

SBI-publ.

**SBI-SÆRTRYK
156**

**UDK 666.972.16: 546.41"131:
620.193**

Nordisk Betong nr. 4, 1965

**Erik Trudsø:
Rustangreb på armeringsjern i beton
med calciumkloridtilsætning**

**STATENS
BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
København 1965**

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
Bib:Info:København 7
01083P

Rustangreb på armeringsjern i beton med kalciumkloridtilsætning

*Corrosion on Reinforcement in Concrete with Calcium Chloride
A Long-Time Investigation*

ERIK TRUDSØ*

Indledning

I nærværende artikel gøres rede for et langtidsforsøg over den korrosionsfremmende virkning, som kalciumkloridtilsætning til betonen kan have overfor armeringsjernene. Som bekendt virker sådan tilsætning hærdningsfremskyndende, hvilket er af interesse bl. a. ved betonstøbning om vinteren.

Forsøget blev sat i gang i 1949 ved initiativ fra *Arbejdsgruppen for beton og jernbeton* og er gennemført ved et samarbejde mellem *Danske Statsbaner, Vandbygningsdirektoratet, De Danske Betonfabrikker* og *Statens Byggeforskningsinstitut*.

Ved forsøgets gennemførelse har foruden de nævnte samarbejdspartnere medvirket *F. L. Smidth's laboratorium*, som udførte de kemiske analyser af betonprøver, medens *Laboratoriet for Metallære* ved Danmarks Tekniske Højskole har bedømt armeringsjernenes kvalitet på basis af undersøgelser ved *Statsprøveanstalten*; endelig er trækprøvning af jernene foretaget ved *Danmarks Ingeniørakademis Bygningsafdeling*.¹

Problemstilling

Da forsøget iværksattes, forelå spredte oplysninger om kalciumkloridtilsætnings rustfremmende virkning; man ønskede at kunne drage nytte af dette stofs hærdningsfremskyndende egenskaber, og søgte belyst risikoen for, at armeringen på grund af dets anvendelse rustede i uforvarlig grad. Dette problem spalter sig op i to:

* Civilingeniør, Statens Byggeforskningsinstitut.

¹ Det omfattende primærmateriale er tilgængeligt i SBI's arkiv.

Tabel 1. Sammensætning og CaCl_2 -indhold for udstøbte fliser

Lokalitet	Cementindhold kg pr. m^3 omtrentligt blandingsforhold efter rumfang	CaCl_2 %
Agger	355 1: 2: 3	0
		2
		4
	240 1: 3: 5	6
		0
		2
	180 1: 4: 7	4
		6
		0
Roskilde	375 1: 2: 3	2
		4
		6
	255 1: 3: 5	0
		2
		4
	185 1: 4: 7	6
		0
		2
Valby	355 1: 2: 3	4
		2,4
		4,8
	285 1: 2½: 4	0
		1,2
		2,4
	240 1: 3: 5	4,8
		0
		1,2
		2,4
		4,8

- 1) hvor stærkt fremskyndes rustangreb på armeringsjern af calciumklorid tilsat i forskellige mængder — og er denne virkning eventuelt afhængig af andre omstændigheder såsom betonkvalitet, klimapåvirkning m. m.?
- 2) hvor kraftige rustangreb er i givet fald acceptable?

De vundne forsøgsresultater bidrager fortrinsvis til at besvare spørgsmål 1. Som vist i et afsluttende beregningseksempel afhænger en armeret betonkonstruktions rustbetingede brudsandsynlighed ikke blot af selve rustangrebene, men også af bl. a. længde, diameter og antal af de samvirkende jern; specielt kan fornødne forudsætninger om tidens indflydelse på korrosionsforløbet ikke bekræftes eksperimentelt af denne enkeltundersøgelse, men henstår som skøns-mæssig antagelse.

Forsøgets variable

Der blev støbt 72 *armerede prøvefliser*, som blev anbragt i 3 grupper à 24 stykker på 3 steder i landet, nemlig en gruppe på et areal ved Statsbanernes Godsstation i Valby, en anden gruppe ved Betonvarefabrikken Sjælland ved Roskilde og tredje gruppe på Aggertangen nær en af Vandbygningsvæsenets høfder. Ved denne anbringelse har man tilstræbt at udsætte fliserne for *vejrlig af 3 forskellige beskaffenheder*.

Hver flisegruppe er opdelt i 12 *dublet-par*, idet sådanne to dubletter er ens i alle andre henseender, end hvad angår deres orientering i forhold til verdenshjørner eller til retningen op-ned.

Tallet 12 er produktet af 3 *betonkvaliteter* og 4 *mængder* af tilsætningsmidlet.

Herudover er der endnu én tilstræbt variabel, nemlig armeringsjernets overfladetilstand ved støbningen, idet der i enhver flises ene side ligger *sandblæst rundjern* \varnothing 12 mm, medens samme dimension i den anden side er anbragt i *ubehandlet tilstand*, d.v.s. med almindeligt forekommende rust og glødeskal.

Fliserne har *dimensionerne* $70 \times 70 \times 20$ cm, og armeringsjernene er anbragt i kvadratnet med 6 stykker på hver led i begge sider af hver flise og med 2 cm *dækkende beton* uden på de yderstliggende jern.

Af de anvendte *betonkvaliteter* har den magreste et cementindhold på 180 kg/m^3 (blandingsforholdet 1: 4: 7) — medens den bedste betonkvalitet indeholder 375 kg cement pr. m^3 (blandingsforholdet 1: 2: 3).

Af de 4 tilsætningsprocenter er 0 % den laveste og 6 % den højeste calciumkloridmængde, taget i vægtprocent af cementmængden.

I tabel 1 gives en oversigt over kombinationerne af betonsammensætning og calciumkloridmængde, som er benyttet de 3 steder.

Markobservationer

I de 12 år, fliserne har været udsat for vejrligets nedbrydende påvirkninger, er de blevet besigtiget 4 gange; herunder har man gjort notater om diverse forvitringssymptomer på betonen og om tegn på rustangreb på armeringsjernene. Således er eksempelvis observeret forekommende netrevner, afskalninger, springere, hjørnetab, misfarvninger m. m., og i mangel af bedre kriterium har man anslået rustpletternes udstrækning og antal samt den tilsyneladende beskadigelsesgrad, som de er tegn på, bedømt ud fra rustfarvningens intensitet. Endvidere har man fotograferet alle fliser, sidste gang med farvefotos i sommeren 1961.

Efter de 12 års forløb blev samtlige fliser skåret over, hver i to halvdele, af hvilke materiale fra den ene halvdel toges ind til nærmere undersøgelse i SBI's betonlaboratorium, medens de resterende 72 halve fliser skulle forblive under påvirkning som hidtil i endnu en halv snes år.

Arbejdet med at gennemskære fliserne med diamantsav, bryde de flisehalvdele i stykker, der skulle undersøges, udtage armeringsjernene samt betonprøver af de itubrudte fliser — tilendebagtes i løbet af efteråret 1961.

Resultaterne af iagttagelser ude på forsøgsstederne kan sammenfattes således:

De 3 besigtigelser inden 1961 tyder bl. a. på, at vestkystklimaet medfører de kraftigste rust-misfarvninger af betonoverfladerne; men flisernes orientering ses ikke at have gjort sig gældende.

Så længe der højst tilsættes 2 % kalciumklorid, er misfarvningen kun ringe, undtagen på fliser af magrest beton (1:4:7) anbragt ved Vestkysten.

Hvor der findes tydelige rustforekomster på fliserne, synes de at tiltage med alderen.

Rustskader hidrørende fra sandblæste jern er hyppigere og kraftigere end fra tilsvarende ubehandlede jern.

Betydelige revnedannelser er forekommet ofte inden for de første 10 år efter tilsætning af så megen kalciumklorid som 6 %.

Den mere *detaillerede besigtigelse*, som fandt sted i 1961—62 i forbindelse med flisernes overskæring m. v., fører til væsentligt samme resultater som ovenfor anført. Dog findes nu en antydning af orienteringens indflydelse, idet opadvendte eller østvendte sider af fliserne, alt andet lige, synes mere rustfarvede end de modsat vendte.

Virkingen på de iagttagne revnedannelser af 2 % kalciumklorid eller derunder kan ikke adskilles fra indflydelsen af de øvrige nedbrydningsprocesser.

Der fandtes mere udbredt revnedannelse på flisesiderne ved de sandblæste jern; ved de kraftigste revner blev i flere tilfælde observeret geludfældninger,

medens *synlige rustudfældninger også fandt sted ved så små revnevidder som 0,1 mm* under Vestkystens klimabetingelser (Agger); 0,2 mm var i denne henseende nedre grænse under de "næsthårdeste" vejrforhold (Roskilde), medens der ved det "mildeste" klima (Valby) ingen rustudfældninger forekom gennem revner.

Lameldannelser (revner i armeringsnettets plan) er praktisk talt kun forekommet i forbindelse med så kraftig korrosion på armeringsjernene, at enten disses trækstyrke eller deres holdbarhed (i kraft af fremskyndet skadeudvikling) vil være nedsat i en grad, der i praksis ville motivere omfattende sanering; ingen af de ialt 42 fliser med 2,4 % CaCl_2 eller derunder udviste sådan tendens til dæklagsafsprængning, hvorimod den forekom tydeligt hos 23 af de resterende 30, altså hos næsten 80 % af fliser med CaCl_2 -procenter > 4 .

Laboratorieundersøgelser

I laboratoriet foretoges *kemiske og petrografiske undersøgelser af betonprøver*, og ved de udtagne *armeringsjern* interesserede man sig for deres *metallurgiske egenskaber, trækstyrker samt rustskader*.

Betonen

Formålet med den *kemiske analyse* var bl. a. at udfinde, hvor vidt kloridet i fliserne var bundet og i hvilken grad det var vandopløseligt og som sådant i stand til at deltage i den elektroniske nedbrydning af armeringsjernene. Det viste sig, at mellem halvdelen og to trediedele af kloridet er opløseligt i vand, når det findes i betonen i koncentrationer over 2 %.

Den *petrografiske analyse* foretoges i den hensigt at belyse betonmaterialets, specielt cementpastaens, tilstand i fliserne i henseende til forvitringssymptomer såsom revner, karbonatisering, udludning m. v.

Denne analyse afslørede revner i samtlige undersøgte tyndsnit, overvejende forløbende i cementpastaen og flest i den magreste beton (1:4:7) med størst tilsætning af CaCl_2 (6 %). Som sekundære udfældninger konstateredes ved samme beton rustagtige dannelser, men der fandtes ingen udfældninger af alkalisigelgel, kalciumaluminatsulfat, magnesiumhydroxyd eller kalciumkarbonat, som kunne tyde på, at betonen skulle være angrebet af kemisk forvitring. Derimod viste cementpastaens $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold sig at variere imellem:

en så stor værdi ved en CaCl_2 -fri, cementrig beton (1:2:3), at denne beton må anses for sund og upåvirket af udludning, og

en så lille værdi ved den magreste beton (1:4:7) med 6 % CaCl_2 , at materialet ser ud til at være stærkt udludningsforvitret.

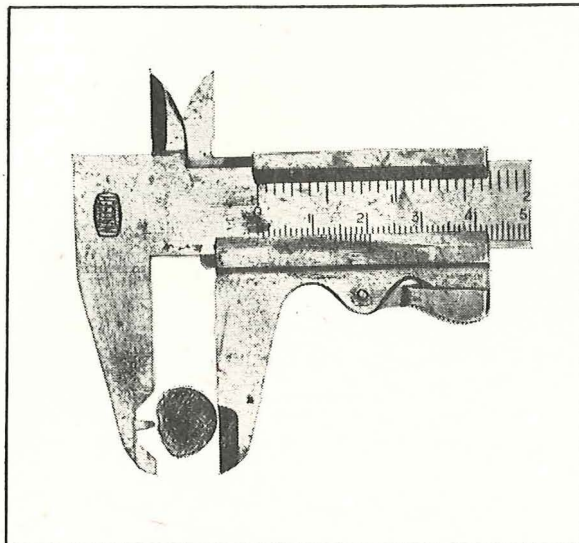


Fig. 1. Skydelære til måling af rustdybder. Stiften i skydelærens yderste kæbe indføres til gravrustangrebets bund, medens den anden kæbe lægges an på jernets modsatte side. Diameteren måles med det inderste parti af kæberne. ● Slide caliper gauge for measuring the depth of pits caused by corrosion. The pin forming part of the sliding jaw is inserted in the pit so as to come in touch with its bottom, while the fixed jaw is brought into contact with the opposite side of the reinforcing bar. The diameter of the pit is measured with the innermost surfaces of the jaws.

De øvrige undersøgte betoner havde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -indhold svarende til let eller middelsvær udludning. Der spores tendens til, at udludningen beror på såvel betonsammensætning som CaCl_2 -tilsætning, hvilket delvis kan forklares ved porøsitetens og armeringskorrosionens mekaniske virkning.

Armeringen

Ifølge formålet med arbejdet var det skadeligheden af rustangrebet på armeringsjernene, som skulle betragtes i afhængighed af calciumkloridprocenten.

Man må tænke sig, at denne skadevirkning kommer til udtryk *dels* ved at svække armeringens tværsnitsareal og dermed dens trækstyrke, *dels* ved at formindske dens vedhængning til betonen, altså beskadigelser med statistisk betydning, *dels* ved, at den optrædende rust i kraft af volumenforøgelsen sprænger dæklaget af betonen og dermed baner vej for yderligere nedbrydning af konstruktionen; man kunne kalde dette sidste for en teknologisk skadevirkning.

Ved laboratoriearbejdets begyndelse forelå udtaget godt og vel 1 700 stykker armeringsstænger, ca. 32 cm lange; forsøg over vedhængningen lå da uden for undersøgelsens rammer og blev udskudt til den tid, da de resterende halve fliser skal behandles. Der var to tydeligt forskellige typer rustangreb, nemlig den hovedsagelig jævnt fordelte overfladerust og den punktvis optrædende gravrust, med ofte ganske dybe kraterdannelser.

Metallurgiske undersøgelser viste, at de anvendte stål gennemgående var af ringe kvalitet og at mange af jernene havde oxidholdige partier langs aksen.

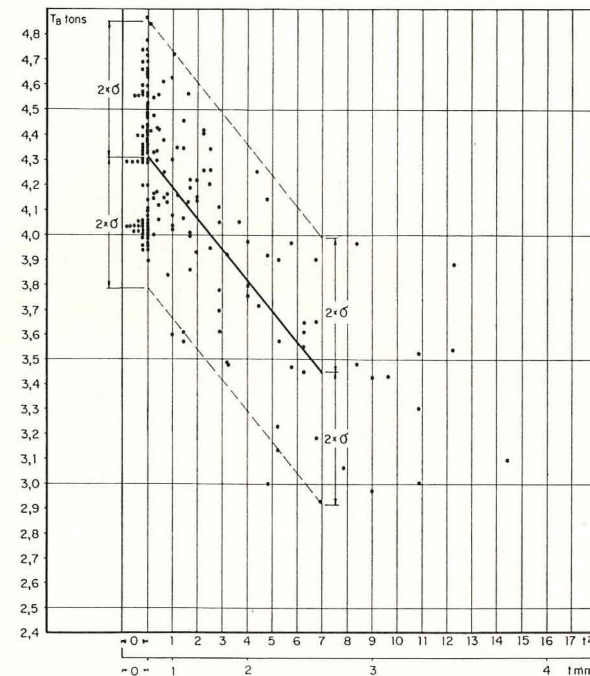


Fig. 2. Trækbrudstyrkens afhængighed af grubedybden. ● Relation between the tensile strength of the reinforcing bars and the depth of pits caused by corrosion.

Trækstyrke

184 jern blev trækprøvet og indtæringsdybden ved brudstedet for hver af dem sat i relation til brudlasten; med få undtagelser var denne dybde identisk med største rustdybde på jernet imellem trækmaskinens kæber. Hvis man tænker sig en eller anden statistisk lovmæssighed, som inden for visse grænser regulerer formen af et rustkrater, må med tilnærmelse ethvert tab i tværsnitsareal som følge af en kraterdannelse være proportionalt med kvadratet på kraterdybden; såfremt det forudsættes, at selve det resterende stålmaterials flyde- eller brudspænding er uafhængig af, om der er bortrustet noget materiale i nærheden, må en armeringsstangs styrketab også være proportionalt med det nævnte kvadrat. Dette synes bekræftet ved de foretagne forsøg.

Til de nævnte dybdemålinger anvendtes en særlig tildannet skydelære, se fig. 1; med denne kunne man efter lidt øvelse aflæse kraterdybder med 1—2 tiendedele millimeters nøjagtighed.

Ialt 96 gravrustede jern trækprøvedes sammen med en kontrolgruppe bestående af 88 jern uden tæringsgruber.

Trækstyrkens sammenhæng med indtæringsdybden t på brudstedet viste sig ved en regressionsanalyse at kunne udtrykkes temmelig korrekt ved følgende formel, hvad enten talen er om brudstyrken eller flydegrænsen:

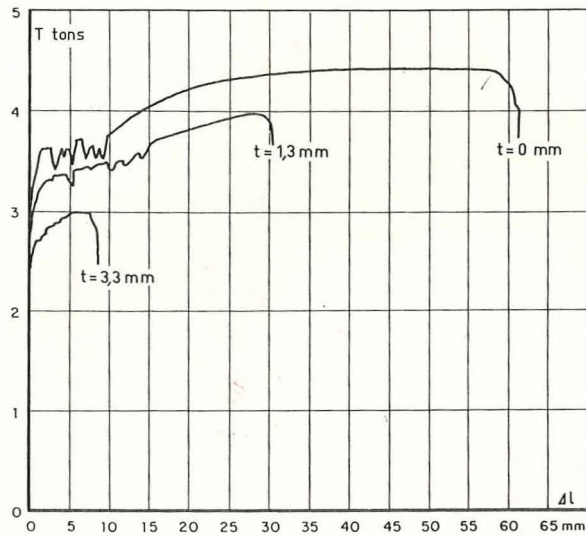


Fig. 3. Typiske arbejdslinier for ubeskadigede armeringsjern ($t=0$) og for korroderede. • Typical stress-strain curves of uncorroded ($t=0$) and corroded reinforcing bars.

$$T = T_0 \left(1 - \left(\frac{2t}{d} \right)^2 \right) \dots \dots \dots (1)$$

hvor T_0 repræsenterer den pågældende trækstyrke hos de ukorroderede jern, hvis oprindelige diameter d jo var 12 mm. Formlen gælder kun ved t -værdier mindre end 2,7 mm; også ud over dette punkt aftager styrken med voksende maksimal indtæringsdybde, men tilsyneladende noget langsommere — at dømme efter de sparsomme forsøgsresultater i dette område. Standardafvigelsen på trækstyrkerne er lidt — men ikke væsentligt — større for de korroderede end for de ubeskadigede jern.

På fig. 2 er vist trækbrudstyrkens afhængighed af kvadratet på t ved brudstedet.

Ved de korroderede jern viste brudforlængelsen sig almindeligvis betydelig mindre end ved uangrebne jern; det heraf følgende skøre brud tilskynder til forsigtighed overfor statiske antagelser om momentomlejninger ved flydning, såfremt en hurtig og kraftig korrosion kan forventes. Specielt bemærkedes, at en karakteristisk indsnævring på jernenes brudsted indtrådte straks, når flydegrænsen var nået for stærkt korroderede jern, medens den for normale jern ikke kom, førend flydningen var ophørt. Eksempler på arbejdslinier er angivet i fig. 3, nemlig med t -værdier på 0, 1,3 og 3,3 mm og brudstyrkerne 4,4, 4,0 og 3,0 tons samt totale brudforlængelser (af de ca. 22 cm jern mellem maskinens kæber) på ca. 26 %, 13 %, henholdsvis 3,4 %.

Rustskader

Forinden de ovennævnte 184 jern underkastedes den destruktive trækprøvning, undersøgte de sammen med alle øvrige armeringsstænger for "geometrisk" beskaffenhed af rustangrebene. Hertil brugtes *dybdemåling* af gravrustkratere (som ovenfor) samt *optælling* af sådanne. Begrundelsen for at måle *indtæringsdybder*, specielt disses maksimale værdier, ligger i den forventede og ovenfor refererede indvirkning på trækstyrkerne. *Optællingen* foretoges, fordi forekomsten af dybe tæringsgruber tiltager sammen med hyppigheden af samtlige angreb; man opnåede kontrol på en hypotese om fordelingen af nævnte hyppighed således som omtalt i det følgende — hvor tillige redegøres for, hvordan det gennemsnitlige antal gravrustangreb pr. længdeenhed kan opfattes som et mål for et rustangrebs skadevirkning. Selv om forsøgs materialets beskedne omfang har medført ret stor usikkerhed på bestemmelsen af dette tal, μ_1 , viser de foretagne optællinger, at det har en vis sammenhæng med CaCl_2 -procenten og betonkvaliteten, nemlig ifølge figurerne 5 og 6, af hvilke de praktiske resultater er uddraget sidst i afsnittet.

Grube-dybder og -antal

På hver enkelt af de 1700 stænger opsøgte den dybeste grube, og dennes "pit-dybde" målt; således udgør gravrustens maksimale indtrængningsdybde pr. løbende 32 cm armeringsjern et grundlæggende observationsmateriale, hvis statistiske behandling og korrelering med de primære variable er foregået så udtømmende, som undersøgelsens økonomiske rammer har tilladt og som det i øvrigt har været muligt under hensyn til de uundgåelige usikkerheder, der må knytte sig til oplysningerne om materialer og miljø under et langtidsforsøg som det omhandlede.

Desuden optaltes, hvor mange gravrustangreb der var på ethvert af ialt 616 angrebne jern ud af de 1700, nemlig fra alle fliser af de to fedeste blandinger (1:2:3 og 1:2½:4).

Til det statistiske beregningsarbejde anvendtes elektronisk datamaskine, idet maskinprogrammet blev kodet i FORTRAN og indlæsedata og resultater registreret på hulkort. Som resultater er her først og fremmest tale om kumulerede hyppigheder af de nævnte maksimale indtæringsdybder pr. 32 cm, afsat på normalt sandsynlighedspapir.

For på dette grundlag at kunne sige noget om rustdybdefordelingen i almindelighed benyttedes den statistiske teori om de ekstreme værdiers fordeling ifølge E. J. G u m b e l, se litteraturlisten. Det så uden videre ud til, at grube-dybderne på hvert jern var uafhængige af, hvor nærtbeliggende eller dybe nabogruberne var; dels fandtes nemlig ret store rustdybder på jern med kun enkelte tærings-

gruber, dels sås ved tætliggende gruber store forskelle i disse dybder. Under denne forudsætning — der også forekommer plausibel ud fra den betragtning, at de elektriske kredsløb, som ledsager korrosionen, er lokaliserede til den umiddelbare omegn af hvert enkelt gravrustangreb — gælder følgende ligning imellem den kumulerede hyppighed $F_{t_{\max,1}}$ for maksimal indtæringsdybde på jernlængden l_1 (som var 32 cm) og den kumulerede hyppighed $F_{t_{\max,n}}$ for maksimal indtæringsdybde på en n gange så lang jernlængde

$$F_{t_{\max,n}}(t) = F_{t_{\max,1}}^n(t) \quad \dots \quad (2)$$

Denne relation kan udnyttes til at indføre en hjælpeparameter, nemlig *den længde* λ , som man skulle have opdelt den pågældende gruppes armeringsjern i, for at halvdelen af disse jernstykker (af længde λ) skulle have været uden gravrust, medens den anden halvdel af stykkerne skulle have mindst een tæringsgrube. Det er klart, at jo kortere λ er, desto flere rustgruber er der på jernet og desto alvorligere er altså rustangrebet. Idet vi skriver den karakteristiske længde som $\lambda = \frac{l_1}{\alpha_1}$, er α_1 altså en faktor, der vokser med tiltagende

rustangreb. Denne transformation fra faktisk målelængde $l_1 = 32$ cm til λ er foretaget på samtlige sumkurveværdier for de jern, som har været indlagt i de to fedeste betonblandinger. For hver gruppe armeringsjern, hver med sin karakteristiske "halveringslængde" λ , er dernæst optegnet de kumulerede hyppigheder af maksimale indtæringsdybder, *ikke* pr. 32 cm jern, men pr. λ cm. Resultatet heraf ses på fig. 4 (med ordinatinddeling som normalt sandsynlighedspapir); alle fordelingskurverne er ved den valgte transformation tvunget igennem punktet med koordinaterne (0 0,5) i stedet for som oprindeligt at afskære ulige store stykker af ordinataksen.

Som det fremgår, udgør de afsatte punkter en sværm, gennem hvilken man med ret god sikkerhed kunne lægge den forsøgsvisse kurve 1, fælles for samtlige grupper uanset den tilsatte mængde CaCl_2 , jernenes behandling samt forsøgsstationernes klima; herved var eksperimentelt fundet en form for rustfordelingen i almindelighed på normalt anvendte armeringsjern i beton.

Forudsætningerne for gyldigheden af (2) rummer tillige den nærliggende mulighed, at gravrustangrebene antal følger Poisson's fordeling.

En nærmere statistisk analyse viste, at resultaterne ikke strider herimod.

Når denne antagelse kombineres med den omtalte forudsætning om grube-dybdernes indbyrdes uafhængighed af angrebene tæthed, kan man vise; at de maksimale rustdybder på en given målelængde l_1 (som var 32 cm) vil være fordelt ifølge formlen

$$F_{t_{\max}}(t) = e^{-\mu_1} \cdot (1 - F_t(t)) \quad \dots \quad (3)$$

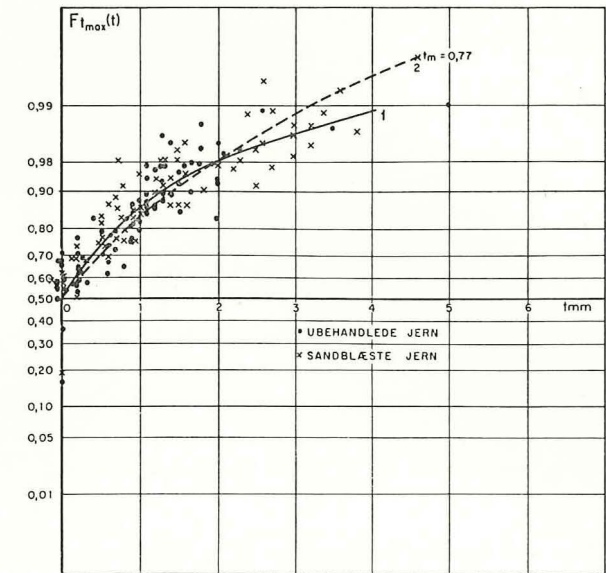


Fig. 4. Kumulerede hyppigheder (sumkurveværdier) for de største rustdybder på jern af længde λ . ● Cumulative frequencies (sum curve values) of the greatest depths of pits due to corrosion on reinforcing bars of length λ .

hvor μ_1 betegner middeltallet af rustangreb langs l_1 , medens $F_t(t)$ er den kumulerede hyppighed af samtlige rustdybder. Mellem μ_1 og α_1 består sammenhængen

$$\mu_1 = \log_e 2 \cdot \alpha_1 = 0,693 \cdot \alpha_1 \quad \dots \quad (4)$$

Ved at differentiere og omordne (3) findes sandsynlighedstætheden

$$f_t(t) = \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{f_{t_{\max}}(t)}{F_{t_{\max}}(t)} \quad \dots \quad (5)$$

Den forsøgsvisse kurve 1 tegnedes over på et papir med ækvivalent skala for ordinataksen, og relationerne (4) og (5) udnyttedes i 7 punkter deraf med det resultat, at $f_t(t)$ med god tilnærmelse fandtes at variere eksponentielt, nemlig efter formlen

$$f_t(t) = \frac{1}{t_m} \cdot e^{-t/t_m} \quad \dots \quad (6)$$

hvor t_m er middeldybden af rustkraterne.

På grundlag heraf skulle man kunne få et godt skøn over grube-dybdernes fordeling i et konkret tilfælde ved blot at måle disse dybder i et ret begrænset antal tæringsgruber og udregne deres middelværdi som eneste væsentlige parameter i (6).

Ved integrering og indsættelse af (6) i (3) får den kumulerede hyppighed af maksimale grubedybder den simple form

$$F_{t_{\max}}(t) = e^{-\mu_1} \cdot e^{-t/t_m} \dots\dots\dots (7)$$

Dette almindelige udtryk er brugt som regressionsformel på hver enkelt af samtlige jerngrupper med gravrust. Herved fandtes parametrene μ_1 og t_m for de 32 cm lange jern, og når man afsatte resultaterne i et (μ_1, t_m) -koordinat-system, viste t_m sig i middel at være konstant (ca. 0,68 mm, dog med betydelig spredning), uafhængig af μ_1 , hvis værdi voksede med tiltagende kalciumkloridtilsætning.

I middel var t_m lig med 0,77 mm for de jerngrupper, hvis sumkurvевærdier er markeret i fig. 4. Kurve 2 i denne figur fremstiller ligning (7) med $e^{-\mu_1} = 0,5$ (nemlig for $t = 0$) og $t_m = 0,77$ mm — som det ses, noget afvigende fra kurve 1, men endda med rimeligt forløb gennem punktsværmen.¹

Resultater

En umiddelbar betragtning af rustdybdeobservationerne viste ingen indflydelse af flisernes orientering på jernenes tilstand.

Når det gennemsnitlige antal μ_1 af gravrustkratere pr. 32 cm jern tages som mål for et rustangrebs styrke, kan man af figurerne 5 og 6 aflede følgende:

Ved lave CaCl_2 -procenter ses forsøgsstationernes klima ikke at have haft nogen særlig indflydelse. Ved større tilsætning spores en tendens til stærkest angreb på Roskilde-jernene og mindst på Valby-jernene — men dels er denne tendens ikke helt ubestridelig, dels kan forskelle i jernkvalitet have spillet ind, så en klar fortolkning er ikke mulig.

Gennemgående tiltager korrosionen med kalciumkloridmængden, og desto mere, jo magrere betonen er. Dette er særlig tydeligt ved de sandblæste jern, der som helhed er væsentlig mere korroderede end de ubehandlede.

I den fedeste beton (1:2:3) synes skaderne ret begrænsede, så længe tilsætningen kun er 2 % eller derunder, dog med en uopklaret uregelmæssighed (Valby, ubehandlede jern).

Mærkelig korrosion er også forekommet på fliser uden kalciumklorid, i hvert fald af magreste beton, men tillige ved federe blandinger; dette forhold bevirker, at man ikke på det foreliggende grundlag kan angive en bestemt tærskelværdi, over hvilken virkningen af kalciumkloridtilsætningen med sikkerhed kan skelnes fra andre rustfremmende indflydelser.

I praksis anses undertiden en CaCl_2 -tilsætning på 2 % for tilladelig, og under forudsætning af, at der anvendes beton med mindst ca. 300 kg cement

¹ Afbildningen på sandsynlighedspapir overdriver i høj grad den tilsyneladende afvigelse mellem kurverne, der ved ækvidistant ordinatinddeling er praktisk taget sammenfaldende.

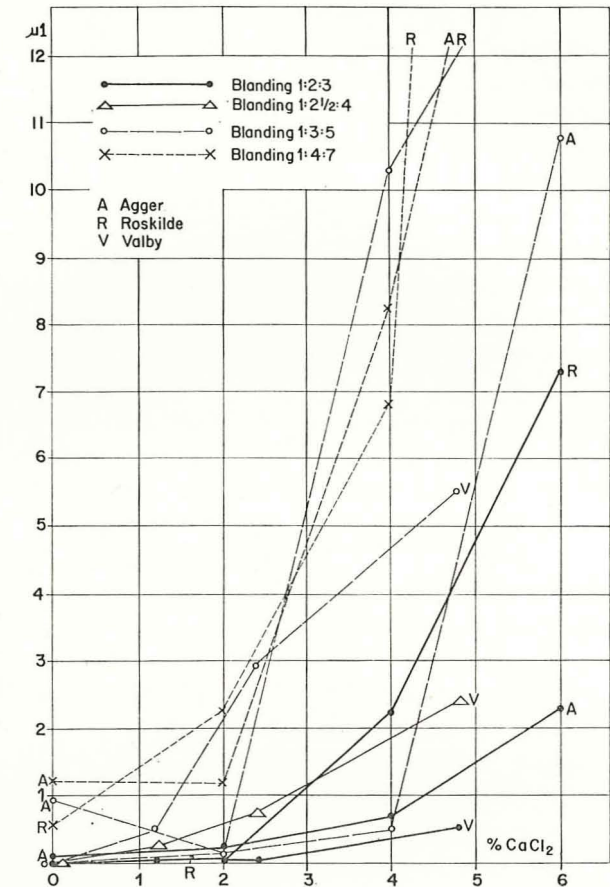


Fig. 5. Beregnede μ_1 -værdier for sandblæste jern fra samtlige fliser i afhængighed af CaCl_2 -procenten. • Variation in the calculated values of the parameter μ_1 for sand-blasted reinforcing slabs removed from concrete bars which had been exposed at Valby, Roskilde, and Agger, Denmark, with the percentage of calcium chloride.

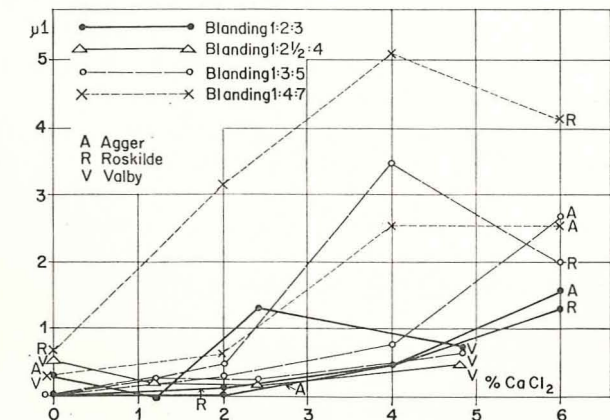


Fig. 6. Beregnede μ_1 -værdier for ubehandlede jern fra samtlige fliser i afhængighed af CaCl_2 -procenten. • Variation in the calculated values of the parameter μ_1 for non-sand-blasted reinforcing bars removed from the same concrete slabs as those shown in Fig. 5 with the percentage of calcium chloride.

pr. m³, kan denne arbitrære grænse næppe anfægtes af nærværende undersøgelse. Som det vil ses af efterfølgende beregningseksempel, kan dette imidlertid *ikke* bero på, at μ_1 -værdier mindre end f. eks. 0,3 skulle være ufarlige set fra et sikkerhedsmæssigt synspunkt, men muligvis netop på, at virkningen af en hertil svarende tilsætning kun vanskeligt kan skelnes fra andre faktorer indflydelse.

Anvendelseksempel

Til illustration af, hvorledes resultater som de fundne kan tænkes anvendt, skal betragtes, hvor stærkt korrosionen øger risikoen for armeringsbrud i en bjælke, som er dimensioneret for konstant moment. Armeringen antages at bestå af 6 stk. Ø 12 jern, hver af længden 6,40 m (dvs. en 20 gange så lang bjælkestrækning som den 32 cm målelængde, altså $n=20$).

Dersom hvert af jernene i ubeskadiget tilstand kan bære T_0 tons ved en flydespænding på 2 400 kg/cm², vil det være dimensioneret for kraften $T = T_0 \cdot \frac{1300}{2400}$ tons, altså med en sikkerhedsfaktor på $\frac{24}{13} = 1,85$. Under hensyn-

tagen til risikoen for skørt brud gennem kærsvirkning — jvf. den ujævnt fordelte totale brudforlængelse på 3,4 % ved indtæringsdybden 3,3 mm, ifølge et eksempel på fig. 3 — antager vi, at ved en vis kritisk indtæringsdybde t_{kr} vil et armeringsjerns flydespænding være indtrådt, og dermed dets brudtilstand. Størrelsen af t_{kr} er for så vidt ukendt, som det begrænsede antal forsøgsresultater i fig. 2 ikke gør formel (1) gyldig ud over $t=2,7$ mm; alligevel vil vi til illustration ekstrapolere herudover, hvilket giver resultater, der formentlig overvurderer risikoen (ved $t=6$ mm regnes således formelt det 12 mm jerns bæreevne udtømt, selv om det kun er rustet halvt over). Vi får $t_{kr,1}=4,07$ mm for den armeringsstang, der først går i stykker; herefter skal kraften $6 \cdot T_0$ bæres alene af 5 stænger, hvilket for næste stang giver $t_{kr,2}=3,55$ mm, medens analogt $t_{kr,3}$ er lig 2,59 mm for den tredje stang, der endnu kan tænkes at være i funktion (efter brud på disse 3 stænger, går også de resterende 3 i stykker, fordi den oprindelige sikkerhed var mindre end 2).

For hver af de 6 stænger (af længden $n \cdot l_1$) fås efter (2) og (7), at sandsynligheden for maksimale rustdybder større end den kritiske t_{kr} er

$$P[t_{\max} > t_{kr}] = 1 - e^{-n \cdot \mu_1 \cdot e^{-t_{kr}/t_m}} \dots \dots \dots (8)$$

hvilket under de gjorte antagelser er brudsandsynligheden for den pågældende stang.

I tabel 2 er anført beregnede brudsandsynligheder¹ ifølge ovennævnte forud-

¹ Beregnet i lighed med fremgangsmåden hos H. E. Daniels, se litt.

Tabel 2. Sandsynlighed for brud på 6 samvirkende Ø 12 mm stænger, alle af længde $n \cdot 32$ cm og hver med gennemsnitlig μ_1 gravrustangreb per 32 cm. Middelrustdybden t_m er, som fundet ved forsøget, ansat til 0,68 mm efter 12 års forløb og skønnet til 1,16 mm efter ca. 60 år

t_m mm		0,68 (12 år)	1,16 (ca 60 år)
$n \cdot \mu_1$	4	0,1220 %	17,475 %
	2	0,0170 %	3,890 %
	1	0,0023 %	0,654 %

sætninger for de samvirkende 6 armeringsjern i bjælken ved værdierne 4, 2 og 1 af produktet $n \cdot \mu_1$. (Ved $n=20$ svarer dette til middelantallet μ_1 lig med 0,2, 0,1 henholdsvis 0,05 angreb pr. 32 cm, altså til middelfastande mellem rustkraterne på 160, 320 hhv. 640 cm). Endvidere er regnet med 2 forskellige middel-indtæringsdybder, nemlig den af forsøget fundne $t_m = 0,68$ mm, opstået

i løbet af 12 år, og en værdi på $t_m = 0,68 \cdot \sqrt[3]{\frac{60}{12}} = 1,16$ mm, anslået skønsmæssigt som gældende efter ialt 60 års forløb (idet volumentabet skønnes proportionalt dels med tiden, dels med t_m^3).

Som fremhævet, er denne illustrerende beregning behæftet med usikkerheder i form af antagelser, der overvurderer risikoen — uvist hvor meget. Endvidere er den forenklede belastningsforudsætning meget ugunstig; den er valgt for at undgå at kombinere sandsynligheden for en vis svækkelse på et eller andet sted af jernet med en eksempelvis parabolisk kraftfordeling af trækraften langs dette (som ved jævnt fordelt belastning på en bjælke). Men selv med alle sådanne forbehold illustrerer eksemplet bl. a., at man ikke i almindelighed kan ansætte en bestemt μ_1 -værdi som forsvarlig; derimod kan man måske nå frem til en største tilladelig værdi af μ_1 under forudsætning af en accepteret brudsandsynlighed (f. eks. 0,1 %), når i øvrigt lastfordeling, jernantal og -dimensioner samt bjælkelængde er givne og når t_m er skønnet eller målt ordentligt til det pågældende tidspunkt — såsom efter bygværkets afskrivning (f. eks. 60 år).

Slutning

SBI's arbejde igangsattes af civilingeniør Niels Munk Plum, som stod for ledelsen deraf, indtil han i 1963 indstillede sit arbejde ved SBI. Ingeniør Benny Dylander, overassistent P. E. Enemark og fotograf B. Hjorth

udførte den detaljerede besigtigelse og fotografering af fliserne. Civilingeniør Alice Kjær forestod de kemiske analyser, og betonen undersøgtes petrografisk af mag. scient. Gunnar Larsen. SBI's statistiske afdeling, ved cand. polit. P. Bredsdorff og cand. polit. Hanne Spøhr, har udarbejdet estimeringsmetoden for μ_1 og t_m samt angivet beregningsmåden for brudsandsynligheden. Målingen og bedømmelsen af rustangrebene samt den statistiske behandling af materialet er foretaget af civilingeniør Mogens Frederiksen.

Siden forsøget igangsattes, er fremkommet en del litteratur om korrosion som følge af kloridtilsætning m. m.; enkelte henvisninger hertil findes i litteraturlisten.

Ved et langtidsforsøg som dette er det vanskeligt at opnå den fulde ensartethed i materialekvalitet, som lader de primære variable fremtræde ganske klart, så ethvert fortolkningsproblem undgås. Men trods afvigelser mellem kalciumkloridprocenter på de forskellige forsøgsstationer, de valgte betonkvaliteter, armeringsjernenes beskaffenhed samt selve udførelsesmåden, dæklagstykkelsens nøjagtighed m. m. — har man ved bedømmelsesmetoderne kunnet opnå væsentlige udsagn om indflydelsen af de vigtigste faktorer, nemlig CaCl_2 -procenten og betonkvaliteten.

Summary

The investigation described in the present article was made on 72 reinforced concrete slabs. Different quantities of calcium chloride were added to the concrete in connection with pouring. These slabs were exposed to weather action for 12 years. After that, each slab was cut into two halves. One of these halves was broken to pieces, its reinforcing bars were removed, and concrete samples were taken from it for close investigation. The factors studied in this investigation included, among others, the effects produced on the disintegration of the concrete under atmospheric influences and on the degree of corrosion of the reinforcing bars by the following variables: the use of 3 different specified mix proportions of the concrete, the addition of 4 different amounts of calcium chloride, the utilisation of sand-blasted and non-sand-blasted reinforcement, the conditions of exposure in different regions of Denmark where the three groups consisting of 24 slabs each were tested, and the orientation of the individual slabs.

The maximum depths of the pits formed by corrosion were measured on each one of the about 1700 reinforcing bars, some 32 cm in length each, which had been removed from the slabs. Numbers of pits on each bar were counted, and were found to be distributed in accordance with Poisson's distribution.

By using the statistical theory of the distribution of extreme values, parameters were deduced as a measure of the degree of severity of corrosive attack, namely the mean of the numbers of corrosion pits on each bar μ_1 and the mean pit depth t_m . As regards the two essential factors which have important effects on the durability of concrete and reinforcing bars, viz., the composition of the concrete and the percentage of calcium chloride, it was found that the cement content should not be lower than 300 kg per m^3 of concrete, as the amount of calcium chloride, an upper limit of 2% by weight of cement, which had been suggested by others as tolerable in practice, was not found to be in contradiction with the results of the investigation. A study of the latter did not make it possible to discern the influence of such a moderate amount of calcium chloride from that of other factors.

With respect to the two parameters mentioned above, μ_1 was found to be appreciably influenced by both the amount of calcium chloride and the mix proportions, while this was not the case for t_m . However, that does not mean that any proper limit for the mean of the numbers of pits can be established, as the safety of a construction depends, among other things, on the number of reinforcement bars employed and on their lengths and diameters.

The tensile strength of the reinforcing bars has been tested in 184 cases, and the results of these tests indicated that this strength decreased linearly as the square of the depth of pits became greater at least for moderate depths. Furthermore, it was observed that the ultimate elongation was markedly reduced as the degree of corrosion became higher.

Litteratur

- Bergström, Sven G.—Holst, Hans E.: Korrosionsrisiken vid användning av kalciumklorid i betong. Statens Nämnd för Byggnadsforskning. Rapport 60. Stockholm 1960.
- Lobry de Bruyn, C. A.—Theissing, E. M.: Elektrochemische Untersuchungsmethoden zur Frage der Betonstahlkorrosion durch Chloride. Electrochemical investigation methods for the problem of the corrosion of reinforcing steel in concrete by chloride. Zement-Kalk-Gips, 15. Jahrgang, Heft 2, pp. 71—76, Wiesbaden, 1962.
- Gumbel, Emil J.: Statistical Theory of Extreme Values and some Practical Applications. National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series, No. 33, Washington, February 1954.
- Daniels, H. E.: The statistical theory of the strength of bundles of threads. I. Proc. Royal Soc., A, volume 183, pp. 405—435, Cambridge, 1945.
- Larsen, Gunnar: Cementpastaudludning som forvittringsprocess i betong. Nordisk Betong, årgång 7, nr. 2, pp. 203—220, Stockholm 1963.
- Sneck, Tenho: Elektrokemiska effekter i samband med betongens nedbrytning. Nordisk Betong, nr 3, 1959, s. 225—231.