angreppsform har man hittills utfört fältinspektioner, läckmätning och vattenanalyser samt utborrning av betongkärnor i anslutning till läckande sprickor och fogar.

De utförda fältinspektionerna ger stöd för uppfattningen, att ren yturlakning från fria betongytor i normala fall är en så långsam nedbrytningsprocess, att den kan anses betydelselös vid de aktuella konstruktionerna. Fältinspektionerna ger inga informationer om angreppsutvecklingen i sprickväggarna i de fall urlakningen sker genom läckande sprickor.

Vid Storfinnforsdammen har man utfört läckningsmätningar över en period av drygt 4 år och tagit vattenprover för kemisk analys av vattnet före och efter passage genom sprickorna. En sammanställning av resultaten visas i bilagorna 7 och 8. I samband med dessa observationer har man även studerat effekten av en värmeisolerande bakvägg och höjning av temperaturen vid en damm-monolits nedströmssida. Observationerna visar, att det sker kalkurlakning genom sprickorna och att denna i storlek varierar med läckningsvariationerna under året. För första observationsåret var medelurlakningen vid ett av observationsställena c:a 250 mg Ca/h, men denna var reducerad till c:a 60 mg Ca/h som medelurlakning för de två senaste observationsåren. Reduktionen tillskrivs den läckningsreducerande effekten av den isolerande bakväggen. Det visas ingen tendens till att urlakningen minskas genom att den tillgängliga kalken förbrukas.

Vattenanalyserna indikerar, att allvarlig betongförstörelse kan ha skett vid sprickorna, om urlakningen sker som koncentrerat ytangrepp. För att närmare studera angreppsutvecklingen i sprickväggarna hos sprickor, som även en längre tid utsatts för läckning, utborrades ett antal provkärnor från Storfinnforsdammen samt i något mindre omfattning vid Krångfors Kraftstation.

Borrhålens placering och riktning visas i fig 54 och 55. Kärnorna passerade sprickorna och fogarna i olika lägen som framgår av figurerna. Kärnorna besiktigades i första hand okulärt, varvid det konstaterades, att för kärnorna från Storfinnforsdammen var betongen in mot sprickorna uppluckrad och lös endast i ytan in till ett djup av max 2-3 mm. I övrigt kunde ingen förstöring av betongen ses vid den rent okulära besiktningen. Urlakningen vid de aktuella sprickorna hade pågått c:a 11 år.

För Krångfors' del visade ett par av kärnorna exempel på förhållandevis djupt gående urlakning vid en läckande fog med ett löst, urlakat skikt av tjocklek 5-20 mm. Skadorna var lokala med mellanliggande områden av mindre urlakad betong. Skadorna var koncentrerade till den äldre betongen - från 1928 - men den koncentrerade läckningen vid denna fog har troligen endast pågått sedan 1948, då dammen höjdes genom påbyggnad.

Okulär besiktning av provkärnor och konstruktioner ger emellertid endast en första orientering om betongens tillstånd. Ett försök att använda ultraljudmätningar "in situ" visade, att metoden ännu ej är användbar för att studera koncentrerad kvalitetsförsämring av den form man enligt dessa undersökningar har vid läckande sprickor och fogar. Mätningarna ger emellertid en orientering om betongens allmänna kvalitet, se bilagor 11 - 14. För att få närmare kännedom om urlakningsgraden i olika avstånd från sprickväggarna utfördes kemisk analys och mikroskopisk tunnslipsanalys på några prover från Storfinnforsdammen. Resultaten framgår av tabell 17 - 18 och fig 58 - 60. Dessa undersökningar visade, att effekten av urlakning var mätbar endast in till c:a 30 mm avstånd från sprickytan. Resultaten av analyserna överensstämmer väl med det allmänna intrycket av betongens tillstånd. De utförda läckmätningarna och vattenanalyserna indikerade emellertid mera omfattande urlakning än undersökningarna visat.

Olika orsaker till att observationerna ej stämmer överens diskuteras

avslutningsvis, och det hävdas att omfattande specialstudier av bl a kalkdiffusions-, permeabilitets- och strömningsförhållanden i en betongdamm med sprickor fordras, innan kalkurlakningsproblemet vid läckande sprickor slutgiltigt kan utredas.

De utförda studierna representerar en uppsummering av var man i dag står i de aktuella frågorna och problemställningen för eventuella fortsatta undersökningar har klarlagts. Ett huvudsyfte med de utförda undersökningarna var att få fram säkrare underlag vid värdering av reparationsbehovet på konstruktioner med läckande sprickor. De utförda borrningarna indikerar, att betongförstörelsen vid sprickorna sker mycket långsamt och ger ingen direkt orsak till omedelbara reparationer vid Storfinnforsdammen. Beträffande dammen vid Krångfors Kraftstation fordras i vissa delar ytterligare prov, innan reparationsbehovet kan värderas.

## Litteraturförteckning till del I


1. Burggraf, Carvey och Miller: Corrosion of Reinforcing Steel and repair of Concrete in marine environment. Highway research Board Bulletin Nr 182, 1958.

2. Woodworth & Halstead: The Deterioration of reinforced concrete structures under coastal conditions. Transactions of South African Institution of Civ. Eng., 1955:10, p. 10.

3. Stratfull, R F: The Corrosion of steel in a reinforced concrete bridge. Corrosion Nr 13 1957, p.43.

4. Finley, H F: Corrosion of reinforcing steel in concrete in marine atmospheres. Corrosion Nr 17 1961, p. 104.

5. Halvorsen, U A: National report on questions concerning corrosion of bars. Swedish National Committee of IABSE, Stockholm 1962.

6. Svenska Betongföreningens rostundersökningskommitté: Undersökningar av rostförekomsten å järn i betong. Betong 1917, sid 43-66.

7. Hanson, R och Rosenström, S: Betongskador på Herserudshissen. Betong nr 4, 1950, sid 301-310.

8. Bergström, S G & Holst, H E: Korrosionsrisken vid användning av kalciumklorid i betong. Statens Nämnd för Byggnadsforskning, rapport nr 60, Stockholm 1960.

9. Holmberg, Å: Skada på armering i Martin-verk. Halmstad Järnverks AB, Halmstad, Armeringsdagen 1962.

10. Bernander, K G: Besiktning av strängbetongbalkar. Avesta 1958 (intern rapport).

11. Bernander, K G: Besiktning av takbalkar i betonghall. Sandviken 1959 (intern rapport).

12. Bergström, S G & Lundström, P E: Korrosion på ingjutna värmeslingor i Åsaområdet. CBI Kontaktavdeln. Rapport nr 95, 1959.

13. Halvorsen, U A: Utlåtande betr ingjutna värmeslingor Råsebäckskolan. CBI Kontaktavdeln. Rapport nr 160, 1962.

Litteraturförteckning till del I, forts


14. Trudsö, E: Rustangreb på armeringsjern i betong med kalciumkloridtilsätning. Nordisk Betong nr 4, 1965.

15. Halvorsen, U A: Kalciumklorid som tillsatsmedel till betong. CBI:s Utredningar nr 6. Stockholm 1963.

16. Statens Betongkommittè: Bestämmelser för betongkonstruktioner. Material och utförande, B-5. Stockholm 1965.

17. Sneck, T: Korrosion av järn och stål ingjutet i betong. Nordisk Betong nr 1, 1961.

18. Tremper, B: The corrosion of reinforced steel in cracked concrete. JACI, juni 1947.

19. De Bruyn, L: Cracks in concrete and corrosion of steel reinforcing bars. RILEM-symposium on bond and crack formation in reinforced concrete. Vol. II, p. 341, Stockholm 1957.

20. Voellmy, A & Bernardi, B: Remarques sur l'adhérence et la formation des fissures dans le beton armé. RILEM-symposium on bond and crack formation in reinforced concrete. Vol. II, p. 347, Stockholm 1957.

21. Rehm, G & Moll, H: Versuche zum Studium des Einflusses der Rissbreite auf die Rostbildung an der Bewehrung von Stahlbetonbau-- teilen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 169, Berlin 1964.

22. Abeles, S J & Filipek, J: Corrosion of steel in finely cracked reinforced and prestressed concrete. J. of Prestressed Concrete Inst. 1965, nr 10, p. 36.

23. Bergström, S G & Nilsson, L B: Sprickor och frostskador i vatten - byggnadsbetong. VAST nr 61:269, Stockholm 1961.

24. Trägårdh, K F: Försök med omålat stål. Teknisk Tidskrift 30 nov 1954.

## Litteraturförteckning till del II


25. E V Lyon och I L Tyler: Bibliography on mass concrete in dams. Symposium on mass concrete, Paper 14 ACI Publication SP-6, Detroit 1963.

26. R Schlyter: Skador hos betong genom cementets utlösning eller sönderdelning och skyddsmedel härför. Betong 1926, sid 62-91.

27. I R Baylis: Corrosion of concrete. Transactions of ASCE. Paper 1612, sid 791-843.

28. Symposium: A condition survey of concrete structures. Proceedings of ACI 1929, sid 27-82.

29. Redogörelse: Redogörelse för undersökningar angående orsakerna till förstörelse av betong i vattenbyggnader. Tekniska meddelanden från Kungl Vattenfallsstyrelsen, serie B nr 16, 138 sid.

30. R V Frost och E I Virgin: Betongs och speciellt betongrörs beständighet mot vatten. Betong 1929, sid 100-160.

31. N Sundius: Till frågan om kolsyrehaltigt vattens inverkan på betong. Betong 1930, sid 41-52.

32. Den Norske Ingeniörforening: Meddelse nr 1. Undersökelse av skader på våre betongdammer og bruddstensdammer i mörtel. Årsaker og botemidler. 253 sid.

33. B Tremper: The effect of acid waters on concrete. Proceedings of the ACI, Sept 1931, vol. 28, sid 1-32.

34. B Hallström: Decay and repair of concrete and masonry dams. Reprint from the Structural engineer, May 1933, sid 1-19.

35. A Ruettgers, E N Vidal och S P Wing: An investigation of the permeability of mass concrete with particular reference to Boulder Dam. Proceedings of the ACI, vol 31, 1935, sid 382-416.

Litteraturförteckning till del II, forts


36. M Mary: Diskussionsinlägg till A Ruettgers uppsats. Proceedings of the ACI, vol 32, 1936, sid 125-129.

37. S L Meyers: Diskussionsinlägg till A Ruettgerrs uppsats. Proceedings of the ACI, vol 32, 1936, sid 230-233.

38. A Ruettgers: Slutreplik till diskussion. Proceedings of the ACI, vol 32, 1936, sid 378-389.

39. R D Terzaghi: Concrete deterioration due to carbonic acid. Journal of the Boston society of civil engineers, April 1949, sid 136-152.

40. R D Terzaghi: Concrete deterioration in a shipway. Proceedings of the ACI, June 1948, vol 44, sid 977-1005.

41. K Mather: Leaching of lime from concrete. JACI, Febr 1950, sid 473-475. (Diskussionsinlägg till R Terzahgi's två uppsatser.)

42. R D Terzaghi: (Svar till ovanstående) JACI Febr 1950, sid 475-477.

43. C T Wolley: (Inlägg till ovanstående) JACI May 1950, sid 753-755.

44. A N Adamovich: Leaching out of cementstone under the action of soft water. Corrosion of concrete and its prevention, sid 19-30. Symposium i Moskva 1954 (översatt till engelska i Israel 1962).

45. V M Moskvin: Corrosion in hydrotechnic structures. Corrosion of concrete and its prevention, sid 7-18. Moskva 1954.

46. G Molinari: Deterioration of concrete caused by subsurface water containing aggressive carbonic acid. Engenharia 1953, 11 (126).

47. G M Idorn: Concrete deterioration of a foundation. Acta Polytechnica 221, sid 47.

48. W J Cay, R J Sweitzer och M E Flentje: Study of concrete pipe in service. JACI 1958, sid 647-655.

49. A Markestad: Kjemiske problemer i forbindelse med betong. Norges Tekniska Högskolas Materialprövningsanstalt Publ nr 58, 1959, sid 7.

Litteraturförteckning till del II, forts


50. A Markestad: Testing of concrete with regard to permeability at the Department for Testing Materials. NTH, Trondheim 1960. (Privat korrespondens).

51. G Larsen: Microscopic measuring, a quantitative petrographic method of determining the $Ca(OH)_2$ content of the cement paste of concrete. Magazin of concrete research 1961:38, sid 71-76.

52. J Nielsen och P Skovgård: Blödt, kulsurt vands invirkning på betonrör. Nordisk Betong nr 3, 1962, sid 235-246.

53. S Sällström: Undersökning av beständigheten hos poröst cementbruk utsatt för kontinuerlig vattengenomgång. Statens Vattenfallsverk. Preliminär rapport. Stockholm 1964.

54. F M Lea och C H Desch: The Chemistry of Cement and Concrete. E.A. publication, London 1956 (revised).

55. I Biczók: Concrete Corrosion. Concrete Protection. Akademia Kiadó. Budapest 1964.

56. H Liesche och K H Paschke: Beton in aggressiven Wässern. Berlin-München, 1964.

57. Blümel och Jung: Untersuchungen über Zementausblühungen. Betonstein ZeitungNr 6/7 1962.

58. P. Håkanson: Cement- och Betongkemi. Betongtekniska Anvisningar, CBI, Stockholm 1950.

59. W Czernin: Zementchemie für Bauingenieure. Bauverlag GmbH Berlin 1960.

60. Handbook Handbook of Chemistry and Physics. 45th Edition. Cleveland Ohio, 19651

61. H F W Taylor: The Calcium Silicate Hydrates. The Chemistry of Cements, vol I, sid 173. A.P. London 1964.

62. I Rutle: Cement, fremstilling og egenskaper. Teknisk Ukeblad, Oslo 1958.

63. S Brunauer och D L Kantro: Hydration of Calcium Silicates. The Chemistry of Cement. Vol. 1, sid 288. A.P. London 1964.

64. G Assarson och N Sundius: Om portlandcementets sönderdelning av vatten. Tekn. Medd. från KVF, ser. B nr 16,1929.

Litteraturförteckning till del II, forts


65. D Werner: Vergleich der Wasserlöslichkeitsverhältnisse dreier verschiedener Zemente. Zement 20, 1931, sid 626.

66. G Olavi: Kalkurlakningsförsök. Prel. rapport, CBL, Limhamn, 1964.

67. Statens Betongkommitté: Statliga cementbestämmelser, B 1, Sthlm 1960.

68. B Warris Rörledning för transport av aggressivt vatten. Cement- och Betonginstitutets Kontaktavdelning. Rapport 292, Sthlm 1965.

69. R V Frost och E I Virgin: Meddelande nr 48. Statens Provningsanstalt, Sthlm 1929.

70. Hj Granholm, D Werner och S Giertz-Hedström: Utredning angående lämpligheten av betongrör till vägtrummor. Betong, häfte nr 1, 1934.

71. J Vuorinen: On the tests and requirements for the properties of concrete as used by the Finnish State Power Companies. Transactions of the eighth congress on large dams. Edinburgh 1964.

72. I Th Rosenquist: Hydrauliske gradienter og saltvandning i betong. Nordisk Betong nr 3, 1959, sid 220.

73. S G Bergström och A Nielsen: Högvärdig betongs vattentäthet. Stencilerad rapport dec 1964, LTH, Lund.

74. S Sällström: Kalkurlakning ur betongdammar . Privat korrespondens, dec 1964, Sthlm.

75. R Myran: Kalkurlakning ur betong. Privat korrespondens, NTH, Trondheim, april 1965.

76. K Takemoto, H Takahashi och S Takagi: Leaching of Lime from various kinds of cement mortar and its effect on the strength. Japan Cement Engineering Ass. Review of the 13th Cement Meeting, Tokyo 1959.

77. B E Rasheeduzzafar: The Mechanics of Autogenous healing of Concrete. Indian Concrete Journal, January 1960, sid 24-29.

78, R N Bogue: The tensile autogenous healing of portland cement mixtures. Discussion. Proceedings ASTM, vol 29, 1929.

Litteraturförteckning till del II, forts


79. L B Nilsson: Temperaturvariationer, längdändringar och sprickbildning i grova betongkonstruktioner. Svenska Vattenkraftföreningens publikationer 435, 1953.

80. L B Nilsson: Undersökning av sprickor i Storfinnforsdammen. Program samt rapport 1 och 2. Krångede AB 1961 och 1962.

81. S M Breuning och V J Roggeveen: Fundamentals of Field Soniscope Testing. HRB Proceedings, vol 34, 1955, sid 379-386.

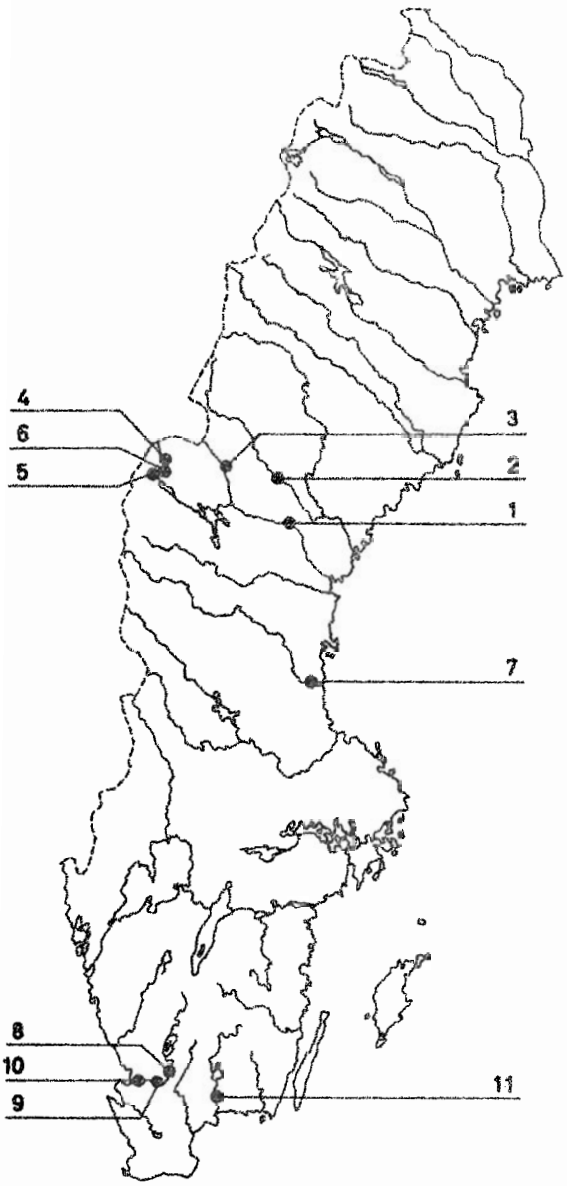
82. S M Breuning och A I Bone: Soniscope applied to maintenance of concrete structures. HRB Proceedings, vol 33, 1954, sid 210-217.

83. N Petersons: Strength of Concrete in Finished Structures. KTH:s handlingar nr 232, Sthlm 1964, (även som CBI-särtryck nr 26).

84. P E Andersen och B Hjorth-Petersen: Drilling of Concrete Cores and Preparation of Thin Sections. RILEM Bulletin. New Series No 11, 1961.

85. G Larsen: Undersögelse av $Ca(OH)_2$-indhold i betondamning. Storfinnforsdammen, Sverige. SBI rapport J. nr 181, Lyngby 1964.

86. S Sällström: Some Results from Investigations Concerning the Ageing of Concrete in Swedish Dams. Report to the 8th Congress on Large Dams. Swedish State Power Board, Sthlm 1964.




1. Hammarforsens kraftverk
2. Storfinnforsens —"—
3. Laxvikens regleringsdamm
4. Torröns —"—
5. Anjans —"—
6. Juvulns —"—
7. Bergviks gamla kraftstation
8. Traryds —"—
9. Majenfors' —"—
10. Skogabys —"—
11. Nedre Hemsjös —"—

Fig 1. Översikt över de inspekterade anläggningarnas belägenhet.

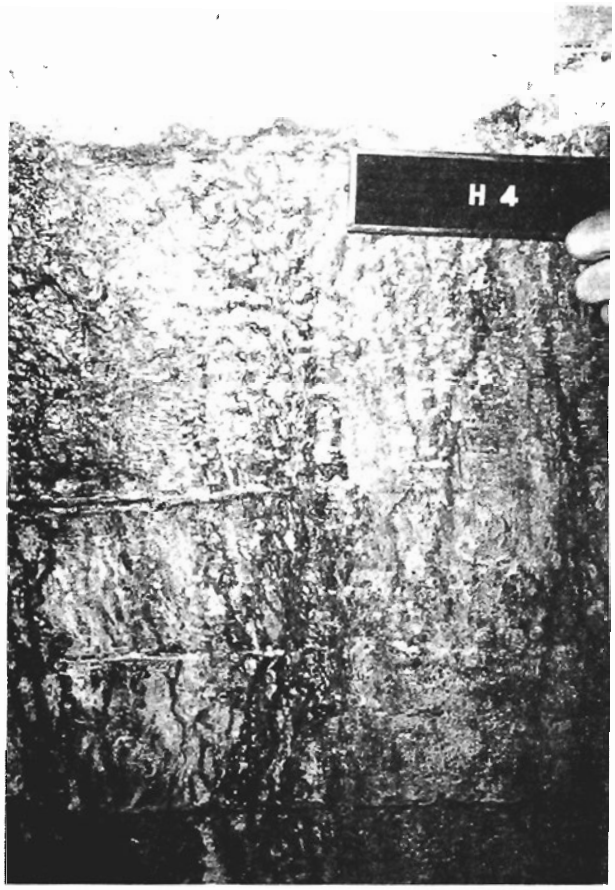



Fig 2. Hammarforsen. Rostutfällning under fog, H 4.

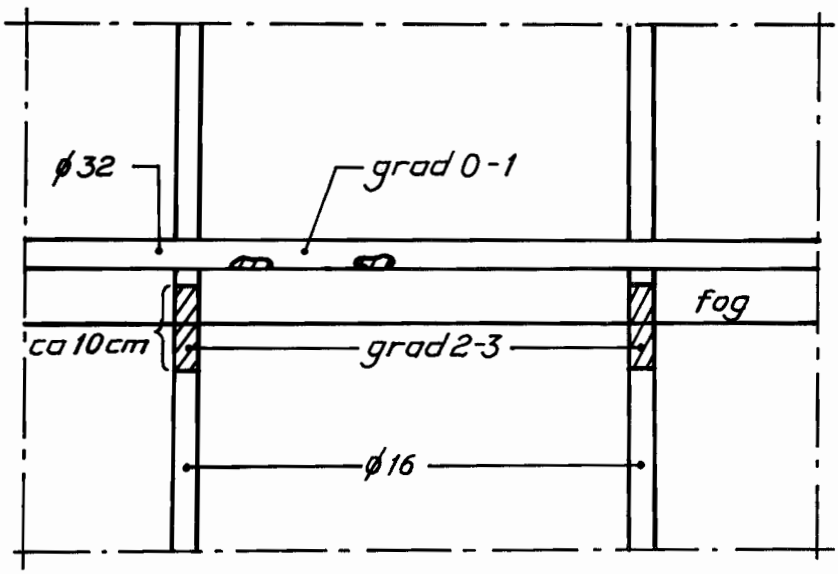



Fig 3. Rostförekomst vid fogen H 4.

Fig 4. Storfinnforsen. Rost- och kalkutfällning under spricka 13:3.

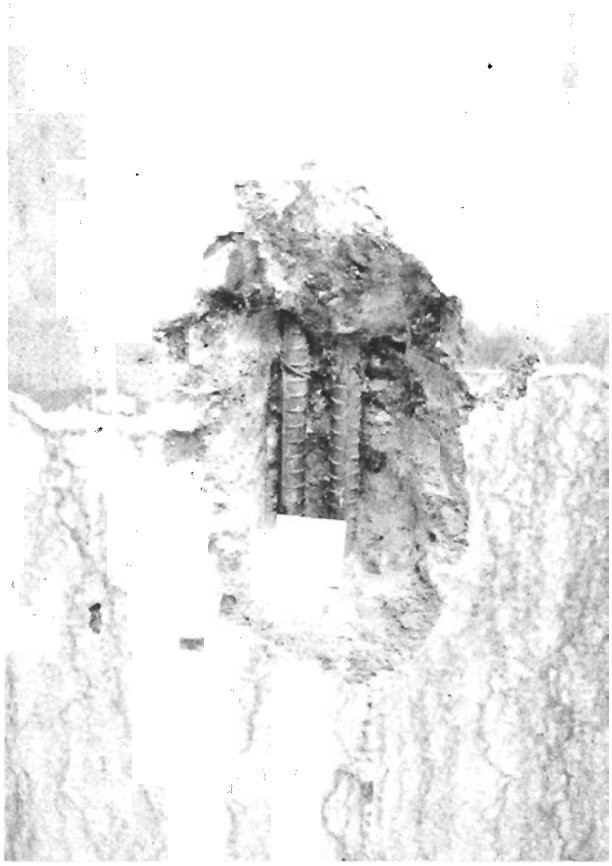


Fig 5. Storfinnforsen. Frilagda armeringsjärn vid spricka 13:3. Järnen är fria från rostangrepp.

Fig 6. Laxviken. Brottstycke av betong med armering. De delar av järnet som exponerats i fria luften är kraftigt korroderade, medan de delar av järnen som varit tätt omslutna av betong är oangripna av rost.

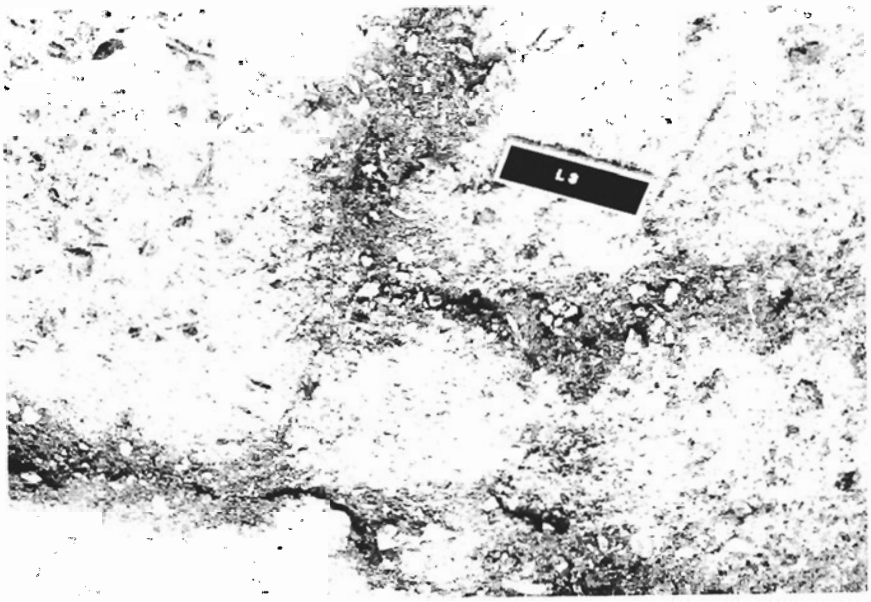


Fig 7. Laxviken. Spricka i bottenplatta, nedströms.

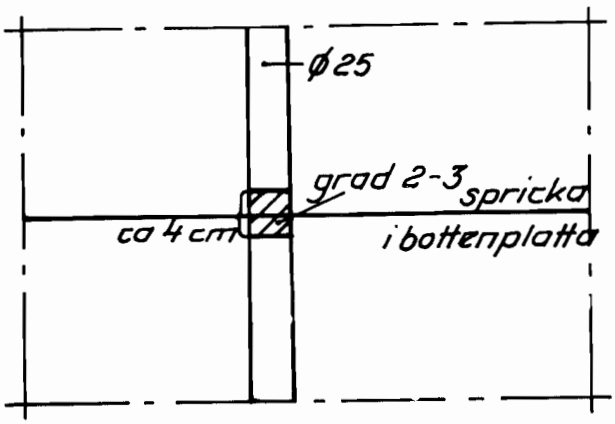



Fig. 8. Rostförekomst vid sprickan i bottenplattan enligt fig 7. Järnen ytangripna i området vid sprickan.

Fig 9. Torrön. Järn i avloppstunnelns vägg, delvis utan täckande betongskikt.

Fig 10. Torrön. Samma järn frilagt.

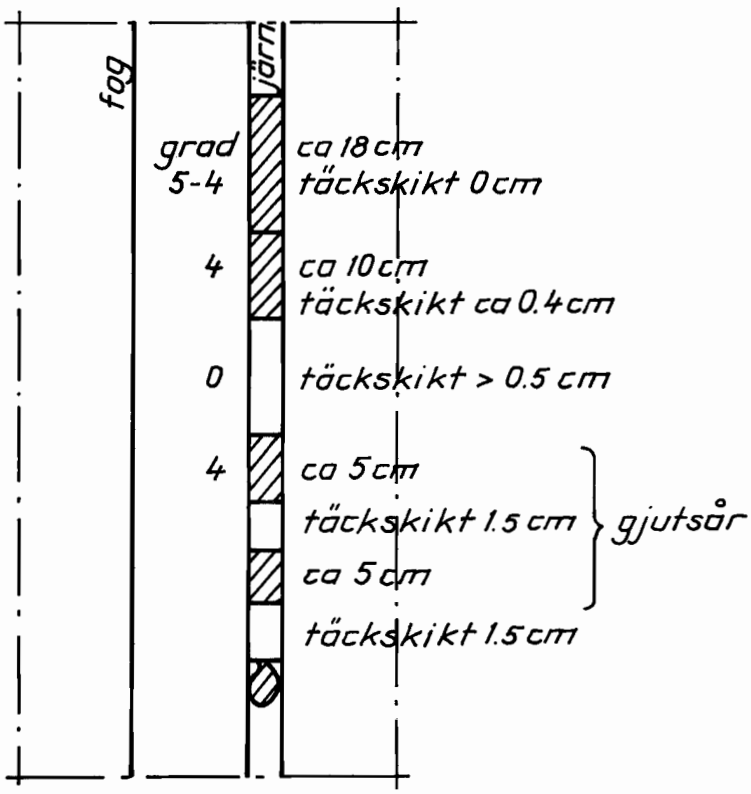



Fig 11. Fördelning av rostförekomst vid järnet som visas i fig 9-10. När täckskiktet överstiger 0,5 - 1,0 cm är järnet utan rostangrepp.

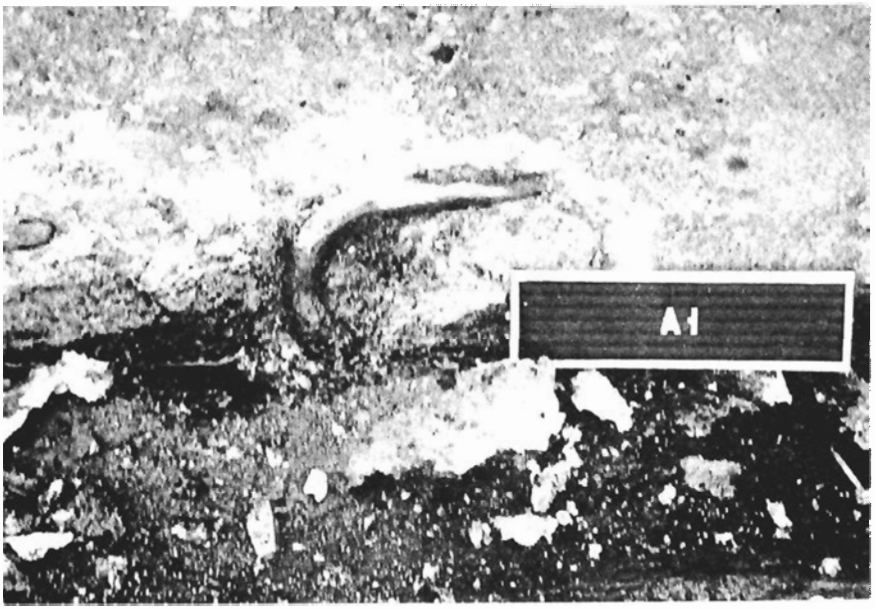



Fig 12. Anjan. Delvis naket järn i bottenplattan, nedströms reservutskovet.

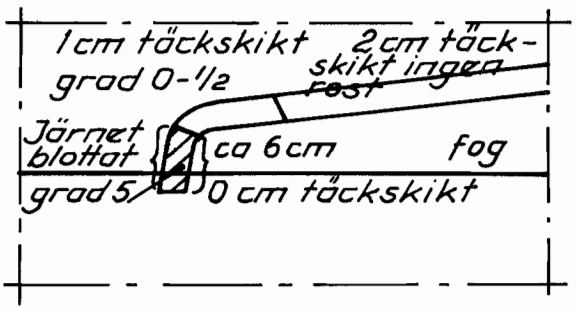



Fig 13. Rostförekomst på det i fig 12 visade järnet. Endast över den fritt exponerade delen av järnet har man korrosion av betydande omfattning.

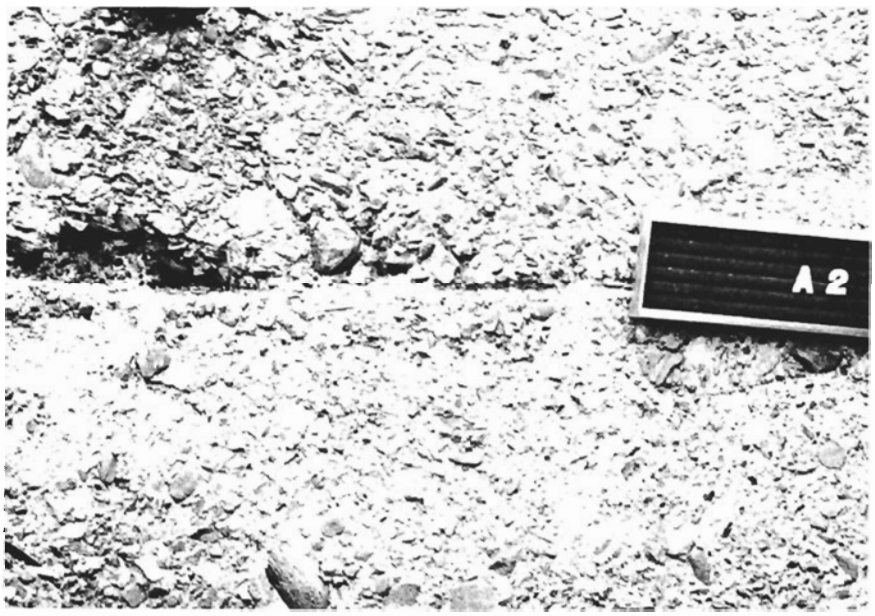



Fig 14. Anjan. Gjutfog i utskovspelare, uppströms.
Järnen ligger delvis oskyddade i fogen.

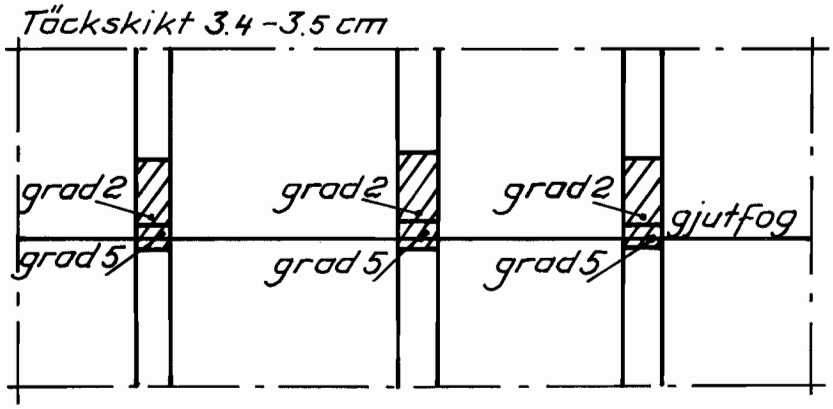



Fig 15. Rostförekomst vid den i fig 14 visade fogen.

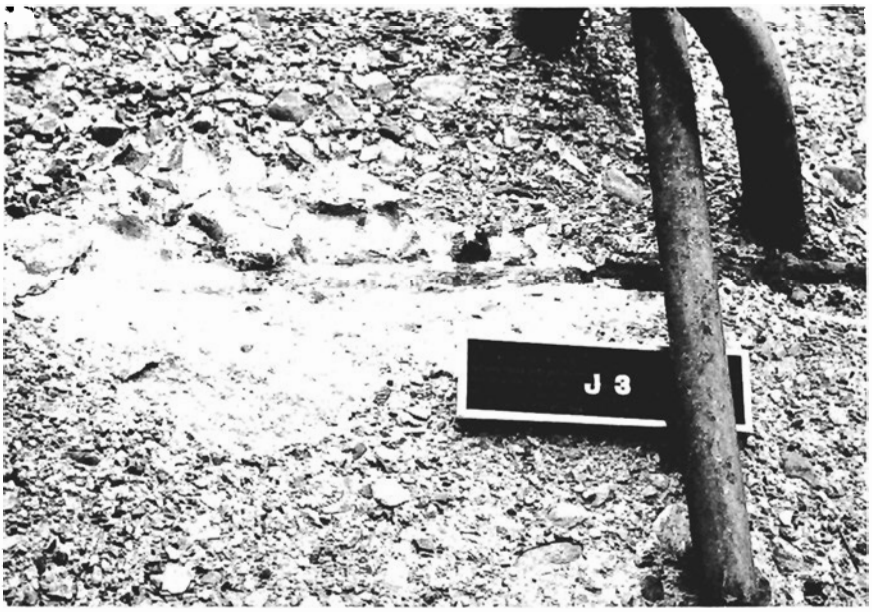



Fig 16. Juvuln. Delvis naket järn i utskovspelare uppströms (frilagt).

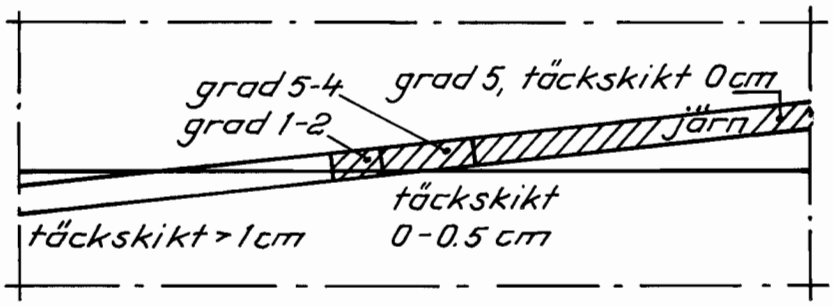



Fig 17. Rostfördelning längs med järnet ovan. Järnet är utan spår av rost när betongtäckskiktet överstiger ca 1 cm.

Fig 18. Bergvik. Friläggning av armeringen vid en fog inom vattenlinjenivån vid intaget till en av turbinsumparna.

Fig 19. Majenfors. Porös, skadad betong. Armeringen i denna betong var dock utan rostangrepp.

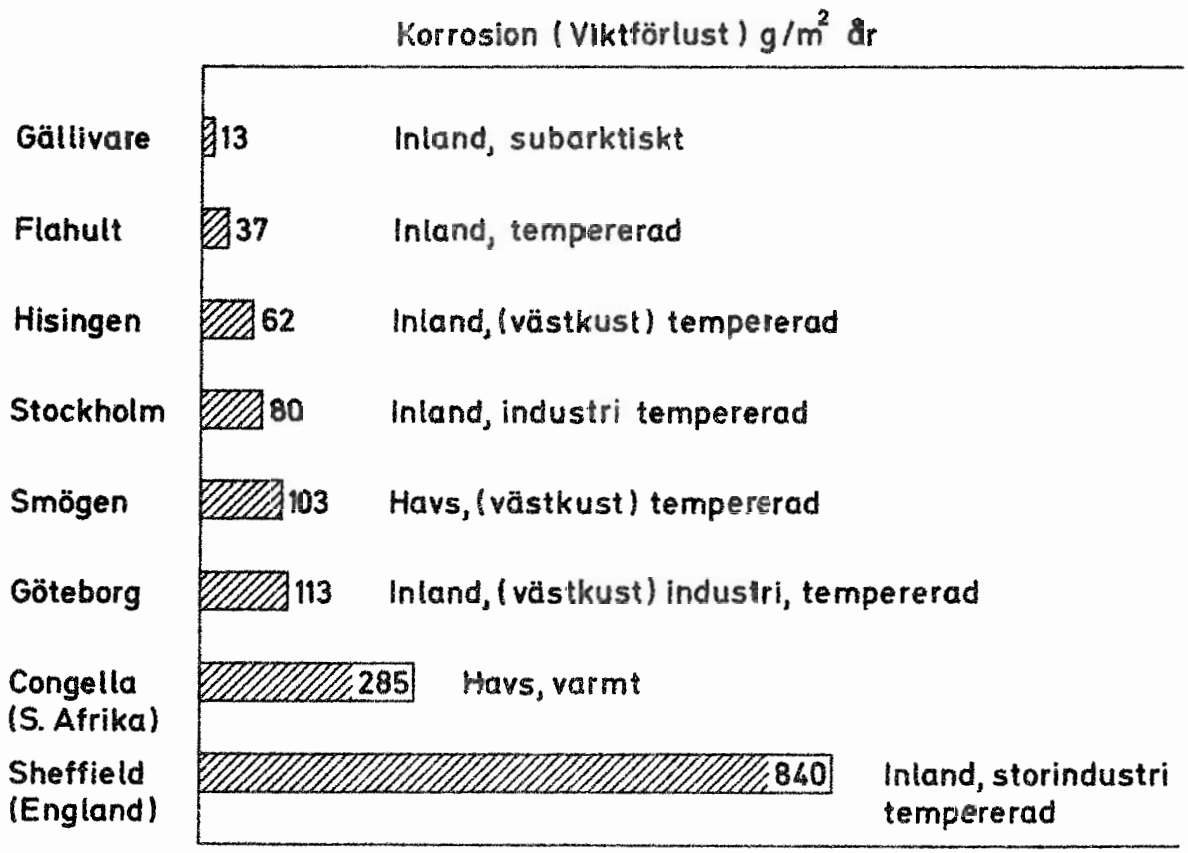



Fig 20. Klimatets inverkan på korrosionshastigheten vid fritt exponerade stålytor.

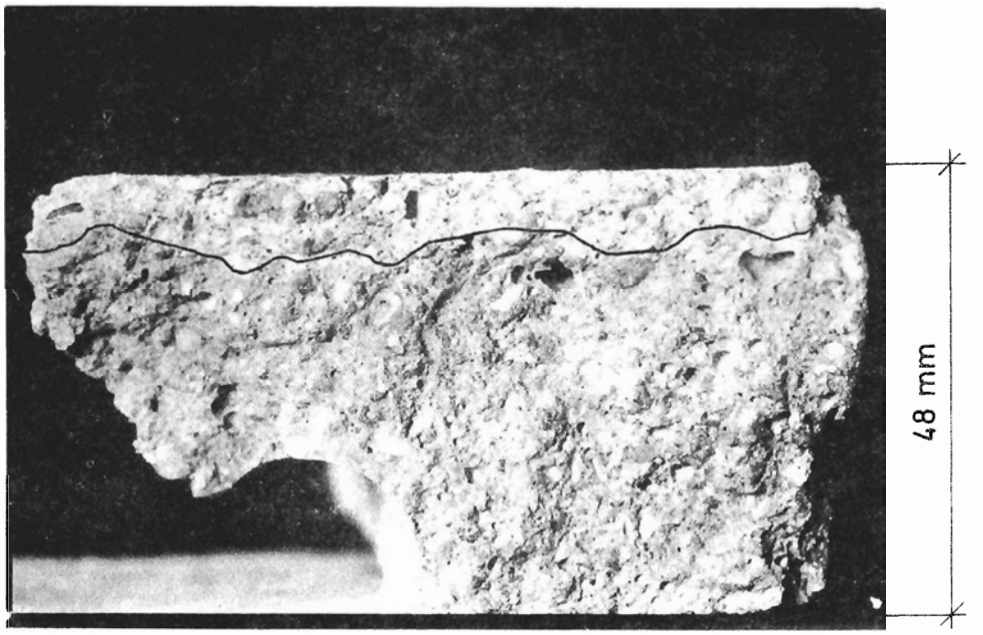



Fig 21 a. Prov som visar karbonatiseringens inträngning från balkarnas överyta (det ljusa skiktet är karbonatiserat).

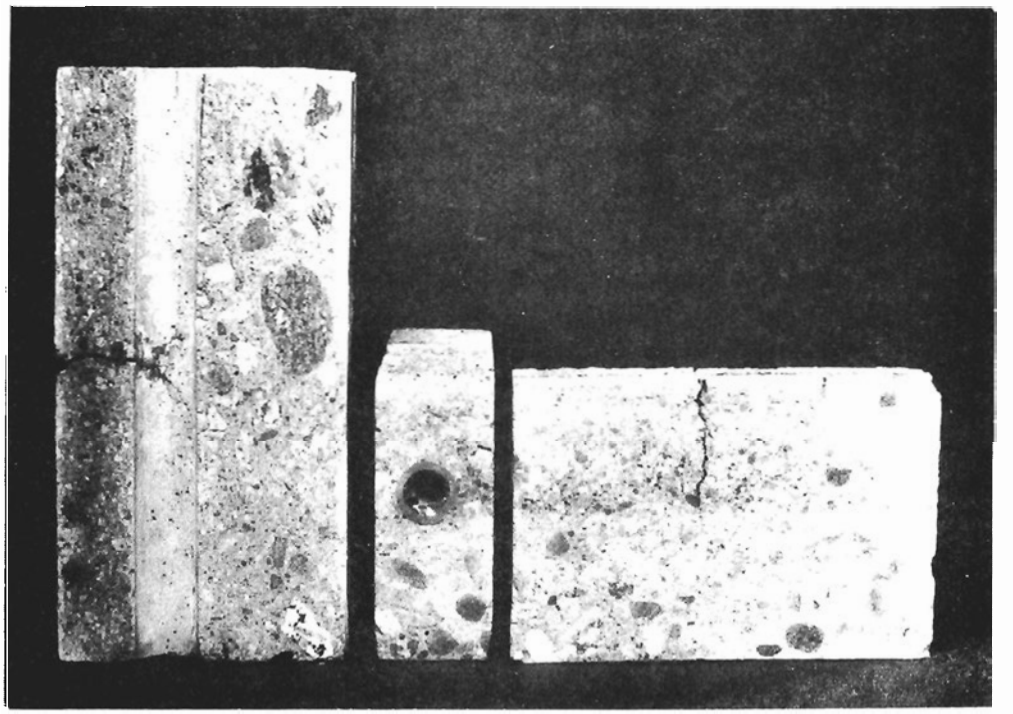


Fig 21 b. Sågsnitt av provkropp visande rörets läge och sprickans nedträngning till röret.

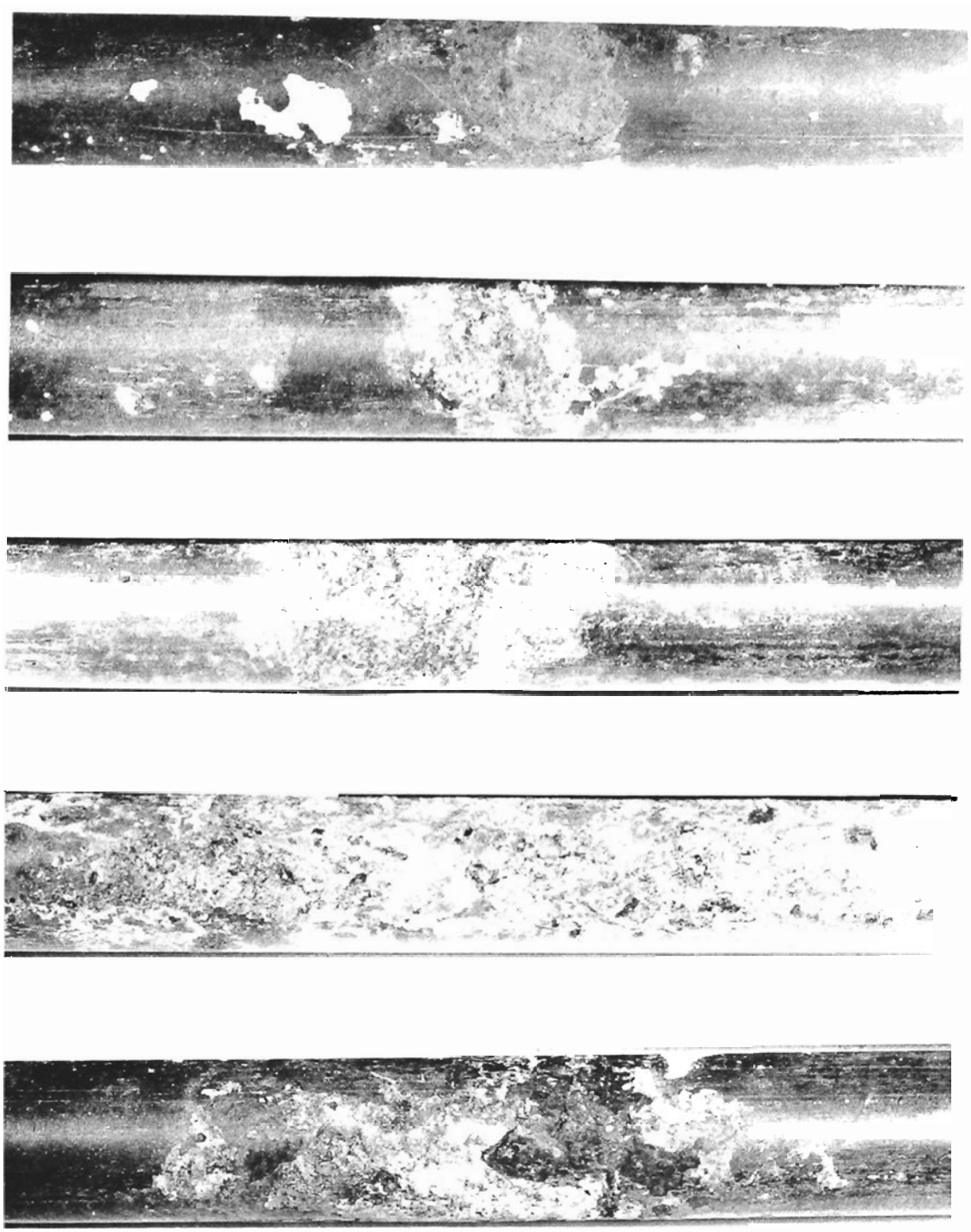



Fig 22. Exempel på olika rostskador enligt värderingsskalan 1-5.

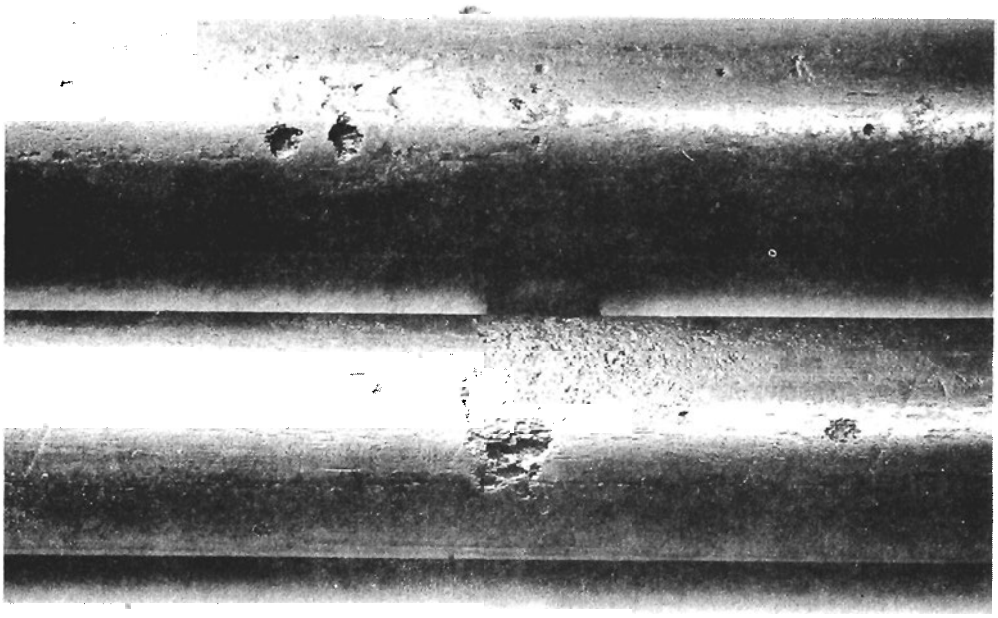


Fig 23. Frätgropar (Pitting) i rör från serie D med 2 % $CaCl_2$. Det övre röret är från balk D 11, utan spricka. Angreppen har här börjat vid porer i betongen mot rörytan.

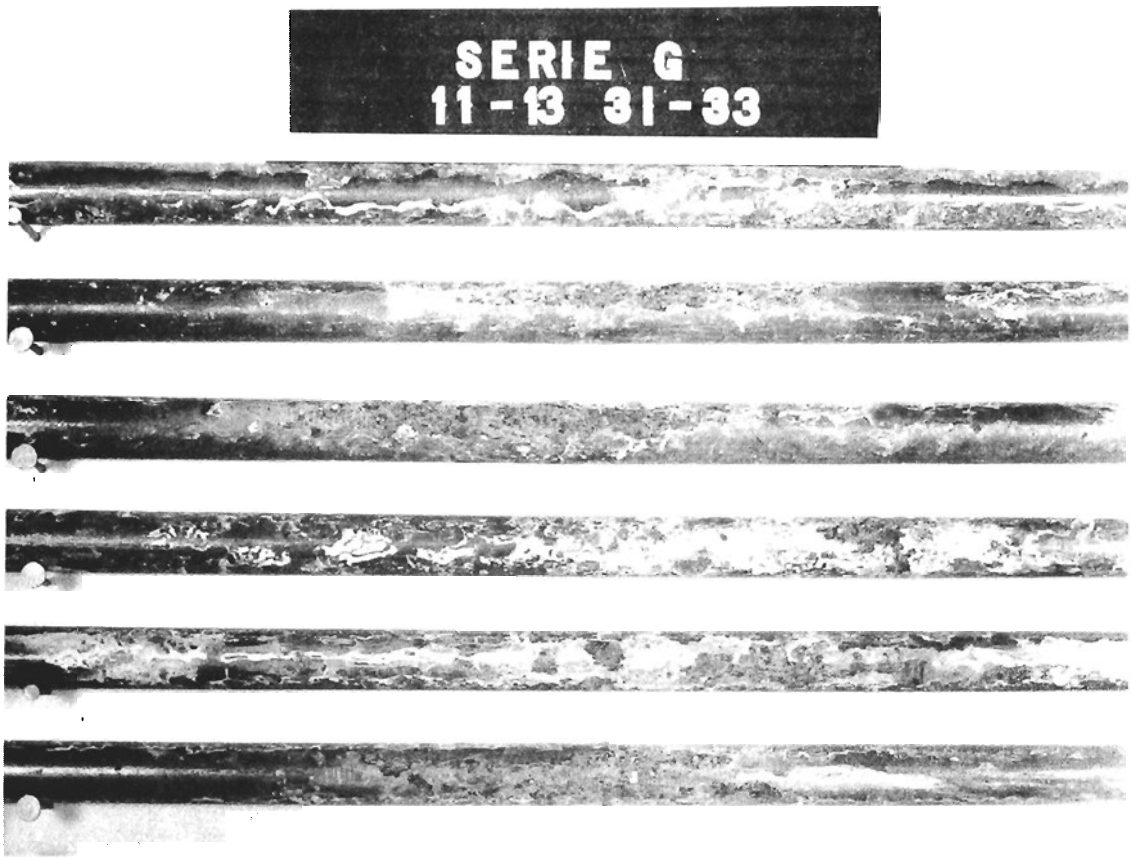



Fig 24. Korrosion längs rörens undersida i serie G.

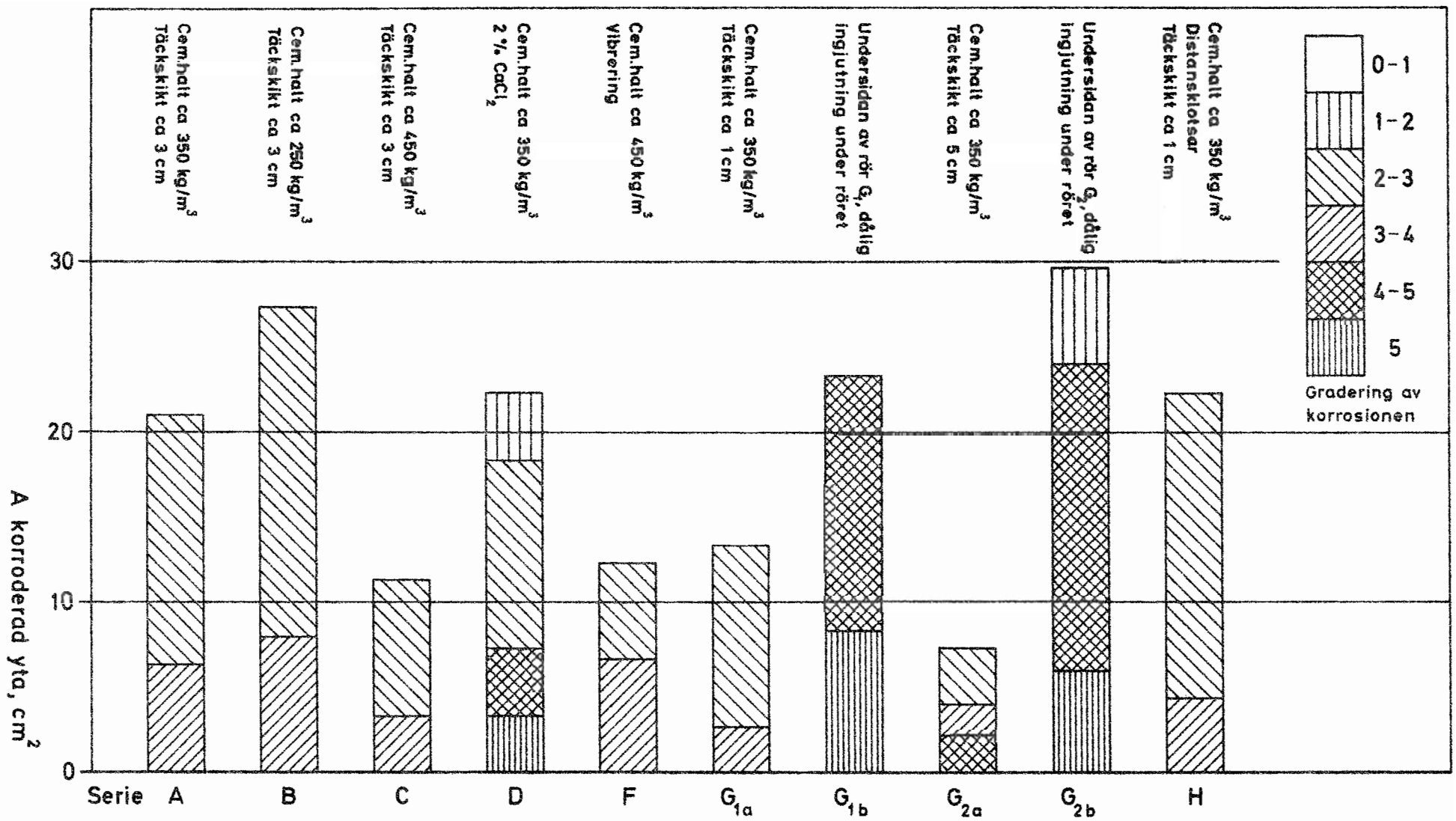



Fig 25. Korrosionen för de olika serierna vid max. sprickvidd (1,5 mm) och lagring a (cykler fuktning-torkning vid +20 °C), korroderad yta (A $cm^2$) samt indelning i olika rostgrader.

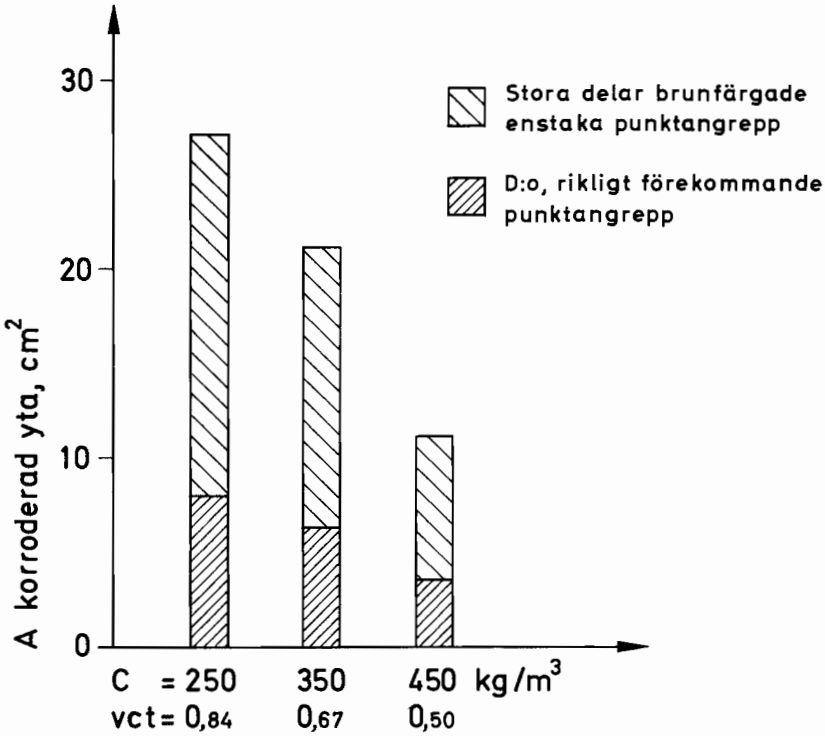



Fig 26. Cementhaltens inverkan på ytkorrosionens omfattning vid sprickor med 1,5 mm:s vidd vid ytan.

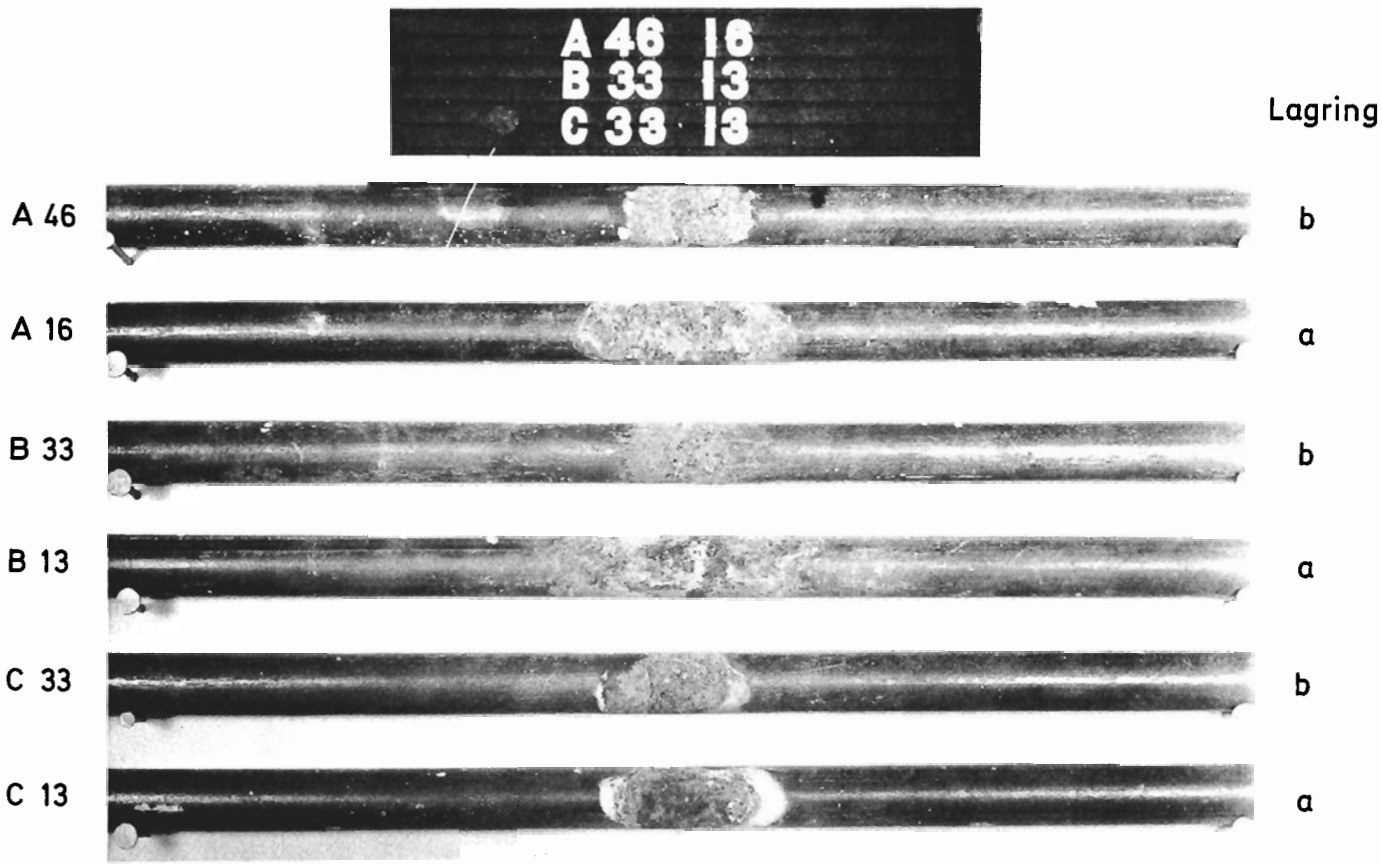



Fig 27. Exempel på ytkorrosion vid 1,5 mm:s sprickvidd.
Serie A: C = 350 kg/m³
Serie B: C = 250 kg/m³
Serie C: C = 450 kg/m³

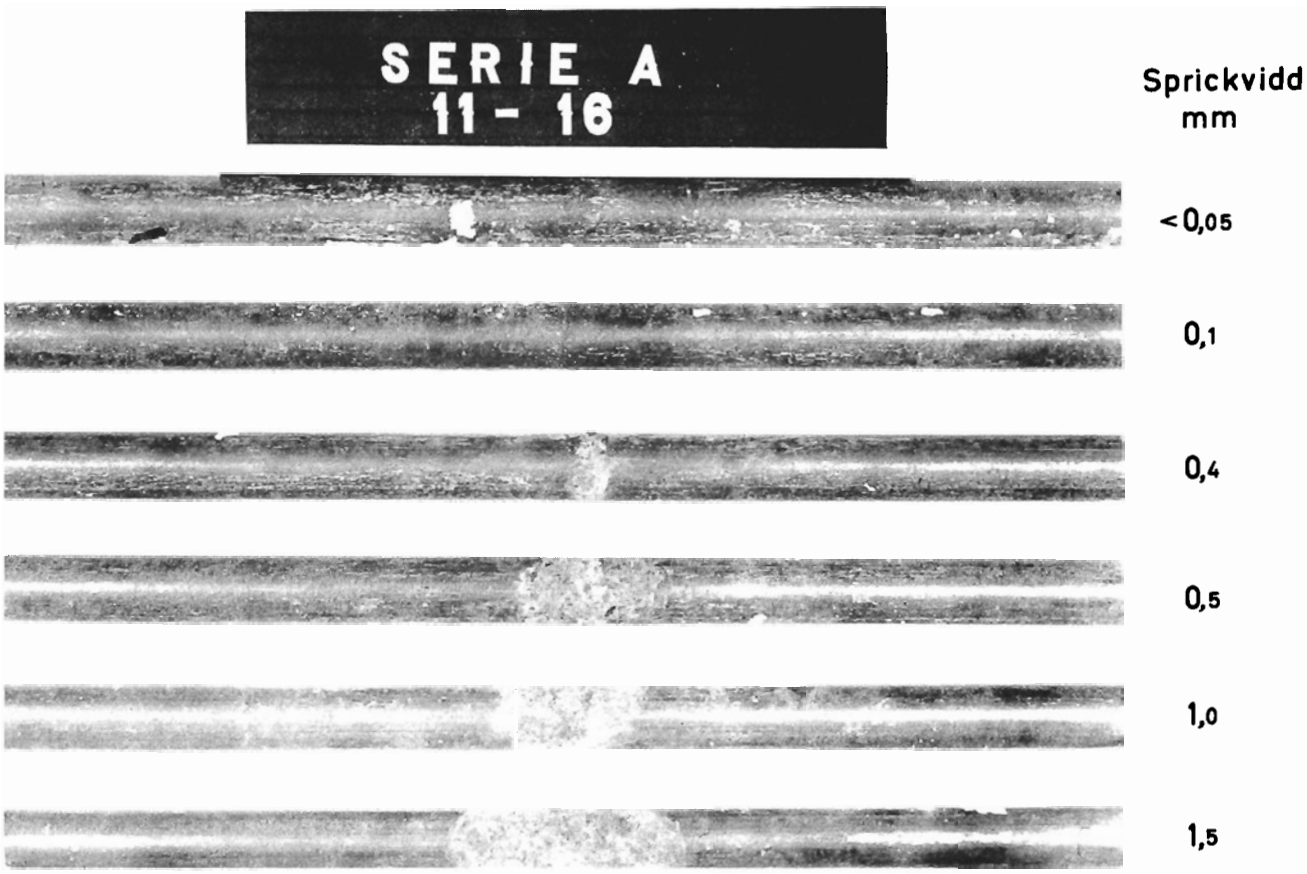



Fig 28. Inverkan av ökande sprickvidd på utbredningen av korrosionen vid sprickorna.

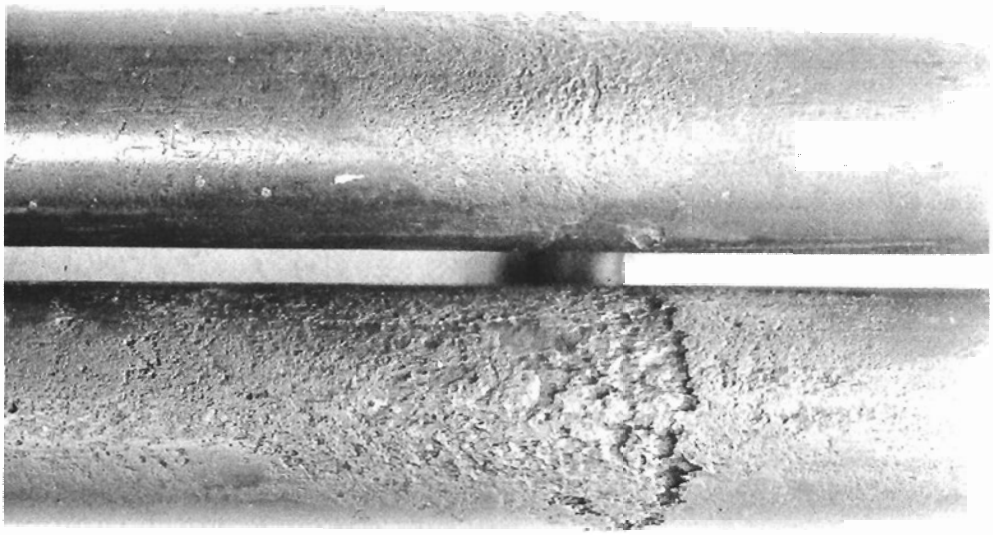


Fig 29. Inverkan av kalciumklorid på korrosionen vid 1,5 mm sprickvidd. Övre röret från serie A (utan $CaCl_2$). Nedre röret från serie D (2% $CaCl_2$).

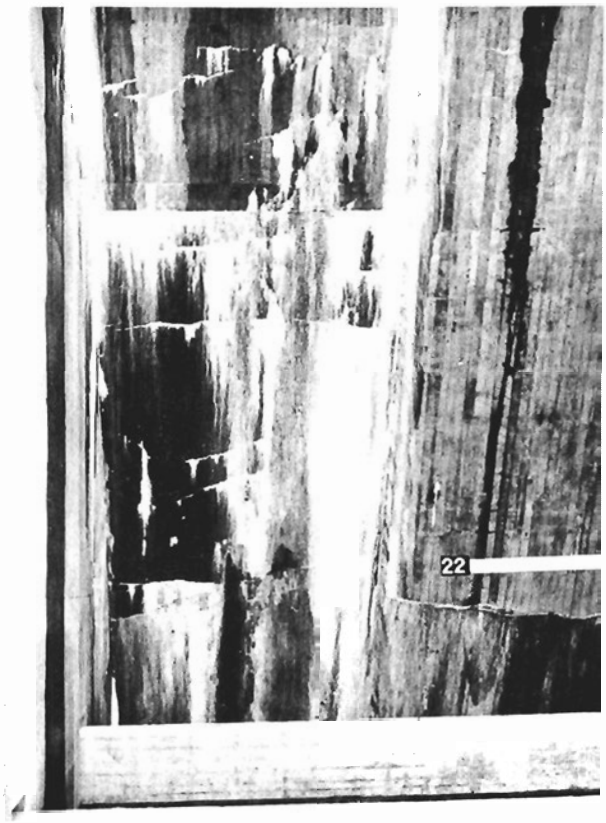



Fig 30 a. Exempel på kalkutfällningar vid en damms nedströmssida (enl./33)

Fig 30 b. Kalkutfällning vid läckande spricka.

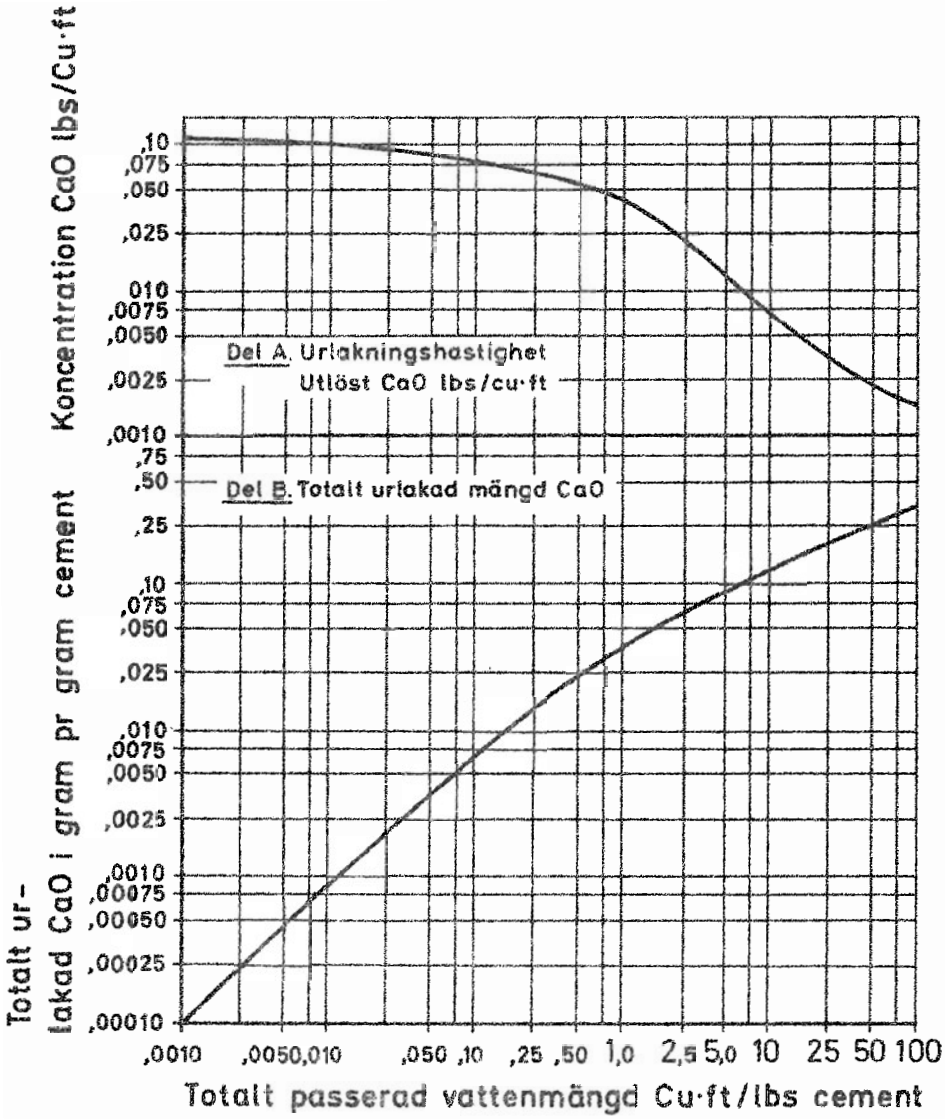



Fig 31. Sambandet urlakning - passerad vattenmängd. Efter Ruettgers / 36 sammanställning av resultatet från olika urlakningsförsök.

(Anm: Cu·ft/lbs till l/g genom att dividera med 16,02)

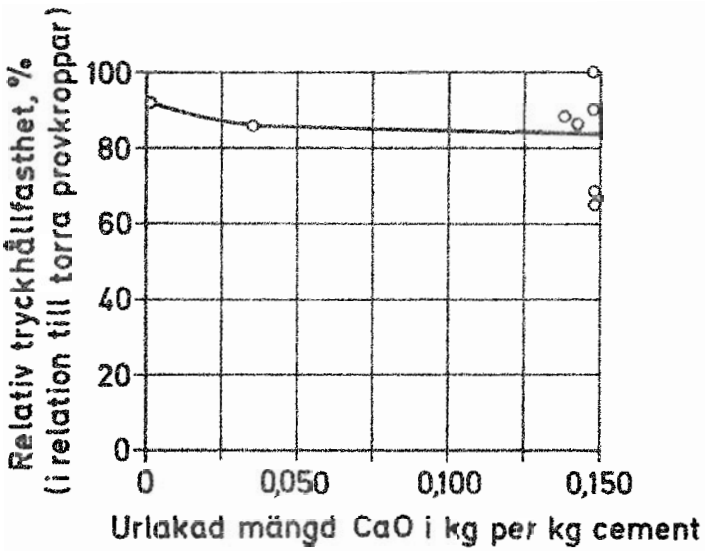



Fig 32. Urlakningens inverkan på betongens tryckhållfasthet i första urlakningsstadiet. (enl. Ruettgers et al/36)

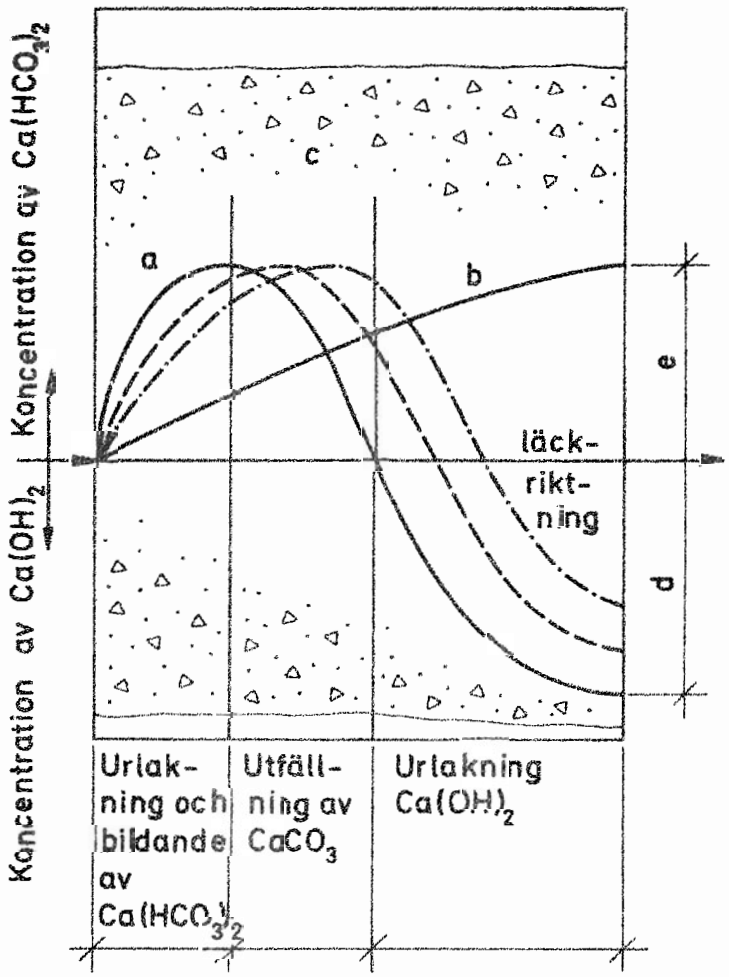



Fig 33. Schematisk framställning av korrosionens utveckling när kolsyrehaltigt vatten passerar genom en betongkonstruktion (enl. Moskvin/45).

a. Inledande stadium av korrosionen.
b. Långt framskridet stadium av korrosionen.
c. Porös betong
d. Koncentration av $Ca(OH)_2$ i läckvattnet.
e. Koncentration av $Ca(HCO_3)_2$ i läckvattnet.

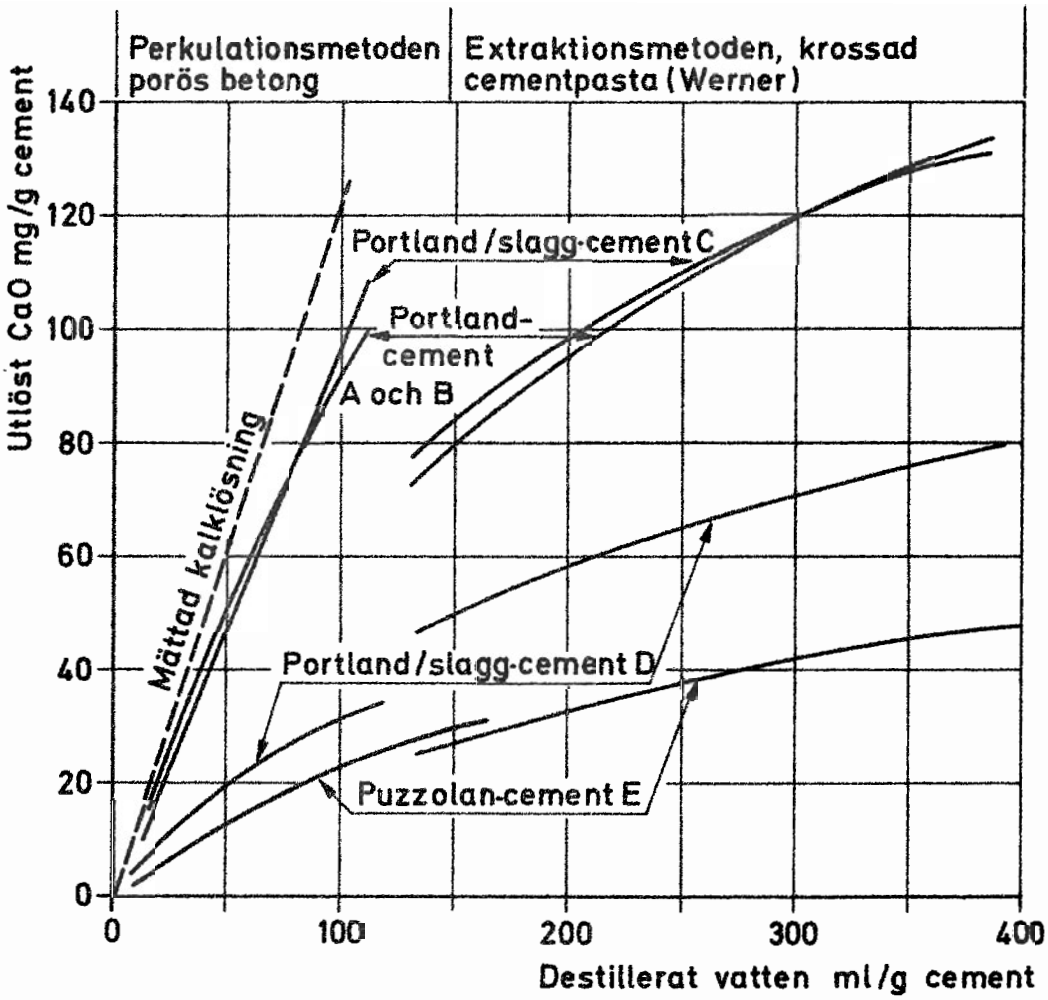



Fig 34. Urlakad CaO från olika cement (enl. Lea/54)

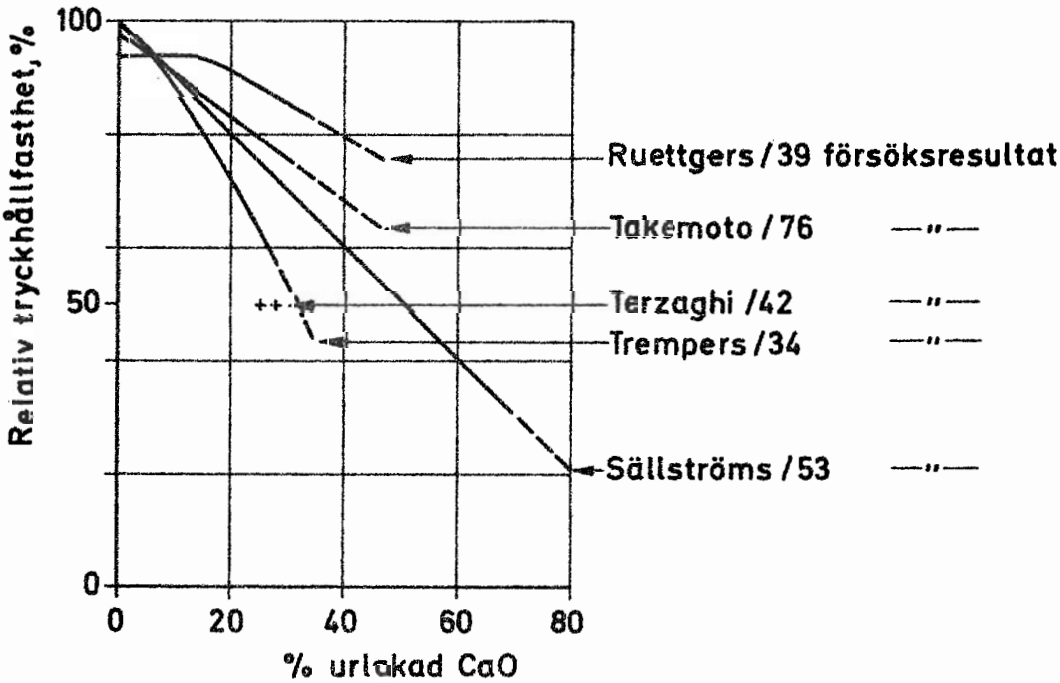



Fig 35. Samband kalkurlakning-tryckhållfasthet. Sammanställning av resultaten från olika undersökningar.

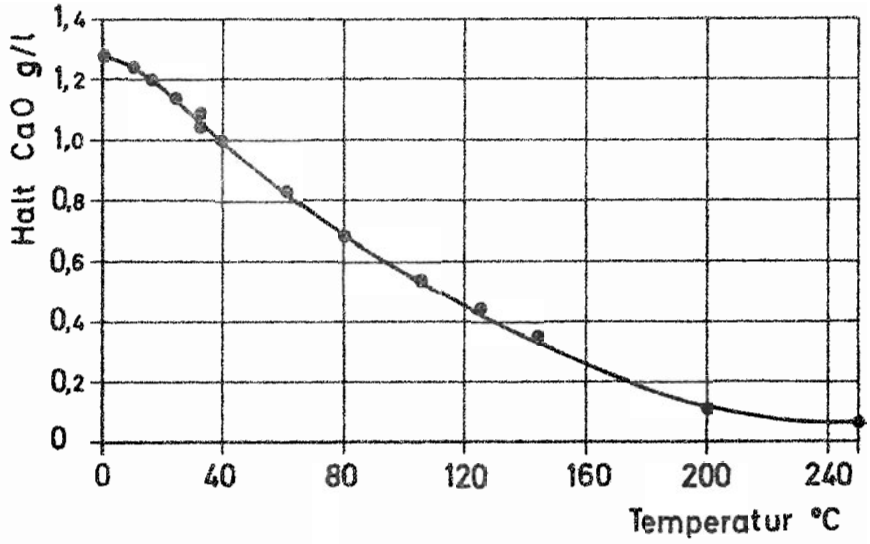



Fig 36. Kalciumhydroxids löslighet i vatten vid olika temperaturer ( Taylor /64).

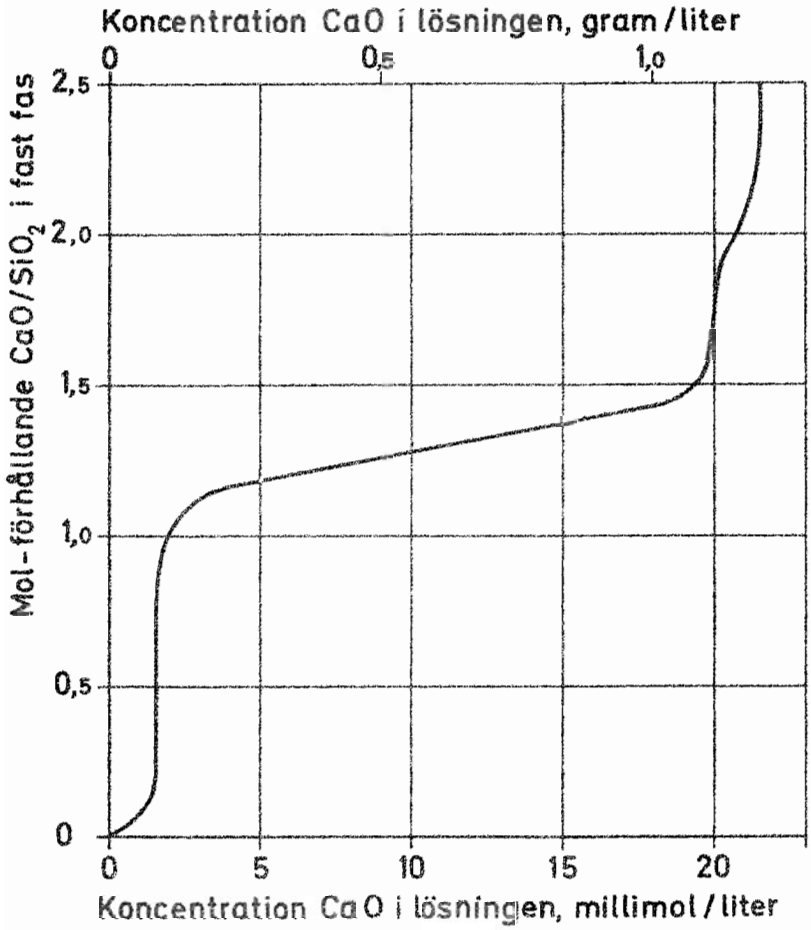



Fig 37. Jämviktsdiagram för kalciumhydrosilikater i kalciumhydroxidlösning.(Lea /54)

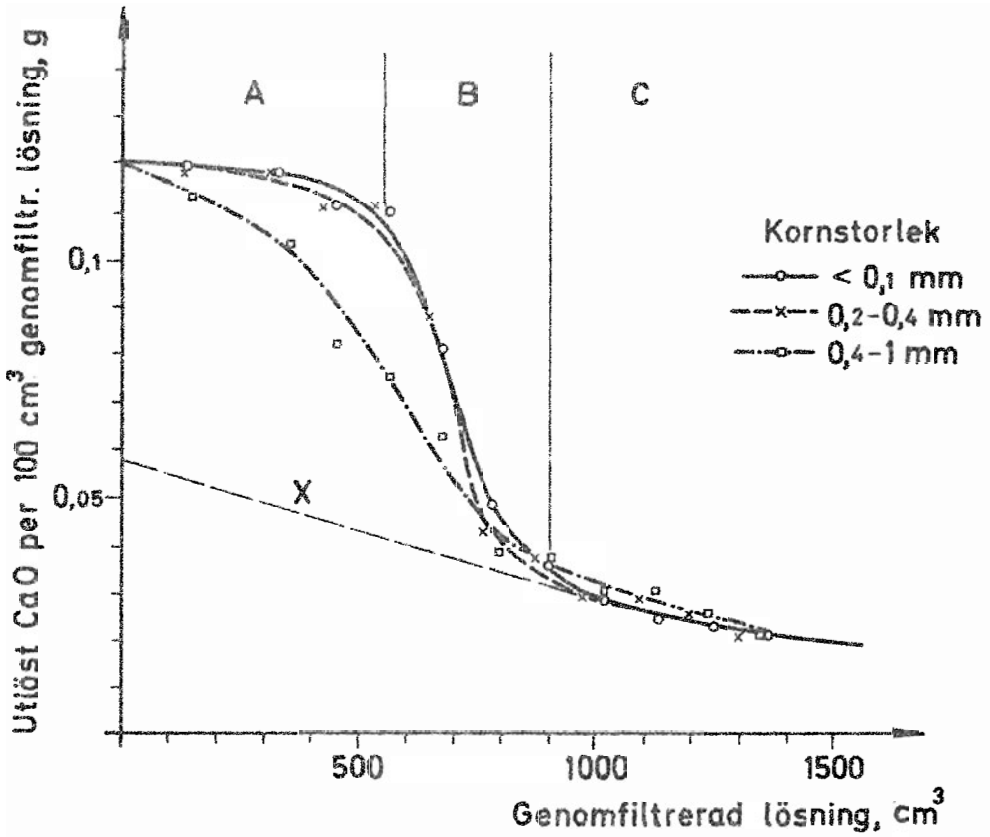



Fig 38. Kalkurlakning ur hårdnad cement. Extraktionsförsök med destillerat, kolsyrefritt vatten som passerar prov av krossad cementpasta (Sundius o Assarson/64).

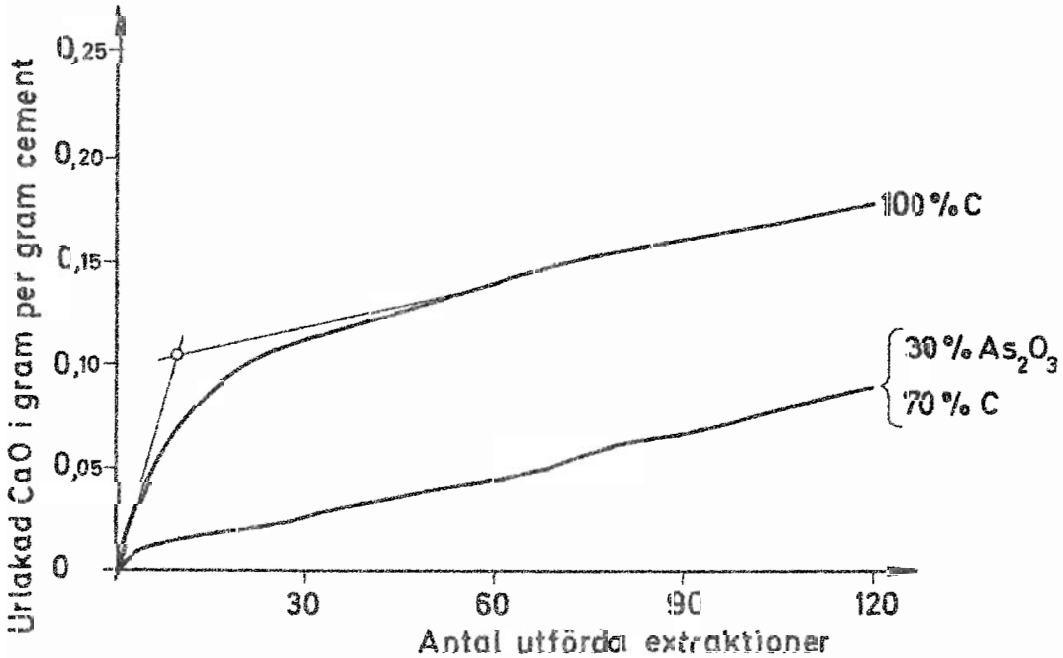



Fig 39. Extraktionsförsök på hårdnad cement enl. Werner/65
Totalt urlakad CaO som funktion av cntl. extraktioner.
Övre kurvan: Ren cement
Undre kurvan: Cement med 30 % $As_2O_3$

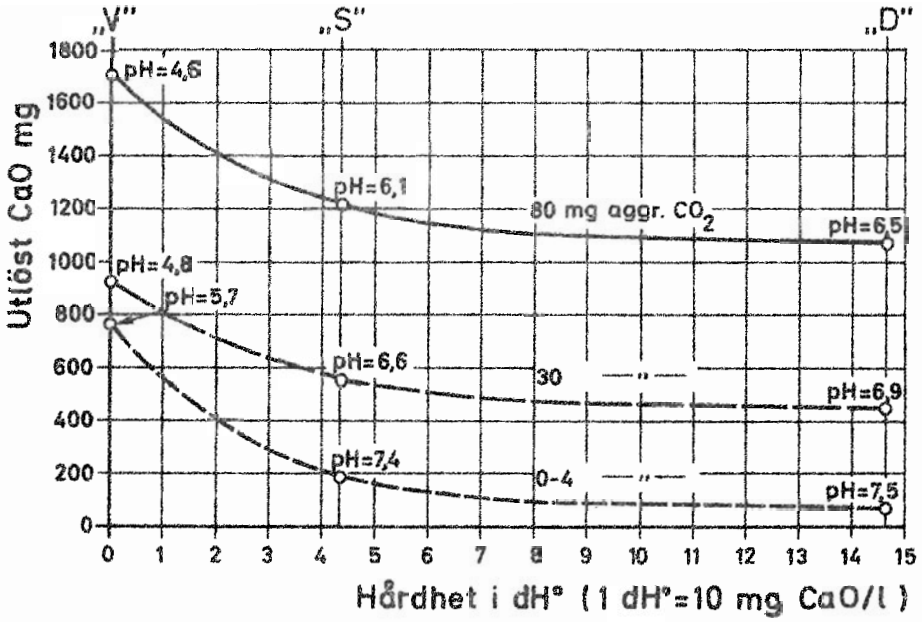



Fig 40. Extraktionsförsök på hårdnad, karbonatiserad cementpasta med olika vattentyper (Frost och Virgin /69) Total mängd urlakad CaO efter 8 dygns extraktion från 10 mg krossad cementpasta. Passerad vattenmängd: 48 liter.

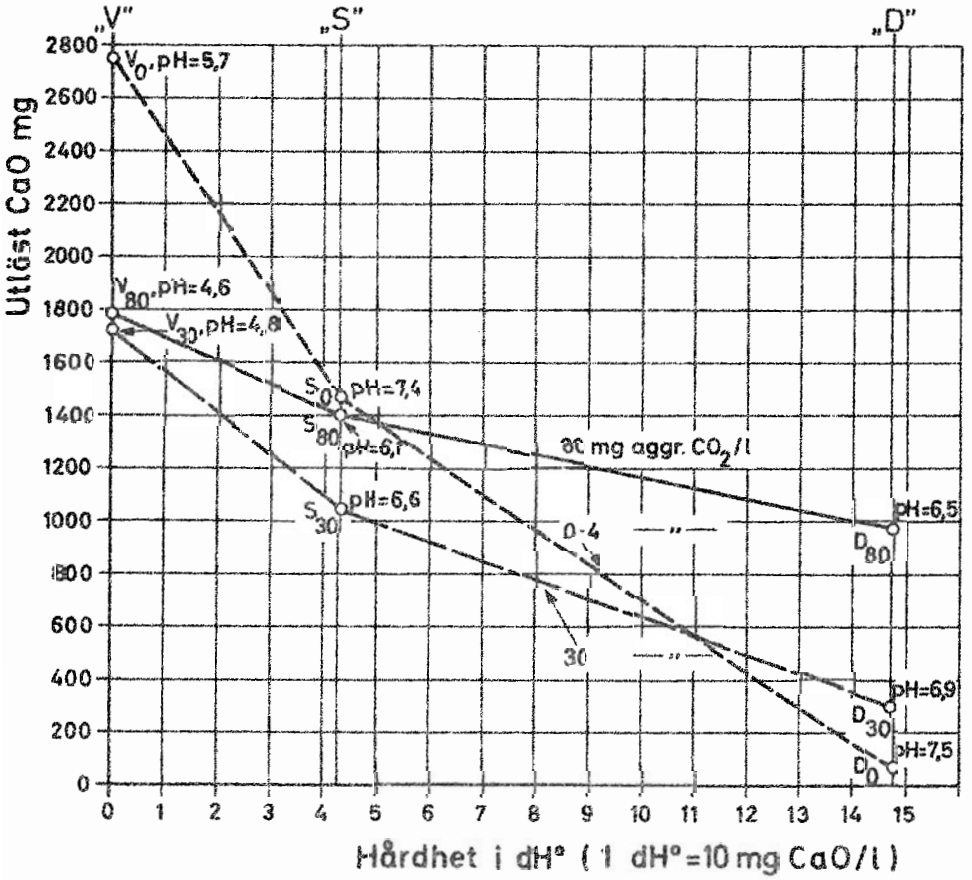
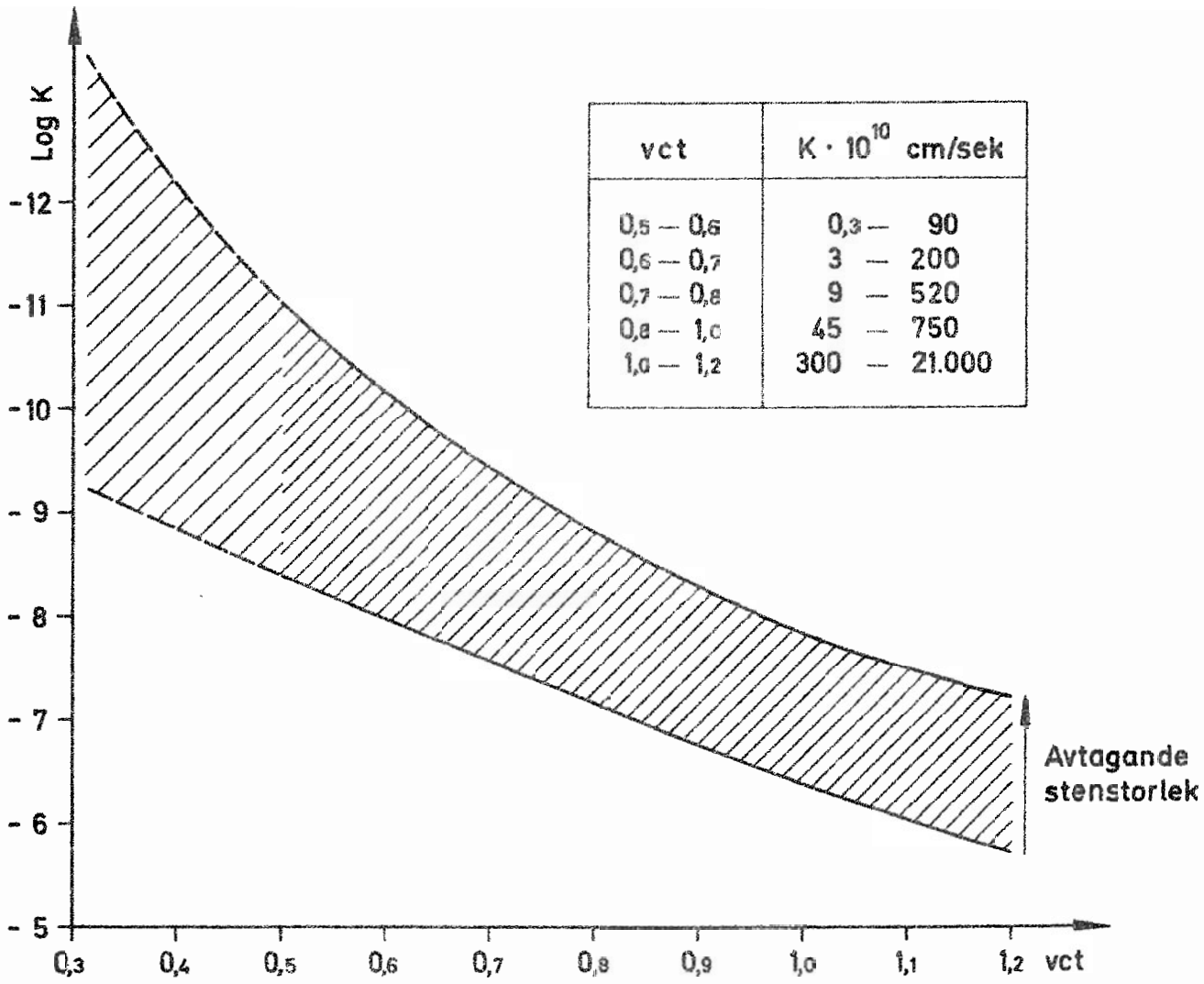



Fig 41. Extraktionsförsök som i fig 40, men på icke-karbonatiserad cementpasta.




| vct | $K \cdot 10^{10}$ cm/sek |
|---|---|
| 0,5 — 0,6 | 0,3 — 90 |
| 0,6 — 0,7 | 3 — 200 |
| 0,7 — 0,8 | 9 — 520 |
| 0,8 — 1,0 | 45 — 750 |
| 1,0 — 1,2 | 300 — 21.000 |

Fig 42. Permeabilitetskoefficienten för betong och bruk. Log K som funktion av vct. (Ruettgers resultat i bearbetning av Bergström och Nielsen/73).

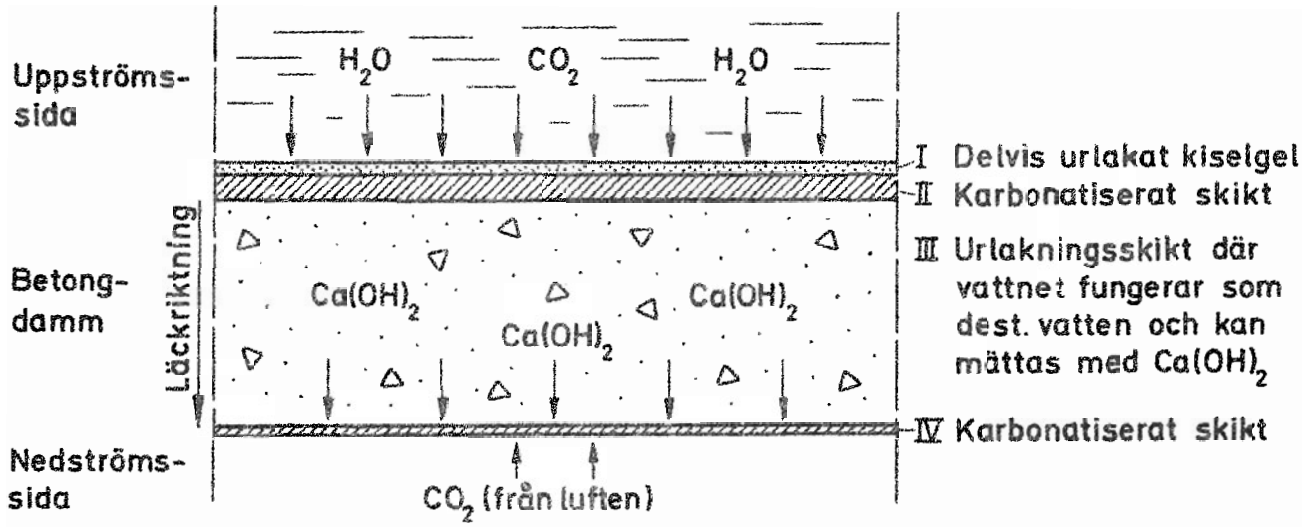



Fig 43. Urlakningszoner vid direkt genomströmning av betong utsatt för ensidigt vattentryck.

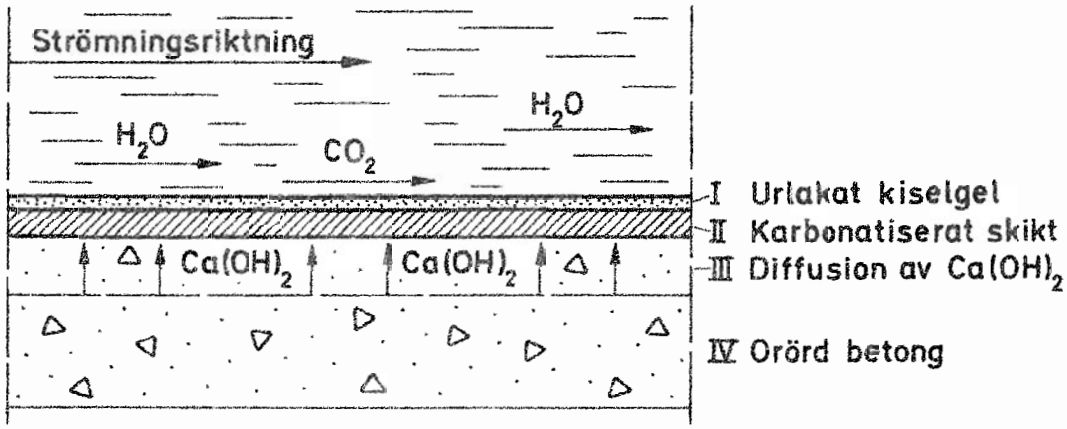



Fig 44. Urlakningszoner vid en fri betongyta utsatt för strömmande vatten (enl./52).

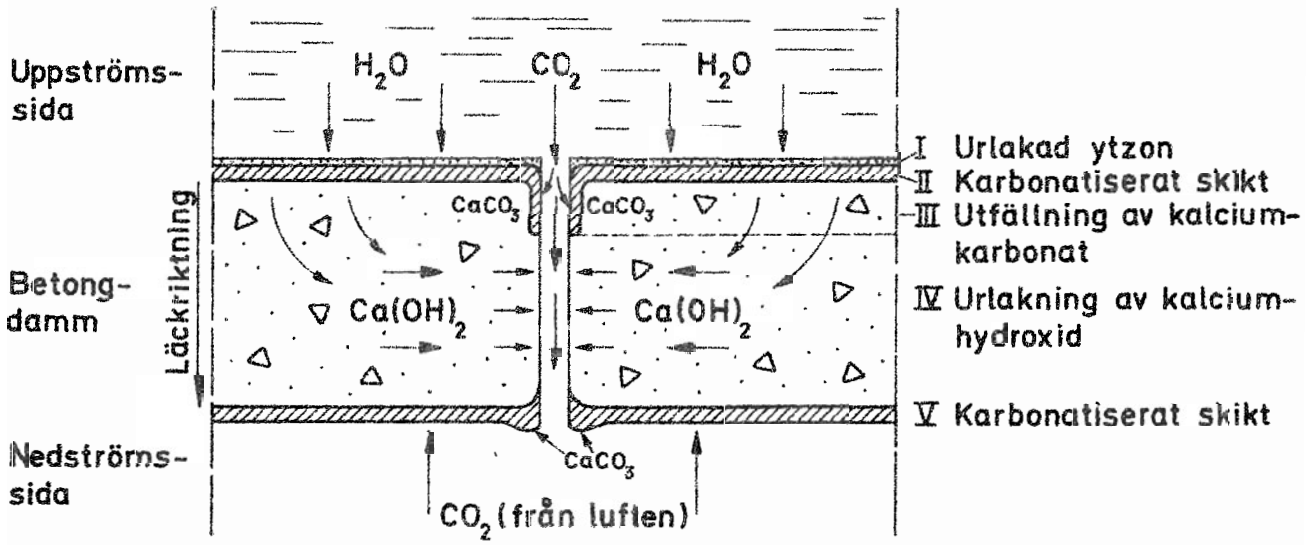
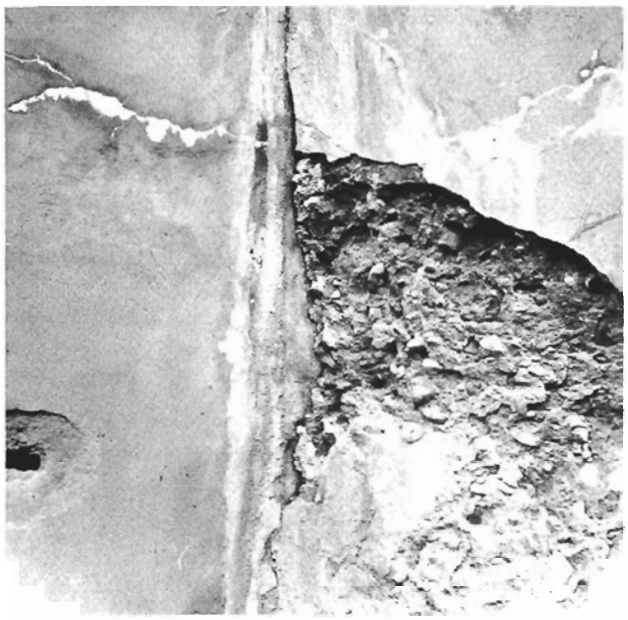



Fig 45. Urlakningszoner vid vattenströmning genom spricka i betong utsatt för ensidigt vattentryck.

Fig 46. Från vattensidan av turbinsump som under ca 45 år utsatts för vattenpassage.



a.

b.

Fig 47 a och b. Mager betong, totalförstörd genom kombinerad effekt av urlakning och frost.

Fig 48. Fogskada och ytfrätning vid ca 25 år gammal stödmur vid regleringsdamm, uppströmssidan.

Fig 49. Storfinnforsdammen. Rännor för uppsamling av läckvatten vid monolit 47 i det inbyggda utrymmet.

Fig 50. Storfinnforsdammen. Uppsamlingsränna 3, vid monolit 43.

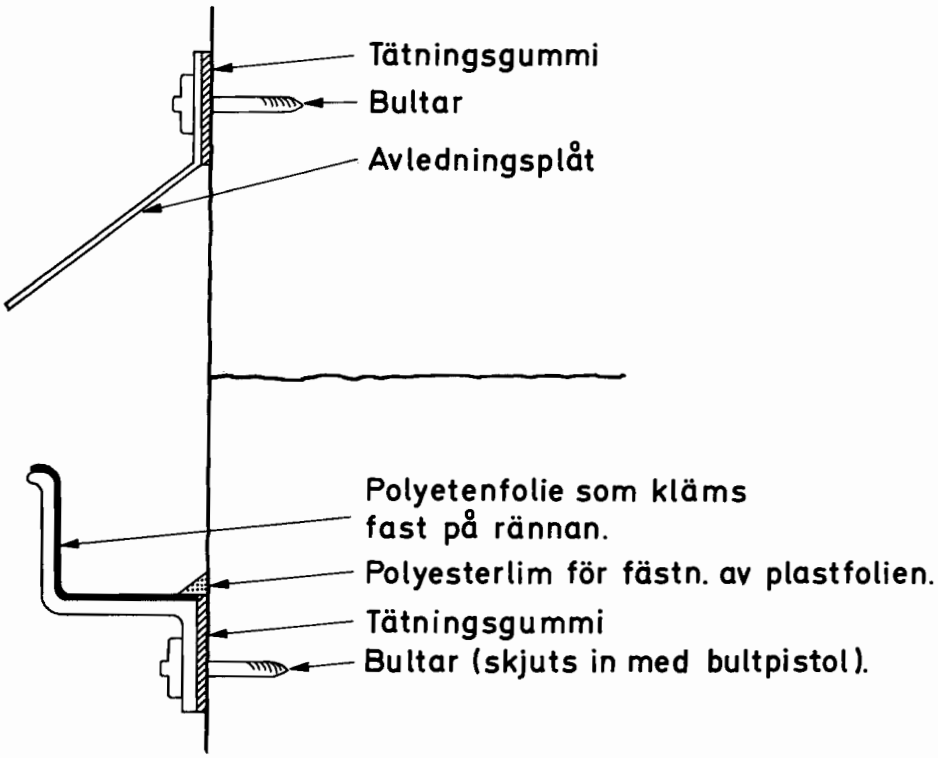



Fig 51. Principskiss för arrangemang av nya mätrännor vid sprickorna.

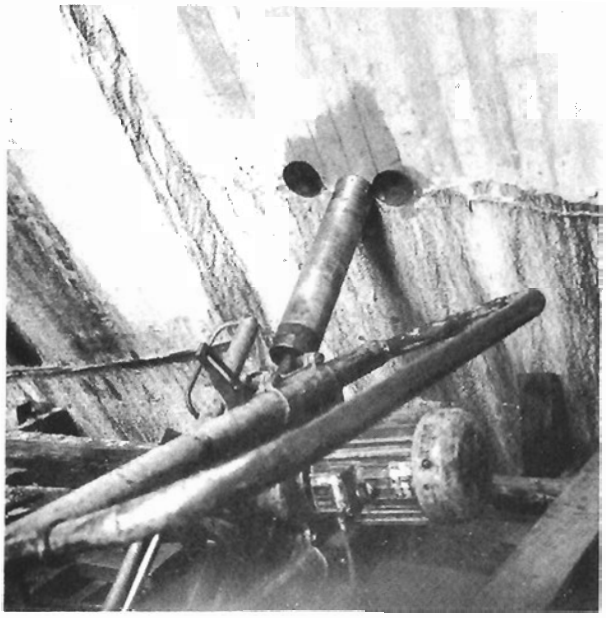


Fig 52. Storfinnforsdammen. Utborrning av provkärnor från spricka vid dammens nedströmssida.

Fig 53. Storfinnforsdammen. Vertikal utborrning av provkärnor.

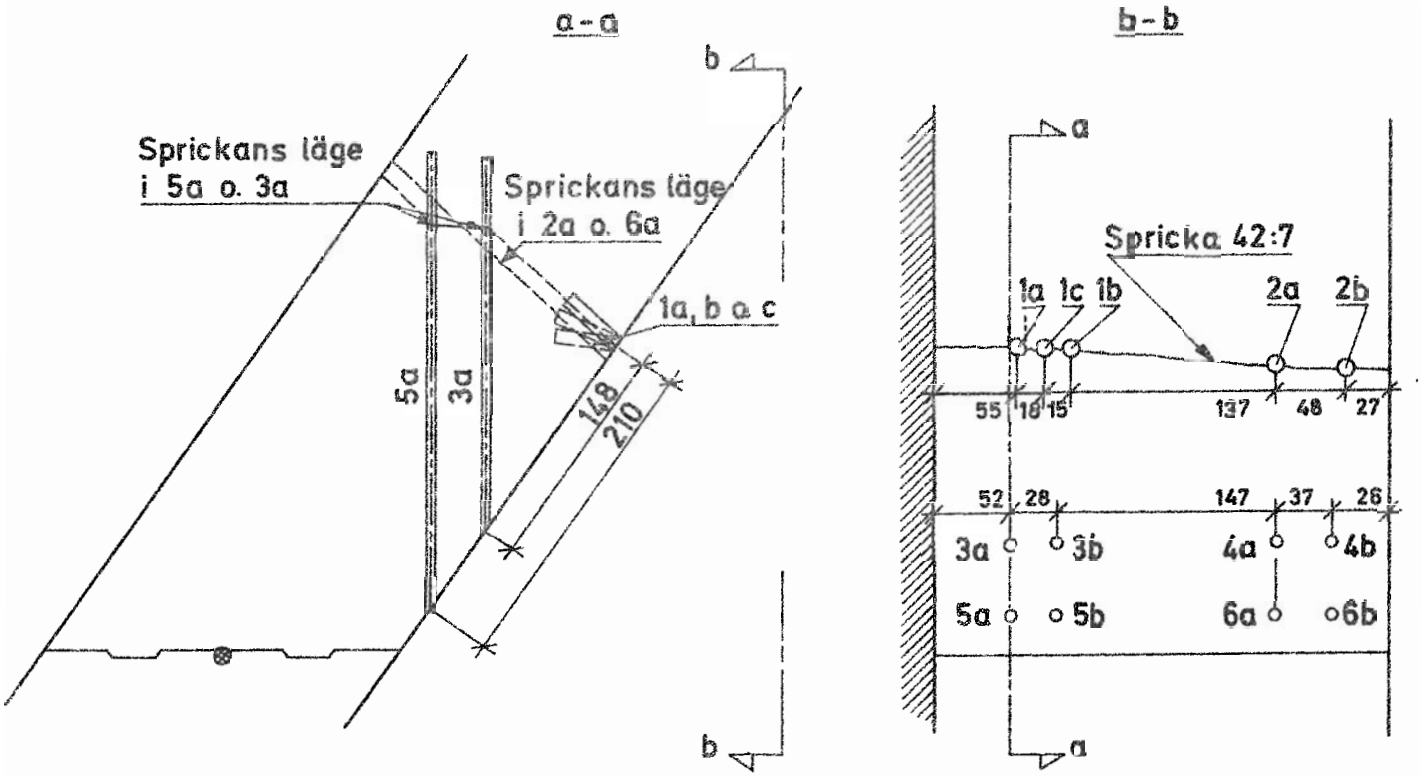



Fig 54a. Storfinnforsdammen. Borrhålens placering. Monolit 42.
Skala 1:50

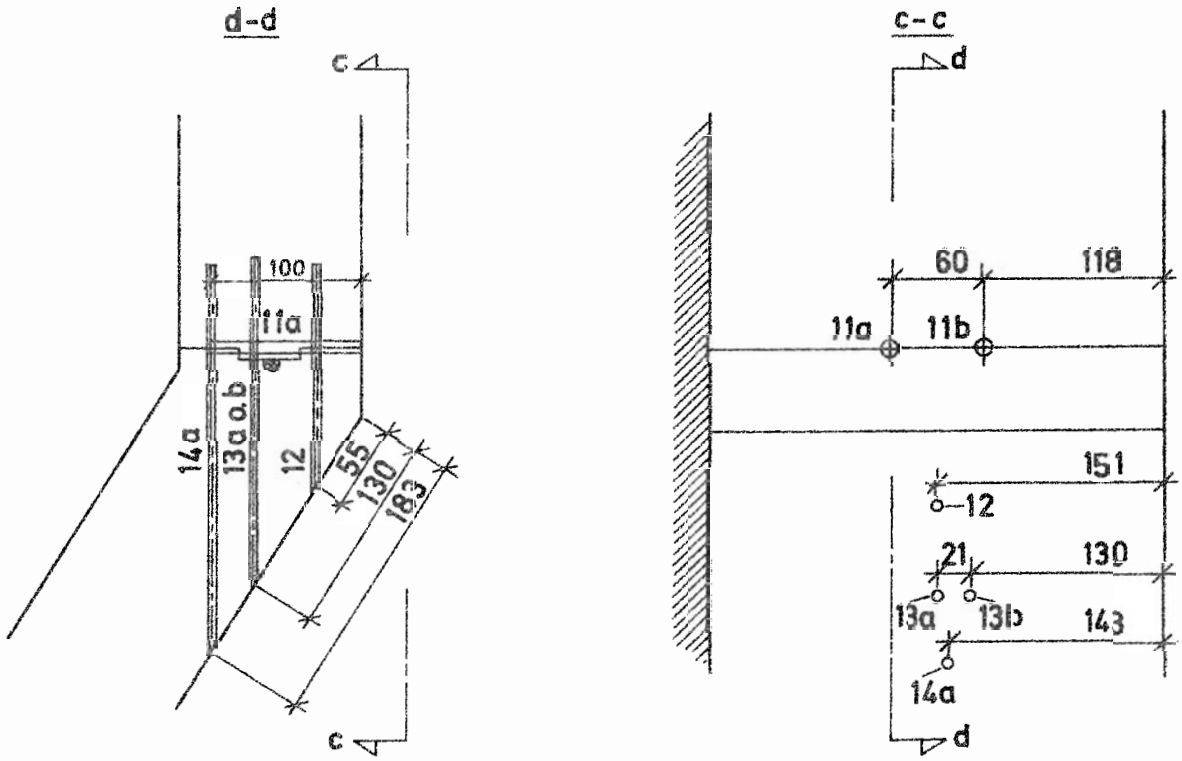
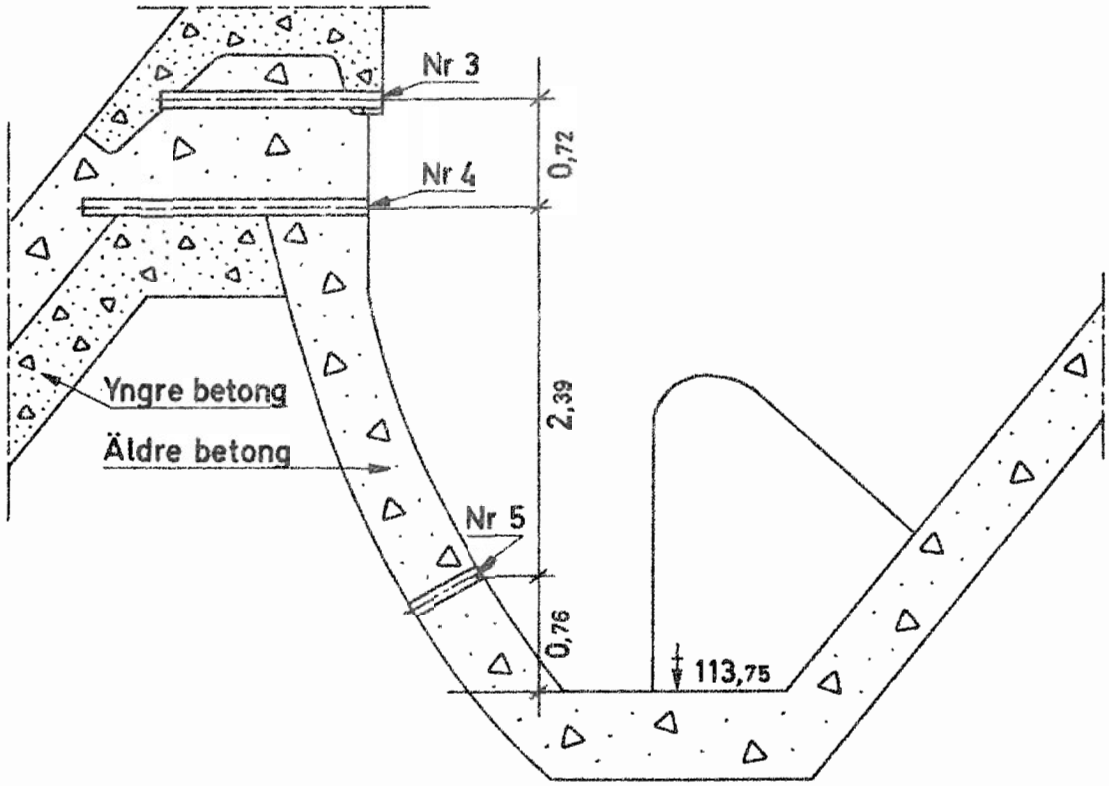



Fig 54b. Storfinnforsdammen. Borrhålens placering. Monolit 7.
Skala 1:50

Sektion C = 49,10 (Sektorsutskov)




Sektion C = 52,00 (Sektorsutskov)

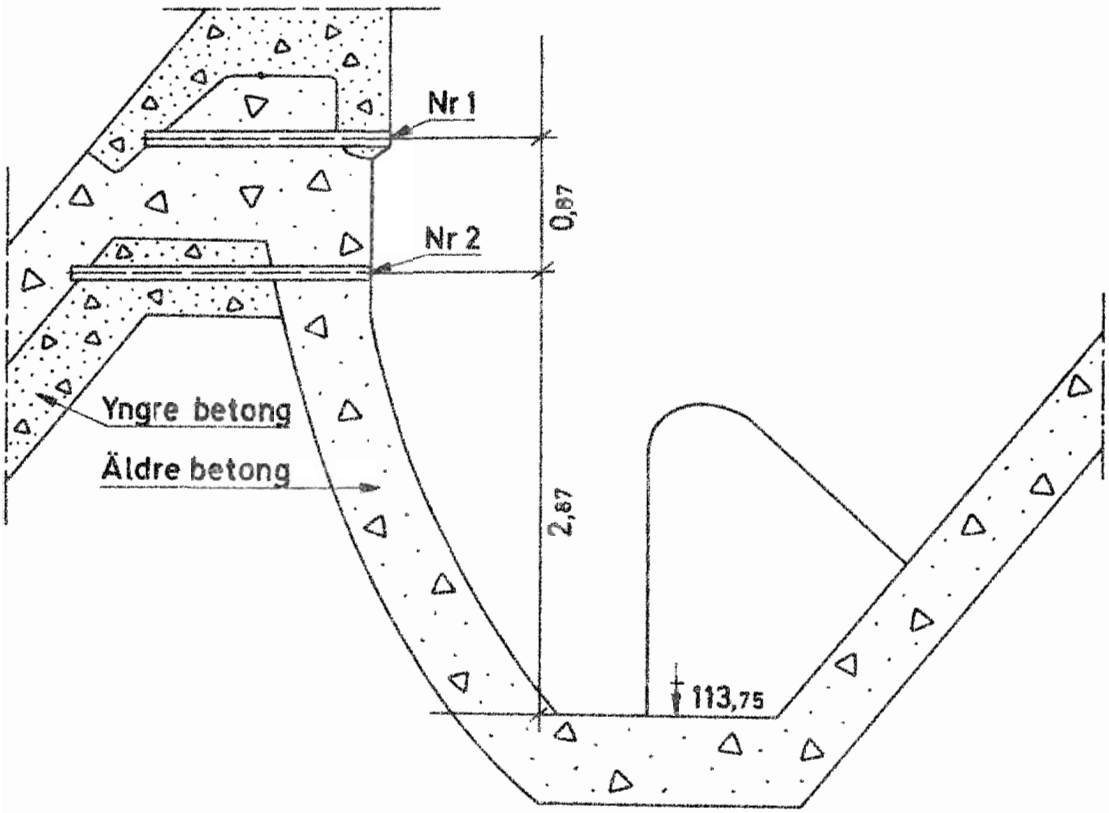
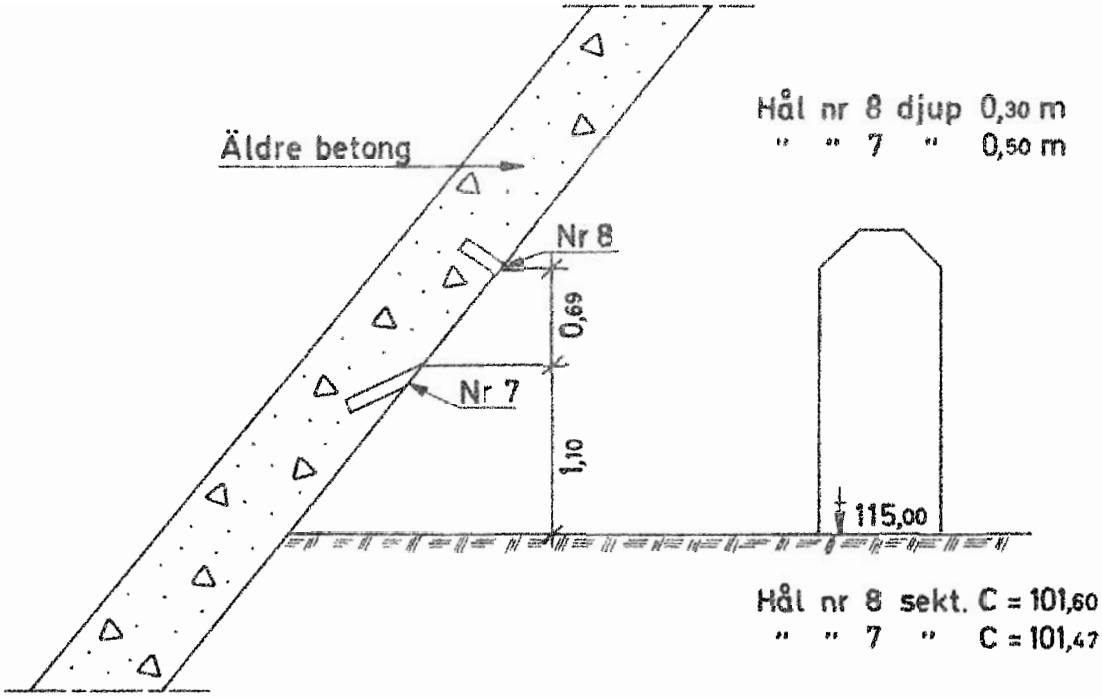



Fig 55a. Krångfors. Borrhålens placering vid sektorutskoven.

Skala 1:50



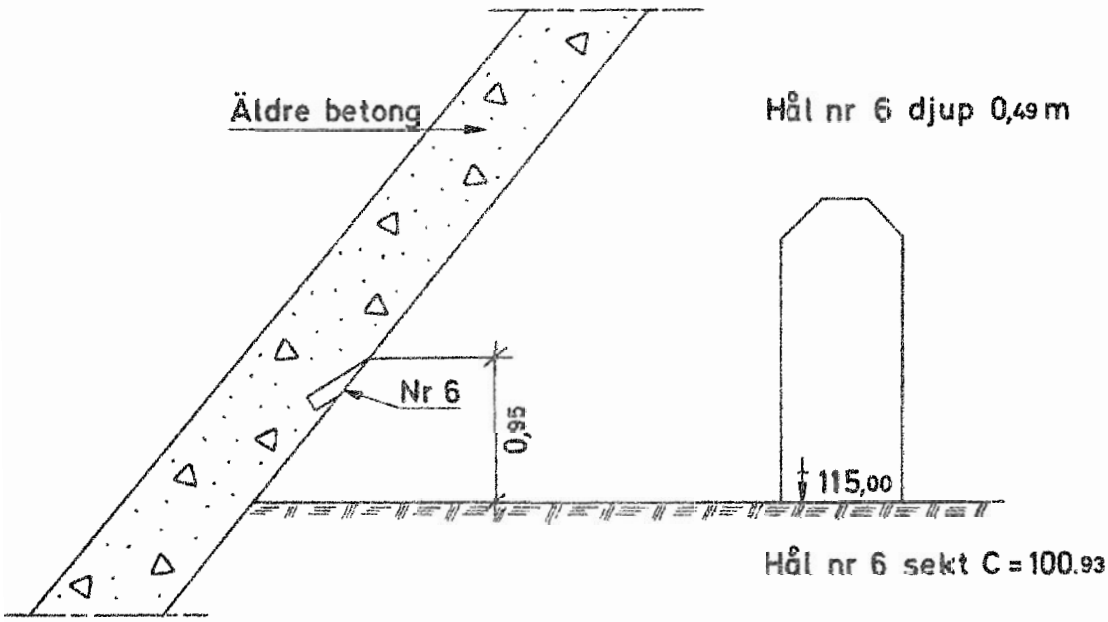




Fig 55b. Krångfors. Borrhålens placering i frontplattan i höger anslutningsdamm.

Skala 1:50

Fig 56. Krångfors Kraftstation. Sprickbildning och kalkurlakning vid frontplatta i anslutningsdamm. (Byggnadsår 1928)

Fig 57. Storfinnforsdammen. Mätning av ljudhastighet vid gjutfog och dilatationsfog.

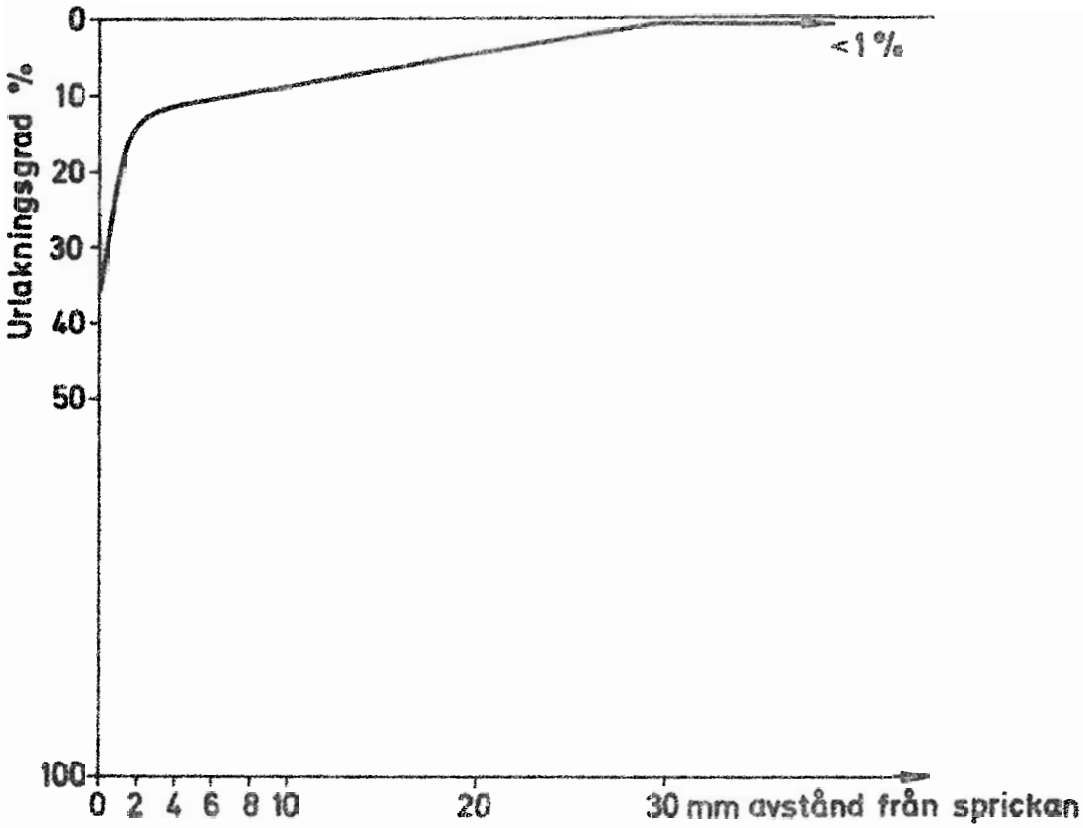



Fig 56. Urlakningsgrad vid den undersökta sprickan. 100 % motsvarar total urlakning av cementets ursprungliga halt CaO.

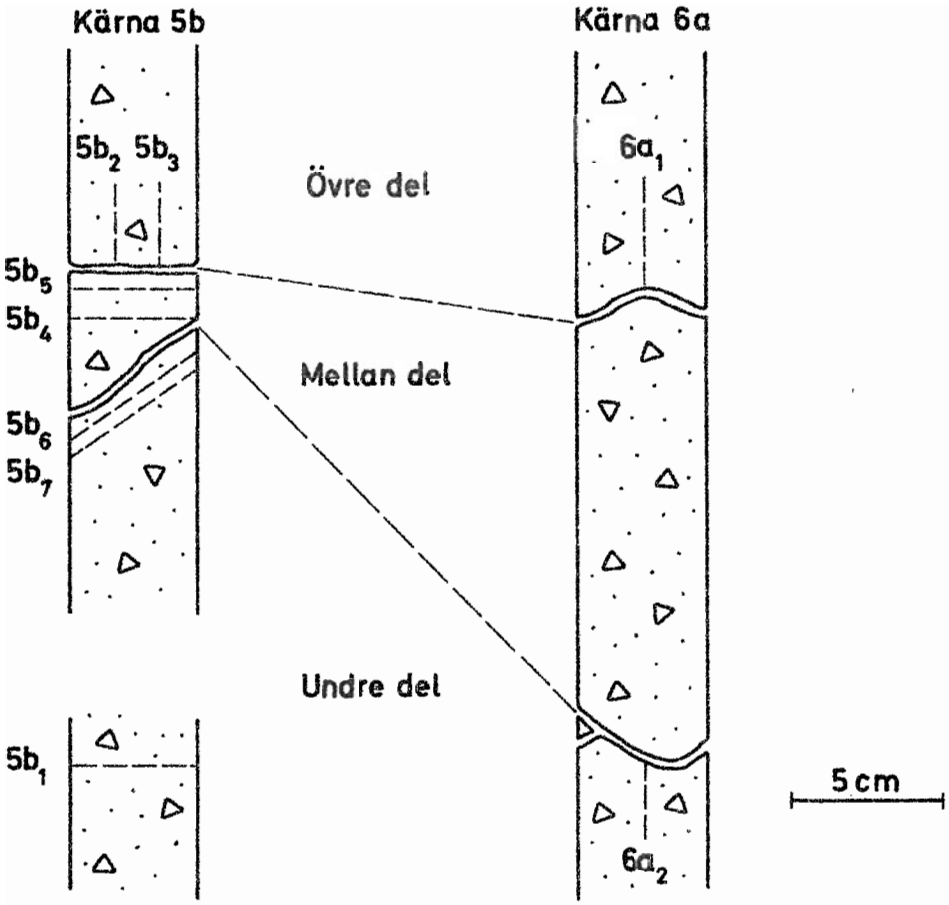



Fig 59. Lokalisering av tunnslip för mikroskopisk analys. (Larsen/85)

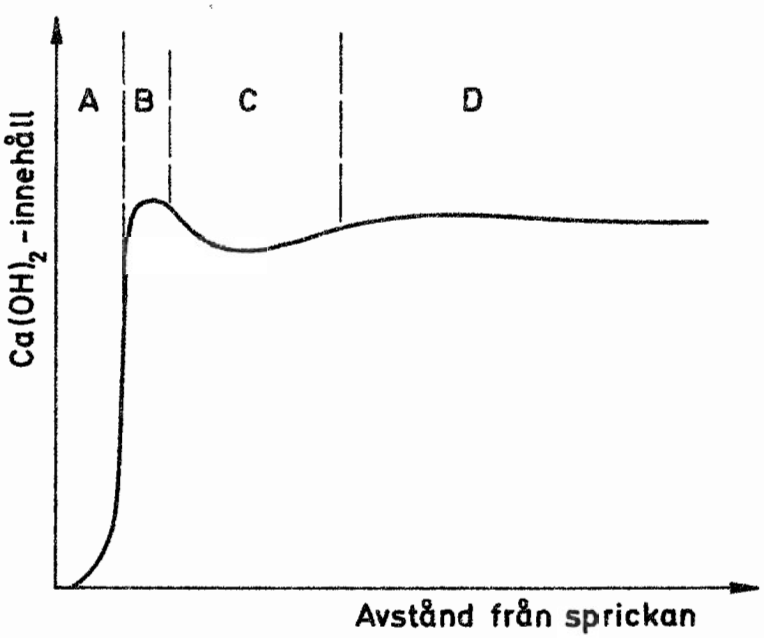



Fig 60. Generaliserat diagram över $Ca(OH)_2$-innehållet på olika avstånd från sprickan.

Zon A ~ 2-3 mm
Zon B ~ 1-2 mm
Zon C ~ 10 mm (Larsen/85)

# Inventering av svenska korrosionsskadefall /5

## Sammanfattning av huvudresultaten

### 1. Svenska Betongföreningens utredning 1917/6

Utredningen omfattade ett antal slakarmerade betongkonstruktioner med ålder varierande mellan 3-9 år. Skadorna var primärt avskalning och sprickbildning och sekundärt korrosion på armeringen i anslutning till den dåliga betongen. Sprickorna varierade mellan 0,1-3,0 mm, och vid de större sprickorna uppvisade armeringen omfattande korrosion med c:a 25 % tvärsnittsreduktion vid 9 års ålder. Korrosionsskadorna bedömdes av utredningen vara orsakade av en kombinerad effekt av aggressiv industriatmosfär (järnvägsanläggningar) och sprickbildning i betongen. Vid sprickor < 0,1 mm fanns inga tecken till korrosion.

### 2. Utredning i samband med rivningen av "Herserudshissen", Stockholm 1948/7

Hissens bärande pelare och brobana uppvisade vid c:a 36 års ålder omfattande skador i form av korrosion på armeringen, avskalning och sprickbildning. Utredningen visade, att betongen tillverkats med cementhalt c:a 350-370 kg/m$^3$ och mycket styv konsistens. Betongens kvalitet varierade mycket genom att komprimeringen i vissa delar varit otillräcklig. Korrosionsskadorna koncentrerades till områden med sprickor och porös betong, medan delar av konstruktionen, där betongen var välkomprimerad, ej uppvisade korrosionsskador även vid tunna täckskikt (c:a 10 mm). Utredningen anser huvudorsaken till korrosionsskadorna vara, att betongen i vissa delar blivit otillräckligt komprimerad, vilket har givit otät, porös betong och ofullständig kringgjutning av armeringen. Miljön har varit medelkorrosiv, storstadsmiljö.

### 3. Fältundersökning i norra Sverige 1954-55/8

Utredningen avsåg att studera sambandet mellan använda tillsatser av $CaCl_2$ vid vintergjutningarna och förekomst av korrosionsskador. Konstruktionerna var huvudsakligen bjälklag och varierade i ålder mellan $1^1/2$ - 14 år. De observerade korrosionsskadorna hade ej givit anledning till reparationer. Betongkvaliteterna varierade i området K200 - K300, och tillsats av $CaCl_2$ avsågs maximerat till 1,5 % av

cementvikten, men analyser visade att lokalt har förekommit kloridkoncentrationer upp till 8 % av cementvikten. Utredningen visade att omfattande korrosionsskador endast förekommit i samband med gjutfel (otillräcklig bearbetning) och lokala överdoseringar av $CaCl_2$.

4. Skada på armering i Martin-verk 1960/9

Utredningen omfattar korrosionsskador på armeringen i betongbjälklag över en Martin-ugn i ett stålverk. Ålder vid tidpunkten för utredningen c:a 12 år.

Skadorna visades i form av avsprängda täckskikt och utredningen konkluderar med att skadorna uppstått genom att korrosionsbefrämjande svavelgaser från ugnen trängt in till armeringen genom mikrosprickor i betongen. Sprickorna anses uppkomna genom att betongen under lång tid utsatts för hög temperatur (c:a 100 °C).

===

Ovan angivna utredningar omfattar konventionella, slakarmerade betongkonstruktioner.

===

5. Skador på strängbetongbalk 1958/10

Utredningen omfattar korrosionsskador på 2 år gamla strängbetongbalkar uppbärande en rad elektrolyskar. Balkarna var gjutna av betong med kvalitet K600 och armeringens täckskikt var 15-20 mm. Skadorna yttrade sig som rostsprängningar och sprickbildning. Utredningen visade, att balkarna var utsatta för läckage från elektrolyskaren och att det bildades kontaktbrygga genom utfällda saltlager och därigenom elektriskt strömläckage över balkarna. Skadorna var koncentrerade till områden, där strömläckage kunnat uppstå, och miljön var således extremt korrosiv.

6. Skador på takbalkar av strängbetong 1959/11

Utredningen omfattar korrosionsskador på takbalkar av strängbetong i hall för betning av rostfritt stål. Balkarna var av samma kvalitet som i exempel 5, men utredningen visade att täckskikten i vissa delar av balkarna blivit felaktiga och av tjocklekar varierande mellan 1,5 - 5 mm. Balkarna var utsatta för ångor från betningskaren, som innehöll fluorväte (HF) och "Kungsvatten" (1 vol $HNO_3$ + 3 vol HCℓ).

Miljön får karakteriseras som mycket korrosiv. Skadorna yttrade sig som avsprängning av täckskikt och rostutfällningar. Utredningen anger, att skadorna uppkommit genom att täckskikten varit otillräckliga i den rådande miljön.

7. Skador på värmeslingor i golv 1958/12

Utredningen omfattar korrosionsskador på värmerör av stål ingjutna i golvbruk. Skadorna upptäcktes c:a 6-8 månader efter ingjutning. Rören var vid ingjutningen direkt upplagda på bjälklagsbetongen, och golvbruket hade cementhalt c:a 350 kg/$m^3$ och mycket styv konsistens. Kalciumklorid hade tillsatts bruket men endast vid vissa delar av gjutningen. Doseringen uppges ha varit < 1 % av cementvikten.

Utredningen visade, att kringgjutningen av rören i vissa delar varit mycket dålig och bruket hade givits otillräcklig komprimering. Detta anses ha varit den primära orsaken till skadorna. Tillsatsen av $CaC\ell_2$ hade accelererat angreppet och varit medverkande orsak till den snabba uppkomsten av genomgående hål i rören.

8. Skador på värmeslingor i golv 1961/13

Även denna utredning omfattar korrosionsskador på värmerör av stål ingjutna i golvbjälklag. Skadorna uppstod i detta fall c:a $5^1/2$ år efter ingjutningen. Utredningen visade att rören var ingjutna i golvbruk av mycket låg cementhalt, c:a 150 kg/$m^3$ och hög porositet, c:a 25-30 %.

Även i detta fall hade $CaC\ell_2$-haltigt tillsatsmedel använts. Utredningen anser, att huvudorsaken till skadorna varit, att den magra, porösa betongen, som omgav betongen, ej ger något skydd mot korrosion. Att skadorna ej hade uppkommit tidigare förklaras genom att rören legat torrt. Av någon anledning har sedan läckage uppstått, varefter korrosionen framskridit mycket snabbt. Vid utredningen var värmerören totalt sönderfrätta av rost.

Resultat av inspektionerna

| Anläggningsdel | Byggnadsår | Observationsställets beteckning | Observationer på betongytan: Kalkutfällning | Observationer på betongytan: Rostutfällning | Läckning | Uppmätt täckskikt mm | Antal undersökta järn | Rostgrad | Anmärkning |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Hammarforsen, maj 1962** | | | | | | | | | |
| Aggr. 5. Tillopps-botten höger | 1947-1949 | Spricka 27 (luftsidan) | 1-2 Rensad jan.62 | 1-2 | 2+ | 25-30 | 5 | 2-3 | Betongen i sprickan lös. |
| | | | | | | 45-50 | 1 | 3 | |
| Aggr. 3. Tillopps-botten höger | 1937-1940 | Spricka 8 (luftsidan) | 1 Rensad dec.61 | 1 | 2 | 47-50 | 2 | 0-1 | Horisontellt järn, utan sprickor. |
| | | | | | | 80 | 1 | 3-4 | Vertikalt, genomgående järn. |
| Aggr. 2. Tillopps-botten vänster | 1925-1928 | Spricka 10 (gjutfog) (luftsidan) | 1 Rensad 1961 | 2 | 4 | - | 2 | 0-½ | Horisontella, ej genomgående järn. |
| -"- | -"- | Spricka 30 (luftsidan) | 1 Rensad 1961 | 4 | 3 | 40 | 1 | 0-1 | Horisontellt, ej genomgående järn. |
| | | | | | | 75 | 2 | 2-3 | Vertikala, genomgående järn. |
| **Hammarforsen, maj-juni 1962** | | | | | | | | | |
| Aggr. 1. Tillopps-botten | 1925-1928 | Gjutfog 47 Gjutfog 41 (vattensidan) | 2-3 | 2-3 | 2-3 | 15-120 | 11 | 0-2 | Observationerna betr utfällningar och läckning avser undersidan av tilloppsbottnarna. |
| Aggr. 2. | | Gjutfog 30, 32 och 35 (vattensidan) | 2-3 | 2-3 | 2-3 | 15-120 | 16 | 0-1 | Betongen lös i ytan intill ca 10-20 mm; sedan hård. |
| **Storfinnforsen, maj 1962** | | | | | | | | | |
| Samtliga observationer är från luftsidan, nedströms dammen. | | | | | | | | | |
| Pelare | 1950-1953 | Gjutfog 7:3H | 4 | 3-4 | 2-3 | 27 | 1 | 2-3 | |
| Frontplatta | -"- | Spricka 42:7 | 4 | 4 | 3 | 70-75 | 2 | 0 | |
| -"- | -"- | Spricka 39:8 | 4 | 4 | 3-4 | 75-80 | 3 | 1-2<br>3-4 | |
| -"- | -"- | Spricka 38:9 | 4 | 0 | 2-3 | 65 | 3 | 0 | |
| -"- | -"- | Gjutfog 23:2 | 3-4 | 3-4 | 2-3 | 40-60 | 2 | 3-4 och 0 | Noll vid täckskikt 60 mm. |
| -"- | -"- | Spricka 21:5 o. 21:4 | 3 | 4 | 2 | 80-100 | 2 | 0-1 )<br>1-3 ) | Avskalning i ytan, frostskada. |
| -"- | -"- | Spricka 13:3 | 2-3 | 3 | 1-2 | 70 | 6 | 0 | |
| -"- | -"- | Gjutsår | - | 4 | 5 | - | 1 | 0 | Kraftig läcka över spricka 43:7. |

Resultat av inspektionerna

| Anläggningsdel | Byggnadsår | Observationsställets beteckning | Observationer på betongytan: Kalkutfällning | Observationer på betongytan: Rostutfällning | Läckning | Uppmätt täckskikt mm | Antal undersökta järn | Rostgrad | Anmärkning |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Laxviken regleringsdamm, maj 1962** | | | | | | | | | |
| Höger landfäste | 1923-1924 | Gjutfog (nedströms) | 2 | 2 | - | 85-100 | 2 | 0-1 | Gjutfogen låg ca 1.5 m över tröskeln. |
| -"- | | Gjutfog (uppströms) | 0 | 0 | | 90-100 | 1 | 0 | Järnet passerade ej fogen. |
| Bottenplatta | | Spricka (nedströms) | 0 | 0 | | 30-40 | 1 | 2-3 | Betongen i sprickan något lös. |
| Vänster landfäste | 1923-1924 | Gjutfog, nedströms | 2 | 2 | - | 130 | 1 | 0 | |
| | | Ytspricka | 0 | 0 | | 110 | 1 | 1-2 | |
| **Torrön regleringsdamm, maj 1962** | | | | | | | | | |
| Flottningsutskov | 1935-1939 | Spricka nedströms | 2 | 2 | - | 65-90 | 3 | 0-1 | Sprickvidd ca 1 mm. |
| Avloppstunnel | | Gjutfog | | | | 0-20 | 1 | 0-5 | Järnet delvis utan täckskikt. Ingjutningen av mycket varierande kvalitet. |
| Stödmur vid utskov | | Öppen gjutfog | | | | | 1 | 0-5 | Starkt korroderad i fogen (ca 5 cm öppen fog), utan rost i betongen. |
| **Anjan regleringsdamm, maj 1962** | | | | | | | | | |
| Utskovspelare | 1940-1941 | Gjutfog, uppströms | | | | 35 | 2 | 2-5 | Fogen under vattenytan ca 10 månader av året, betongen i fogen lös och ingjutningen dålig. |
| -"- | | Gjutfog, nedströms | | | | 60 | 1 | 0 | |
| Bottenplatta och flottningspelare | | Järnen delvis utan täckskikt | | | | 0-50 | 2 | 5-0 | Järnen rostangripna i det öppna området, sedan täckskiktet överstiger 10 mm är det utan rost. |
| **Juvulns regleringsdamm, maj 1962** | | | | | | | | | |
| Bottenplatta i utskovet | 1940-1941 | Spricka, nedströms | - | - | - | 35-50 | 1 | 0 | Porös, lös betong |
| Utskovspelare | | Delvis naket järn | - | - | - | 0-10 | 1 | 0-5 | Obetydlig korrosion sedan täckskiktet överstiger 5 mm. |

Resultat av inspektionerna

| Anläggningsdel | Byggnadsår | Observationsställets beteckning | Observationer på betongytan: Kalkutfällning | Observationer på betongytan: Rostutfällning | Läckning | Uppmätt täckskikt mm | Antal undersökta järn | Rostgrad | Anmärkning |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bergvik gamla kraftstation, september 1962 | | | | | | | | | |
| Turbinsump, höger | 1914-1916 | Vattensidan | 0 | 0 | - | 165-300 | 2 | 0 | Ingen tydlig spricka på vattensidan. |
| Turbinsump, vänster | | Gjutfog i vattenlinjen, vattensidan | 0 | 0 | - | 180 | 1 | 0 | Järnet passerade fogen. |
| | | Spricka, luftsidan | 3-4 | 0-½ | - | 105-195 | 2 | 0 | Betongytan urlakad och frostskadad (porös betong) |
| Traryd, maj/juli 1963 | | | | | | | | | |
| Frontplatta | 1943-1945 | Gjutfog, luftsidan | 2-3 | 2 | 2-3 | 50-75 | 2 | 0 | Även najtrådarna utan rost. |
| Majenfors, maj/juli 1963 | | | | | | | | | |
| Turbinsump | 1906-1910 | Porös betong, luftsidan | - | 3-4 | 2-3 | 200 | 2 | 0-1 | Betongen urlakad genom läckning. |
| Skogaby, maj/juli 1963 | | | | | | | | | |
| Turbinsump | 1920 | Vattenlinjenivån, vattensidan | - | - | - | 150 | 1 | 0 | Inga sprickor kunde ses på vattensidan. |
| Nedre Hemsjö, maj/juli 1963 | | | | | | | | | |
| Turbinsump | 1918 | Ytkrackelering, luftsidan | - | - | - | 60 | 1 | 0 | |
| -"- | | Spricka, luftsidan | 2 | 1 | 0-1 | 75 | 1 | 0-2 | |

Sammanställning av data och iakttagelser

| Anläggning | Ålder år | Betongdata | Observations-ställen | Allmän bedömning betr. förekomst av korrosionsskador | Anm. |
|---|---|---|---|---|---|
| **Hammarforsen** | | | | | |
| Aggregat 2 | 34-37 | Trass 20-25% Cementhalt 330-360 kg/m$^3$. | Sprickor och gjutfogar på tilloppsbottnarnas luftsida. | Rostningen koncentrerad till området i och omedelbart vid sprickan. Rostgraden varierade mellan 1/2 - 4. Inga allvarliga angrepp. | Atmosfären vid tilloppsbottnarnas luftsida bedöms vara ngt mer korrosiv än utomhusmiljön på orten genom ngt högre rel. fukthalt och temperatur. |
| " 3 | 22-25 | Silikatcement | | | |
| " 5 | 12 | Limhamn Std ca 330 kg/m$^3$. Täckskikt 25-80 mm. | | | |
| " 1 o. 2 | 34-37 | Trass 20-25 % Cementhalt 330-360 kg/m$^3$. Täckskikt 15-120 mm. | Sprickor och gjutfogar på tilloppsbottnarnas vattensida. | Endast ytlig rostfärgning i områdena vid sprickor/fogar grad 0-1 samt 2-3 vid ett par tillfällen. | Supplerande inspektion utförd av Hammarforsen Kraft AB, sommaren -62. |
| **Storfinnforsen** | | | | | |
| Dammen | 10 | Std. cement 275-340 kg/m$^3$. Täckskikt 25-100 mm. | Sprickor och gjutfogar på damm-monoliternas luftsida. | Obetydliga spår av rost även i sprickor med stora rostutfällningar. All rostning koncentrerad i och vid sprickorna, rostgrad varierande mellan 1/2 - 4. | Sprickvidderna kunde ej mätas men läckningen varierade från endast svag fuktning till rinnande vatten. Vattenanalyser visar pH mellan 11-12 hos läckvattnet. |
| Laxviken | 38-39 | - Täckskikt 30-130 mm. | Sprickor och fogar i landfästen och bottenplatta. Inga typiska obs.-ställen med ensidigt vattentryck. | Ingen rost på järnen i landfästena, rostgrad 2-3 vid sprickan i bottenplattan. | Täckskikt över armeringen mycket tjocka, 90-100 mm. Bottenplattan ca 10 mån. av året under vatten. Låg årsmedeltemp. Fritt exponerade järn dock mycket starkt korroderade. |
| Torrön | 23-27 | A-cement ca 350 kg/m$^3$. Täckskikt 0-90 mm. | Öppen fog, spricka samt järn med varierande täckskikt, delvis utan skydd av betong. | Obetydlig rost i spricka, grad 0-1. Järnen i öppen fog och utan täckskikt starkt korroderade, men utan rost så snart täckskiktet översteg 1 cm. | Järnen på vattensidan under vatten ca 10 mån. av året. Låg årsmedeltemperatur. |

| Anläggning | Ålder år | Betongdata | Observations-ställen | Allmän bedömning betr. förekomst av korrosionsskador | Anm. |
|---|---|---|---|---|---|
| Anjan | 21-22 | A-cement ca 350 kg/m$^3$. Täckskikt 0-60 mm. | Delvis fria järn uppströms samt järn i fog i flottn.-utskovet, nedströms och uppströms. | Fria järn och järnet i fogen, uppströms, angripen intill rostgrad 4-5. Täckta järn rostgrad 0. | Som ovan. |
| Juvuln | 21-22 | A-cement ca 350 kg/m$^3$. Täckskikt 0-50 mm. | Spricka i bottenplattan, nedströms, samt järn med varierande täckskikt. | Ingen rost i sprickan samt ingen rost utöver områdena utan täckskikt på övriga järn. | Som ovan. |
| Bergvik gamla | | | | | |
| Turbinsumparna | 45 | Bland.förh.enl. ritningarna 1:4:4 o. 1:5:7 Täckskikt 100-200 mm. | Insidan av sumparna i olika höjder, samt sprickor på sumparnas ytterväggar. | Ingen förekomst av rostangrepp på armeringen. | Betongen verkade hård och tät och ingjutningen god. Vid sprickorna på utsidan fanns rost- och kalkutfällningar. |
| Traryd | | | | | |
| Frontplattan | 18 | Standard cem. ca 330 kg/m$^3$. Täckskikt 50-75 mm. | Sprickor i frontplattan, nedströmssidan (från insp.-gången). | Inga rostangrepp. | Hög relativ fukthalt i luften i inspektionsgången. Ingjutningen tät och god. |
| Majenfors | | | | | |
| Turbinsumparna | 55 | Ingen uppgift om betongen. Täckskikt ca 200 mm. | Armeringen i ett område med urlakad, porös och otät betong. Från luftsidan. | Inga rostangrepp. | —— |
| Skogaby | | | | | |
| Turbinsumparna | 43 | Täckskikt ca 200 mm. | Armeringen i linjeområdet på vattensidan i en tömd turbinsump. | Inga rostangrepp. | —— |
| Nedre Hemsjö | | | | | |
| Turbinsumparna | 45 | Täckskikt 60-70 mm. | Luftsidans armering i västra turb.-sumpen. Ytkrackelering och spricka. | Obetydliga rostangrepp (0-2). | —— |

Bilaga 4
Nr —

# PROTOKOLL FÖR BALLASTUNDERSÖKNING

Datum 1/10 1961

## MATERIALUPPGIFTER:

| Prov nr | Materialbeteckning | Leverans från | Kornform | Humusgrad | Ler- och slamhalt | Spec. vikt |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | Ballast som använts i slipbruket | på byggplatsen | | | | x) |
| 2. | —"— —"— | —"— —"— | —"— | CBI | | |
| 3. | | | | | | |
| 4. | | | | | | |

x) Enl. uppgift från betongleverantören.

Arb. plats Ingjutna värmeslingor, Ektorp
Ballastgradering i slipbruk på arbetsplatsen och vid CBI:s gjutningar.

## SIKTANALYS:

| Sikt med fri maskvidd mm | 1 Stannar gram | 1 Stannar % | 1 Passerar Σ% | 1 Stannar Σ% | 2 Stannar gram | 2 Stannar % | 2 Passerar Σ% | 2 Stannar Σ% | 3 Stannar gram | 3 Stannar % | 3 Passerar Σ% | 3 Stannar Σ% | 4 Stannar gram | 4 Stannar % | 4 Passerar Σ% | 4 Stannar Σ% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 128 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 64 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | 0 | | | | | | | | |
| 8 | | | | 0 | | | | 1 | | | | | | | | |
| 4 | | | | 25,0 | | | | 8,6 | | | | | | | | |
| 2 | | | | 47,5 | | | | 49,5 | | | | | | | | |
| 1 | | | | 63,0 | | | | 69,6 | | | | | | | | |
| 0,5 | | | | 76,0 | | | | 81,3 | | | | | | | | |
| 0,25 | | | | 88,5 | | | | 89,6 | | | | | | | | |
| 0,125 | | | | 48,6 | | | | 48,7 | | | | | | | | |
| < 0,125 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Summa | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Finh. modul | $M_1$ = | | | 3,49 | $M_2$ = | | | 3,48 | $M_3$ = | | | | $M_4$ = | | | |

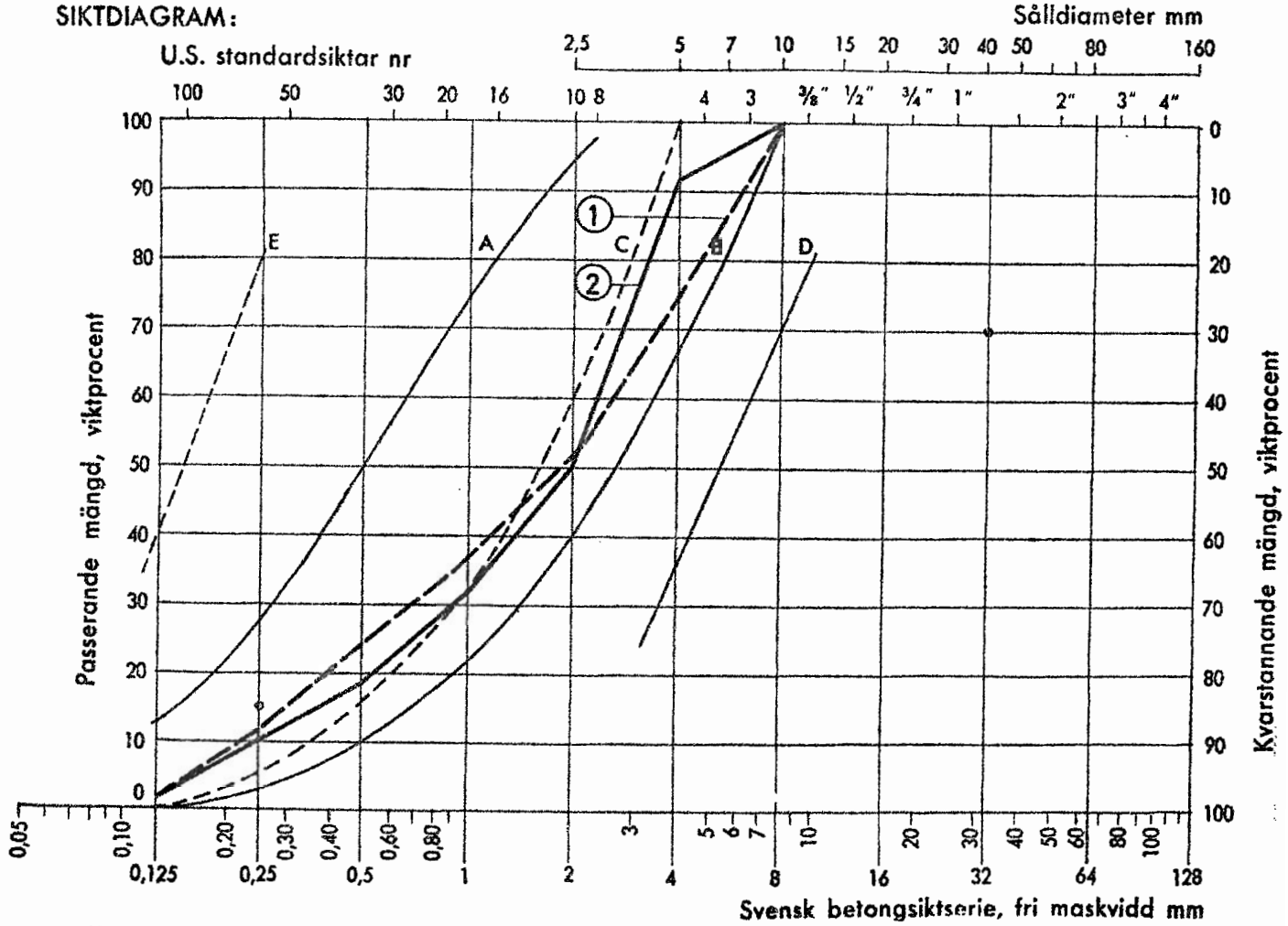
Beteckn. för kornform:
R = natursand, -grus
K = krossand, -grus
RS = rundad singel
AS = avlång (flat) singel
KM = kubisk makadam
AM = avlång makadam
SM = skärvig (flat) makadam

Beteckn. för humusgrad:
0 = ofärgad } lämplig
1 = gul }
2 = ljust rödbrun — användbar
3 = mörkt rödbrun } odug-
4 = mörkbrun } lig

Beteckn. för ler- o. slamhalt:
Höjden av ler- och slamskiktet efter ett dygn i % av materialprovets totala höjd anges.

Ang. ballastundersökningarnas utförande se Statliga Betongbestämmelser 1949, Del I Materialdelen, där även kurvorna A—E i siktdiagrammet kommenteras.

## SIKTDIAGRAM:




CEMENT- OCH BETONGINSTITUTET, STOCKHOLM 70

BRÖD. HANSSONS BOKTR. AB, MARKARYD 086

## Bestämning av halten $Cl^-$ i prov märkta A 11 och D 12

### Provberedning

Provet torkades i 2 dygn vid 105 °C. 0,5 kg prov krossades i en mortel och maldes sedan i kulkvarn 1 tim. Det malda provet siktades genom DIN 50, och provet med finhet > DIN 50 maldes ytterligare 1 tim. Det siktades åter genom DIN 6 och DIN 50. 1/5 av varje fraktion användes för analys.

### Utlösning av $Cl^-$

I en 1-liters rundkolv blandades provet med 10 g $Na_2CO_3$ och 100 ml destillerat $H_2O$. Blandningen kokades med återflödeskylare först i 15 min och efter tillsats av 100 ml destillerat $H_2O$ ytterligare 15 min. Lösningen filtrerades sedan genom ett glasfilter G3, och den olösta återstoden tvättades med varmt destillerat $H_2O$ tills tvättvattnet var kloridfritt. Lösningen och tvättvattnet överfördes i mätkolv.

### Titrering av $Cl^-$

Till den alkaliska lösningen tillsattes 50 ml $HNO_3$ 2+3, $AgNO_3$, aceton och $Fe_2(SO_4)_3$, som indikator. Överskottet av $AgNO_3$ titrerades med $H_4NSCN$ (Amonium rodanid).

Anm: Provberedning och utlösning av klorid enligt P Lundström.
Titrering av $Cl^-$ enligt Siporex.

| Prov nr | mg $Cl^-$ per mg prov | % $Cl^-$ | % $CaCl_2$ | g $CaCl_2$ per kg prov | $CaCl_2$ i % av cementvikt x) | % teknisk vara $CaCl_2$ (av cemvikt (75 %-ig) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A 11 | 0,000048 | 0,005 | 0,008 | 0,075 | 0,047 | < 0,1 |
| D $12_1$ | 0,00129 | 0,129 | 0,202 | 2,02 | 1,26 | c:a 1,7 |
| D $12_2$ | 0,00128 | 0,128 | 0,200 | 2,00 | 1,25 | c:a 1,7 |

x) 1 kg prov innehåller enligt blandningssammansättningen och volymvikt c:a 160 g cement.

Sprickvidd mätt vid balkarnas överyta

| | | 0 - 0,05 mm | | | 0,4 - 0,6 mm | | | 1,4 - 1,6 mm | | | Summa | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Serie | Lag-rings-metod | Korr. yta $cm^2$ | Frät-nings-djup mm | Vikt-förlust gram | Korr. yta $cm^2$ | Frät-nings-djup mm | Vikt-förlust gram | Korr. yta $cm^2$ | Frätn. djup mm | Vikt-förlust gram | Frätn. djup | Korr.-yta | Anmärkning |
| A | | | | | (1,6 | 0,25 | 0,533) | | | | | | |
| A | a | 0 | 0 | 0,700 | 7,1 | 0,14 | 0,811 | 20,9 | 0,26 | 0,950 | 0,40 | 28,0 | |
| A | b | 0 | 0 | 0,794 | 4,8 | 0,05 | 0,427 | 11,6 | 0,17 | 1,037 | 0,22 | 16,4 | |
| B | a | 0 | 0 | 0,100 | 10,3 | 0,18 | 1,156 | 27,4 | 0,21 | 0,633 | 0,39 | 37,7 | |
| B | b | 0 | 0 | 0,356 | 10,2 | 0,25 | 0,566 | 11,1 | 0,18 | - | 0,43 | 21,3 | |
| C | a | 0 | 0 | 0,474 | 3,9 | 0,15 | 0,683 | 11,4 | 0,22 | 0,585 | 0,37 | 15,3 | |
| C | b | 0 | 0 | 0,468 | 7,8 | 0,11 | 0,423 | 11,1 | 0,30 | 1,161 | 0,41 | 18,9 | |
| D | a | 0 | 1,12 x) | 0,564 | 10,8 | 1,02 | 1,027 | 22,2 | 1,30 | 1,971 | 3,34 | 33,0 | x) 1,12 mm grop vid por |
| F | a | 0 | 0 | 0,777 | 3,5 | 0,11 | 0,740 | 12,2 | 0,15 | 0,667 | 0,26 | 15,7 | |
| G | a | 0 | 0 | 0,635 | 10,0 | 0,13 | 1,186 | 13,5 | 0,20 | 1,377 | 0,33 | 23,5 | Täckskikt c:a 1 cm |
| G | a | 0 | 0 | 0,839 | 2,9 | 0,44 | 1,324 | 7,3 | 0,14 | 1,132 | 0,58 | 10,2 | Täckskikt c:a 5 cm |
| H | a | 0 | 0 | 0,853 | 4,7 | 0,10 | 0,581 | 22,5 | 0,24 | 0,854 | 0,34 | 27,2 | |
| Summa frätn.djup | | | 1,12 | | | 2,68 | | | 3,37 | | | | |
| Summa korr.yta | | 0 | | | 76,0 | | | 171,2 | | | | | |

Tabell 10. Korrosion vid sprickorna. Sammanställning av observationsresultaten med avseende på korrosionens omfattning efter 2 2/3 års exponering.

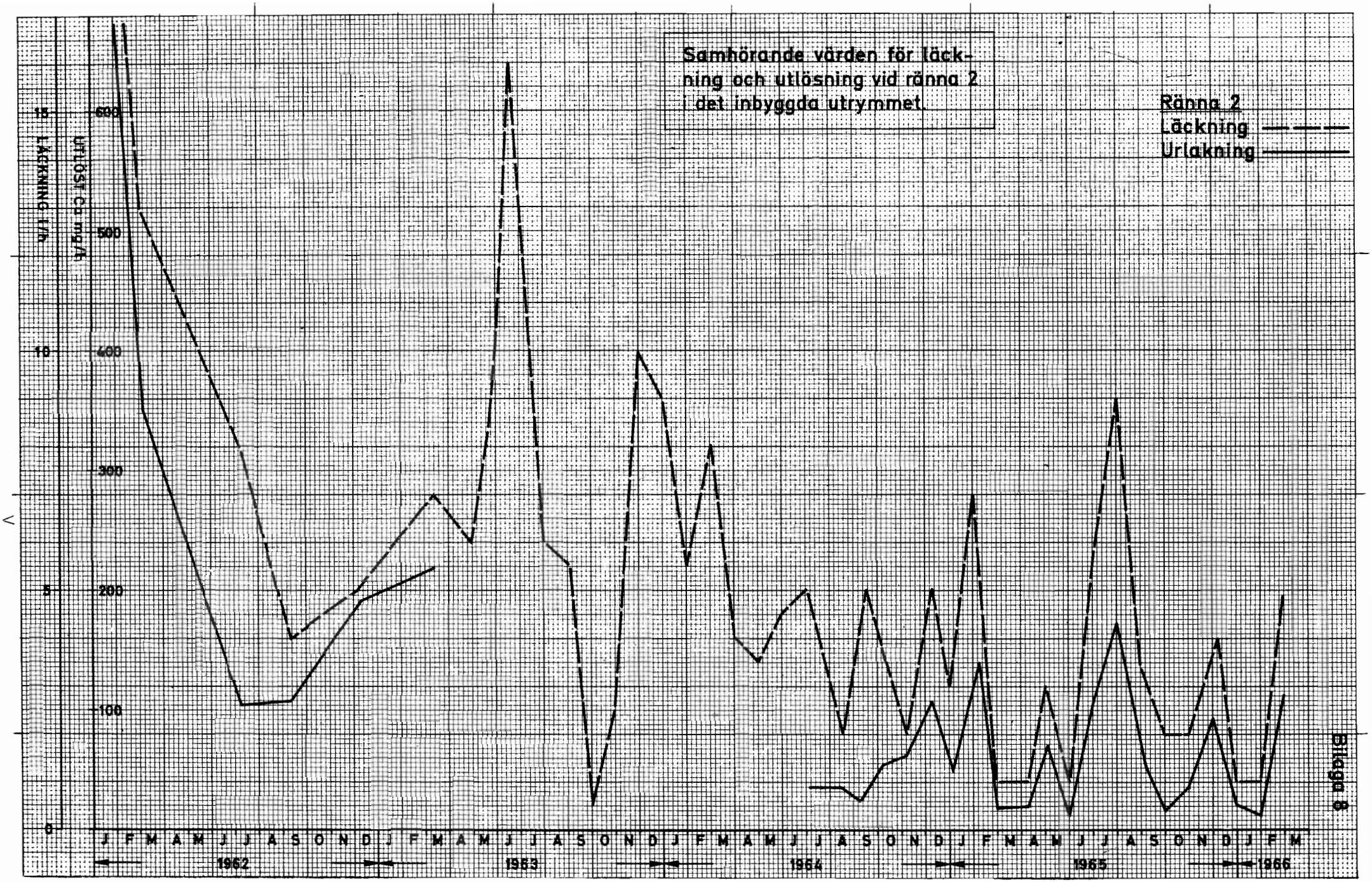
Bilaga 6

# STORFINNFORSEN

**Sammanställningar av läckmätningar och vattenanalyser 1962-1966.**

– Observation förhindrad.

| Mätställe | Datum | 1962 | | | | | 1963 | | 1964 | | | | | | 1965 | | | | | | | | | | | | 1966 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 19/1 | 5/3 | 11/7 | 10/9 | 6/12 | 21/3 | 12/6 | 10/7 | 7/8 | 11/9 | 14/10 | 9/11 | 5/12 | 4/1 | 3/2 | 1/3 | 5/4 | 2/5 | 1/6 | 1/7 | 1/8 | 5/9 | 1/10 | 1/11 | 3/12 | 3/1 | 1/2 | 1/3 |
| Dyan damm | pH | 8,1 | 8,5 | 7,6 | 8,2 | 7,5 | 7,1 | 9,3 | 7,7 | 7,5 | 6,6 | 6,3 | 6,6 | 6,6 | 6,5 | 7,0 | 6,9 | 7,3 | 6,2 | 7,2 | 6,9 | 7,1 | 7,3 | 8,9 | 6,5 | 6,3 | 6,3 | 4,9 | 6,3 |
| | Ca mg/l | 4,6 | 5,0 | 8,0 | 8,0 | 5,4 | 5,0 | 6,0 | 3,0 | 7,0 | 7,0 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 5,0 | 5,0 | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 8,0 | 7,0 | 6,0 | 10,0 | 6,0 | 5,0 | 5,0 | 6,0 | 5,0 |
| Ränna 1 Mon. 47, övre | pH | 12,0 | 12,0 | 11,9 | 12,0 | 11,9 | – | – | 12,0 | 11,9 | 9,4 | 10,8 | 11,6 | 10,4 | 11,3 | 12,3 | 12,2 | 12,3 | 12,4 | 12,5 | 12,2 | 12,2 | – | 11,7 | 11,2 | 11,5 | 10,8 | 11,2 | 11,3 |
| | Utlöst Ca mg/l | 145 | 210 | 176 | 4 | 215 | – | – | 107 | 342 | – | 50 | 294 | 28 | 166 | 227 | 119 | 258 | 268 | 198 | 164 | 100 | – | 91 | – | 140 | 86 | 96 | 112 |
| | Läckmängd l/h | 3,3 | 1,5 | 0,4 | 0,2 | 1,0 | torr | 0,1 | 0,3 | 0,1 | <0,1 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 2,0 | 0,1 | 0,1 | <0,1 | 0,1 | <0,1 | torr | <0,1 | <0,1 | 0,2 | 0,8 | 0,5 | 0,2 |
| | Utlöst Ca mg/h | 478 | 315 | 70 | – | 215 | – | – | 32 | 34 | – | 5 | 147 | 11 | 34 | 23 | 238 | 26 | 27 | – | 16 | – | – | – | – | 28 | 68 | 46 | 22 |
| Ränna 2 Mon. 47, nedre | pH | 11,1 | 11,0 | 10,5 | 10,9 | 11,2 | 10,8 | – | 11,0 | 10,7 | 9,0 | 10,0 | 10,8 | 10,1 | 10,0 | 10,7 | 10,5 | 10,6 | 10,8 | 10,9 | 8,9 | 10,6 | 9,9 | 10,3 | 10,1 | 10,3 | 9,8 | 9,9 | 10,1 |
| | Utlöst Ca mg/l | 33 | 27 | 13 | 27 | 38 | 31 | (30) – | 9 | 18 | 6 | 17 | 33 | 22 | 17 | 20 | 19 | 20 | 24 | 11 | 18 | 18 | 18 | 7 | 19 | 24 | 20 | 13 | 27 |
| | Läckmängd l/h | 28 | 13 | 8 | 4 | 5 | 7 | 16 | 4 | 2 | 4 | 3 | 2 | 5 | 3 | 7 | 1 | 1 | 3 | 1 | 6 | 9 | 3 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 | 5 |
| | Utlöst Ca mg/h | 924 | 351 | 104 | 108 | 190 | 217 | (480) – | 36 | 36 | 24 | 51 | 66 | 110 | 51 | 140 | 19 | 20 | 72 | 11 | 108 | 172 | 54 | 14 | 38 | 96 | 20 | 13 | 135 |
| Ränna 3 Mon. 43, ute | pH | – | – | 12,0 | 12,3 | 11,4 | – | 11,9 | 12,0 | 12,0 | 10,2 | 11,4 | 10,9 | 10,0 | – | – | – | – | 12,0 | 12,3 | 12,2 | 12,5 | 11,6 | 11,8 | 11,2 | – | – | – | – |
| | Utlöst Ca mg/l | – | – | 377 | 433 | 78 | – | 236 | 106 | 334 | 12 | 304 | 72 | 22 | – | – | – | – | 145 | 131 | 286 | 323 | 333 | 270 | 216 | – | – | – | – |
| | Läckmängd l/h | – | – | 11,0 | 0,5 | ~80 | – | 8 | 1,0 | 0,5 | 0,2 | 4 | 25 | ~60 | – | – | – | – | trasig | 8 | 4 | 2 | 1 | 0,4 | 13 | – | – | – | – |
| | Utlöst Ca mg/h | – | – | 4147 | 216 | 6240 | – | 1880 | 106 | 167 | 0,2 | 1216 | 1800 | 1320 | – | – | – | – | – | 1050 | 1150 | 646 | 333 | 108 | 2800 | – | – | – | – |


Samhörande värden för läckning och utlösning vid ränna 2 i det inbyggda utrymmet.
Ränna 2
Läckning
Urlakning
LÄCKNING l/s
UTLÖST Cu µg/l
15
10
5
0
600
500
400
300
200
100
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M
1962
1963
1964
1965
1966

Bilaga 8

Sammanställning av resultaten från provborrningar vid Krångfors Kraftstation

| Borrkärna | | Äldre betong | | | Yngre betong | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hål nr | Total-längd cm | Prov nr | Kärn-sektion 1) | Tryckhållf kp/cm² | Prov nr | Kärn-sektion 1) | Tryckhållf kp/cm² | Anmärkning |
| 1 | 115 | 1:2<br>1:3 | 40- 50<br>95-105 | 357<br>394 | 1:1 | 25- 35 | 356 | Kärnan hel och väl sammanhängande. Inga spår av skador i fogen mellan de två gjut-etapperna. Troligen ingen läckning i fogen. |
| 2 | 160 | 2:1<br>(intill fogen) | 17- 27 | 415 | 2:2<br>2:3<br>2:4 | 60- 70<br>115-125<br>135-145 | 600<br>652<br>398 | I fogen saknas betong till 15-20 mm tjock-lek och betongytorna intill fogen är lösa och "totalt" urlakade till c:a 5 mm djup med lokala skador till c:a 15 mm djup. Den äldre betongen mest urlakad. |
| 3 | 110 | 3:1<br>3:2<br>3:3 | 40- 50<br>85- 95<br>100-110 | -<br>492<br>436 | | | | Inga fogar eller sprickor kunde upptäckas. Kärna utan yttre tecken på urlakning. En-bart prov från den äldre betongen. |
| 4 | 187 | 4:1<br>4:2<br>4:5 | 25- 35<br>40- 50<br>170-180 | 546<br>554<br>353 | 4:3<br>4:4 | 90-100<br>105-115 | 570<br>558 | Den äldre betongen "totalt" urlakad vid fo-gen mot yngre betong till ett djup av 5-10 mm. Vid större avstånd verkar betongen oskadad. Den yngre betongen helt oskadad in till fogen. |
| 5 | 55 | 5:1<br>5:2 | 8- 18<br>25- 35 | 474<br>448 | | | | Prov från ostörd, äldre betong. |
| 6 | | | | | | | | Se bilaga 10! |
| 7 | | | | | | | | Se bilaga 10! |
| 8 | 30 | 8:1 | | 580 | | | | Se även bilaga 10! |

1) Med kärnsektion avses det utsågade provets läge i kärnan, mätt från ytan i cm.

Bilaga 9

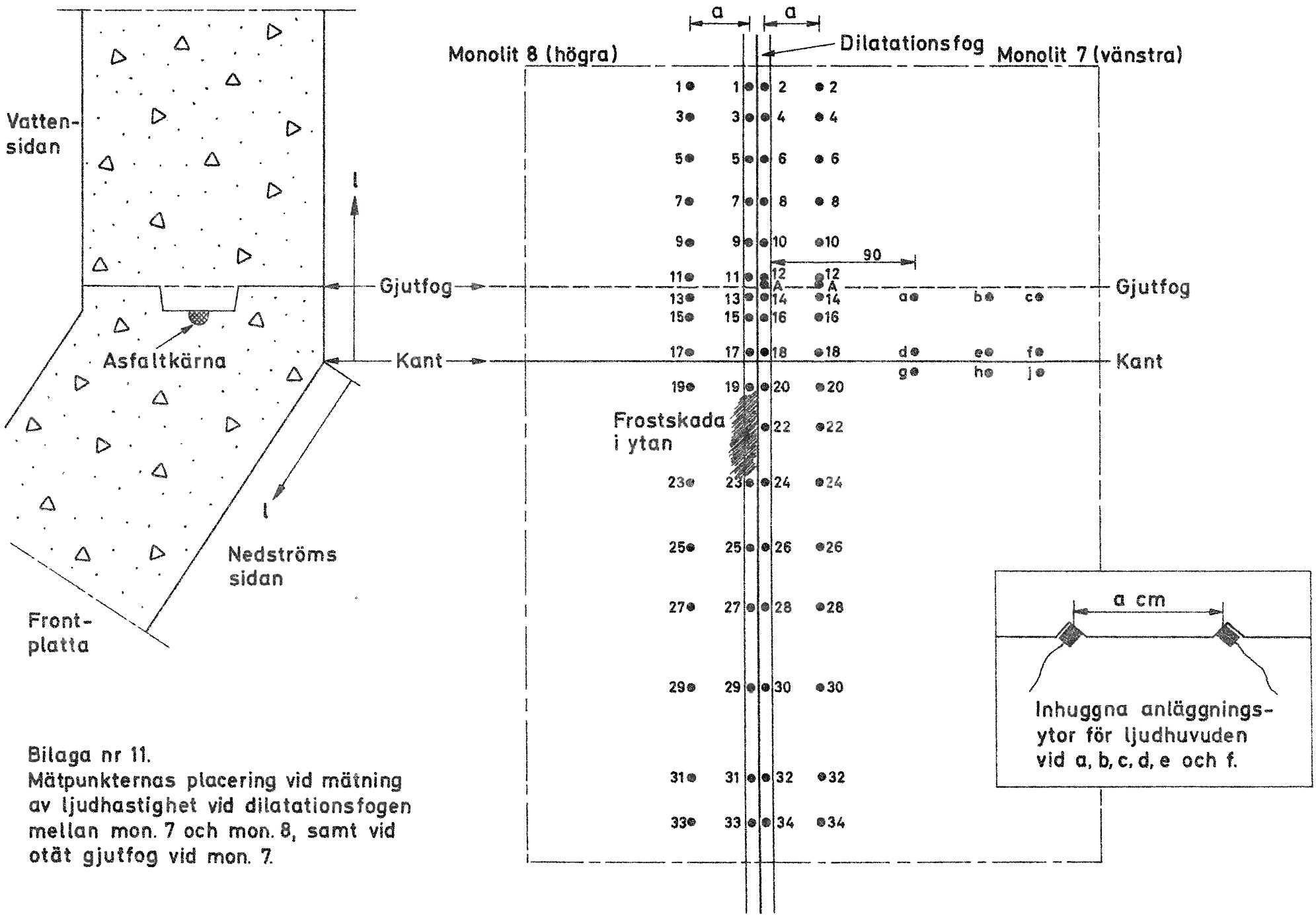
Krångfors Kraftstation

Besiktning av kärnorna från borrhålen 6 - 8 i frontplattan till högre anslutningsdamm. (Enbart äldre betong.)

Kärna 6: Borrhålets djup är c:a 50 cm. Kärnan har utborrats vid spricka i frontplattan. Betongen visar dålig sammanhållning genom att kärnan gått sönder i flera mindre bitar i samband med utborrningen. Läckningen har skett genom ett rikt förgrenat spricksystem. Djupgående totalt urlakade områden syns emellertid icke men den dåliga sammanhållningen tyder på allmänt dålig betong. Inga tryckprover kunde erhållas.

Kärna 7: Borrhålets djup c:a 57 cm. Kärnan osammanhängande och dålig (som kärna 6). Inga tryckprover kunde erhållas.

Kärna 8: Borrhålets djup c:a 30 cm. Kärnan har delats vid ett korsande armeringsjärn, i övrigt är den hel. Inga sprickor eller synbara spår av urlakning. En provkropp utsågades, (se bilaga 9).



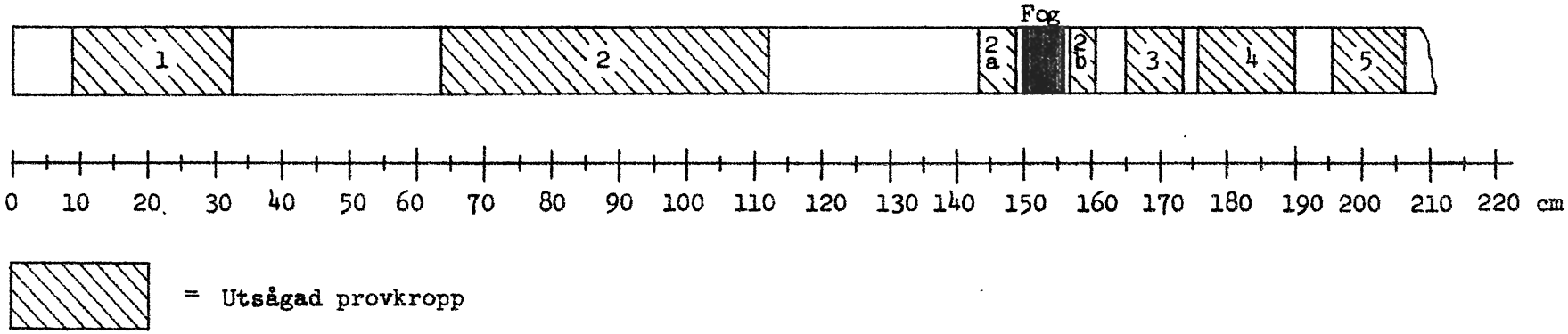

Bilaga nr 11.
Mätpunkternas placering vid mätning av ljudhastighet vid dilatationsfogen mellan mon. 7 och mon. 8, samt vid otät gjutfog vid mon. 7.

Bilaga 11

Bilaga 12

Resultat av ljudhastighetsmätningar utförda på STORFINNFORSDAMMEN

| Mätpkt | Mätpkt'ers avst från kant ℓ cm | Mätpkt'ers inbördes avstånd: a cm | Tid i μ sek korrig | Ljudhastighet km/sek | Anmärkningar |
|---|---|---|---|---|---|
| 1-1 | 185 | 18,4 | 37,9 | 4,85 | Slät yta |
| 2-2 | 185 | 18,5 | 39,8 | 4,65 | Något ojämn yta |
| 3-3 | 158 | 17,2 | 34,5 | 4,98 | Slät yta |
| 4-4 | 158 | 18,3 | 42,6 | 4,29 | Slät yta, spricka 0,1 mm |
| 5-5 | 133 | 18,6 | 37,2 | 5,00 | Slät yta |
| 6-6 | 133 | 18,5 | 41,5 | 4,45 | Slät yta, spricka 0,1 mm |
| 7-7 | 108 | 19,1 | 43,0 | 4,44 | Slät yta, liten spricka över mätpunkter |
| 8-8 | 108 | 18,7 | 37,3 | 5,02 | Slät yta |
| 9-9 | 80 | 18,8 | 39,4 | 4,77 | " " |
| 10-10 | 80 | 18,4 | 38,7 | 4,75 | Slät yta, liten spricka mellan mätpunkter |
| 11-11 | 53 | 19,3 | 39,1 | 4,94 | Slät yta (vid gjutfog) |
| 12-12 | 56 | 18,5 | 35,7 | 5,18 | Något ojämn yta (vid gjutfog) |
| A-A | 52 | 18,8 | 37,0 | 5,08 | Mycket ojämn yta(vid gjutfog) |
| 13-13 | 46 | 19,3 | 41,3 | 4,67 | Något ojämn yta (vid gjutfog) |
| 14-14 | 46 | 18,4 | 37,9 | 4,85 | " " " ( " " ) |
| 15-15 | 28 | 19,6 | 40,4 | 4,85 | Slät yta |
| 16-16 | 30 | 18,5 | 40,0 | 4,62 | " " |
| 17-17 | 8 | 19,4 | 39,3 | 4,94 | " " |
| 18-18 | 6 | 18,6 | 35,2 | 5,28 | Något ojämn yta |
| 19-19 | 18 | 20,0 | 39,4 | 5,07 | Slät yta, mätpunkter över frostskada |
| 20-20 | 17 | 19,0 | 36,2 | 5,25 | Något ojämn yta |
| 22-22 | 58 | 22,2 | 50,1 | 4,43 | Slät yta |
| 23-23 | 100 | 20,1 | 39,9 | 5,04 | Slät yta, utfälln av $CaCO_3$ |
| 24-24 | 100 | 23,5 | 50,4 | 4,66 | Slät yta |
| 25-25 | 150 | 20,3 | 40,2 | 5,05 | Lösa slamlager i ytan |
| 26-26 | 150 | 22,1 | 44,3 | 4,98 | Slät yta |
| 27-27 | 195 | 20,0 | 40,9 | 4,89 | " " |
| 28-28 | 200 | 23,1 | 45,0 | 5,13 | " " |
| 29-29 | 275 | 22,9 | 48,6 | 4,71 | Något ojämn yta |
| 30-30 | 275 | 23,2 | 39,0 | 5,95 | Slät yta |
| 31-31 | 332 | 22,3 | 43,9 | 5,08 | " " |
| 32-32 | 332 | 22,7 | 47,4 | 4,79 | " " |
| 33-33 | 387 | 23,0 | 44,1 | 5,21 | Något ojämn yta |
| 34-34 | 387 | 21,2 | 45,2 | 4,69 | Slät yta |
| a-b | - | - | intet | - ( | Betydlig läckn i gjutfog och |
| b-c | - | 18,7 | 39,7 | 4,71 ( | kraftig utfälln av $CaCO_3$. |
| d-e | - | 43,8 | 91(?) | 4,80 | Dåligt definierad avläsning. |
| e-f | - | 20,9 | 39,1 | 5,35 | God avläsning |
| a-g | - | 44,0 | 190(?) | 2,30 (?) | Mycket dåligt definierad avläsning. |
| b-h | - | - | intet | - | - - - |
| c-j | - | 48,5 | 190(?) | 2,50 (?) | Mycket dåligt definierad avläsning. |



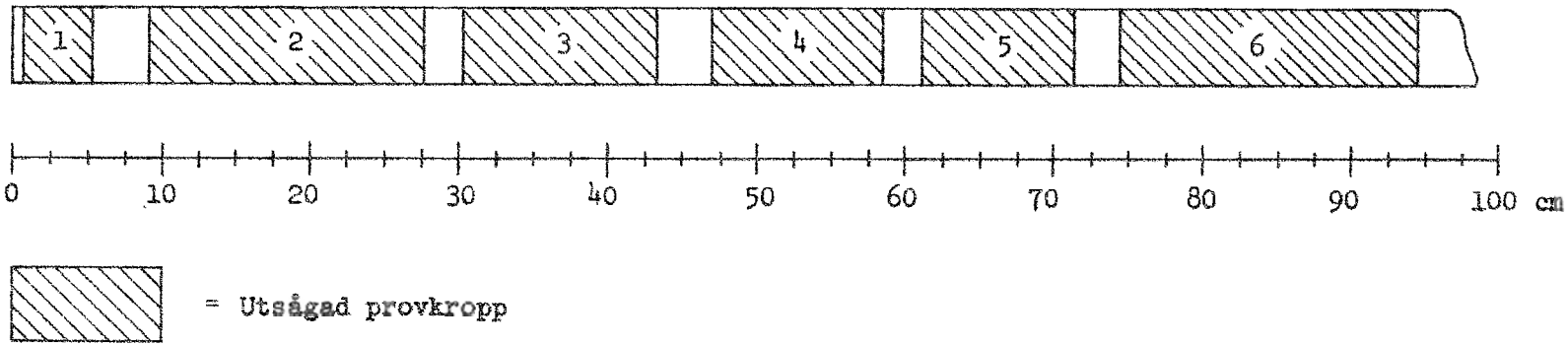

| Utsågad provkropp nr | | 1 | 2 | 2a | 2b | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Upprepade mätningar τ μ sek | 1 | 46,0 | 102,6 | 11,1 | 6,8 | 16,0 | 30,6 | 21,6 |
| | 2 | 46,1 | 102,7 | 11,2 | 7,0 | 16,1 | 30,3 | 21,4 |
| | 3 | 46,4 | 103,0 | 10,6 | 6,9 | 16,4 | 29,6 | 21,6 |
| | 4 | 46,5 | 103,5 | 10,6 | 6,9 | 16,3 | 29,6 | 21,3 |
| τ μ sek-medelvärde | | 46,3 | 103,0 | 10,9 | 6,9 | 16,2 | 30,0 | 21,5 |
| Mätlängd cm | | 24,7 | 48,5 | 5,3 | 3,2 | 8,1 | 14,3 | 11,1 |
| Ljudhastighet km/sek | | 5,31 | 4,70 | 4,85 | 4,64 | 5,00 | 4,76 | 5,15 |

Resultat från ljudhastighetsmätningar på provbitar från borrkärna nr 13 b, (se fig 54).

Bilaga 13

Bilaga 14

Resultat från ljudhastighetsmätningar på provbitar från borrkärna nr 15. Kärnan har borrats ur betongen vid dilatationsfogen mellan monolit 7 och 8. Betongen var något frostskadad i ytan.




| Utsågad provkropp nr | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Upprepade mätningar τ μ sek | 1 | 10,0 | 40,1 | 27,0 | 23,0 | 19,5 | 39,7 |
| | 2 | 10,1 | 40,1 | 27,3 | 22,7 | 19,9 | 39,7 |
| | 3 | 9,9 | 40,0 | 27,4 | 22,5 | 20,3 | 40,7 |
| | 4 | 10,0 | 40,0 | 27,4 | 22,7 | 20,4 | 40,3 |
| τ μ sek-medelvärde | | 10,0 | 40,0 | 27,3 | 22,7 | 20,0 | 40,1 |
| Mätlängd cm | | 4,7 | 18,7 | 13,2 | 11,3 | 9,9 | 20,1 |
| Ljudhastighet km/sek | | 4,70 | 4,67 | 4,82 | 4,97 | 4,95 | 5,00 |