

SÆRTRYK 135

UDK 624.012.4:624.073

:620.191.33

Nordisk Betong nr. 4, 1963

kr. 4,50 i. o.

Benny Dylander og Jørn Jessing
Metoder til konstatering af revneforløb i
betonflader

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
I kommission hos Teknisk Forlag · København 1964

Metoder til konstatering af revneforløb i betonflader

Methods for Detection of Cracks in Concrete Surfaces

BENNY DYLANDER* – JØRN JESSING**

Indledning

Ved de undersøgelser af betons holdbarhed, der i en årrække er foregået ved Statens Byggeforskningsinstitut — især som et led i det arbejde, der udførtes af Udvalget vedrørende Alkalireaktioner i Beton — er studier af revneforløb i beton i det væsentlige foretaget ved mikroskopisk analyse af tyndsnit suppleret med visuel besigtigelse af bygværker og prøver. Oplysninger herom er bl. a. meddelt af G. M. I d o r n [56 I 1], [61 I 1] og Gunnar L a r s e n [63 L 3]. Fra tid til anden har der imidlertid foreligget et behov for at kunne fastlægge revneforløbet med større sikkerhed og præcision end muligt ved visuel besigtigelse og på en hurtigere og mere bekvem måde end ved tyndsnitsanalyse. Problemet aktualiseredes ved en rekvireret undersøgelse af grusmaterialers frostbestandighed, hvorunder bl. a. revneforløbet i betonprismer, der havde været underkastet frysning, skulle kortlægges. I slutningen af 1960 iværksattes derfor på Statens Byggeforskningsinstituts laboratorium et arbejde med udvikling af metoder til konstatering af revner og revneforløb i betonflader, specielt med henblik på at finde en hurtig ikke-destruktiv metode, ved hvilken man kan konstatere og ”fastholde” de af en betonflades revner, hvis vidder ligger mellem en kendt øvre og nedre grænse.

Undersøgelsen er foretaget i samarbejde med cand. mag. Erik Stenestad, som har udført de mikroskopiske analyser, og assistent Poul Enemark, der selvstændigt har udviklet fluorescensmetoderne for beton på basis af tilsvarende metoder indenfor svejseteknikken. Økonomisk støtte er modtaget gennem en bevilling fra Det Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd.

* Ingeniør, M. af L., Statens Byggeforskningsinstitut, Laboratoriet, København.

** Civilingeniør, Statens Byggeforskningsinstitut, Laboratoriet, København.

Metoder

Nærværende artikel omhandler foruden de to ovennævnte revnekonstateringsmetoder en xylolmetode og to fluorescensmetoder. Flere metoder er undersøgt, men kun de her nævnte (mikroskoperingsmetoden i forbindelse med tyndsnit dog undtaget) opfyldte kravet om ikke-destruktion. Metoderne anvendtes dels på 15 af de nævnte betonprismer, dels på mørtelprøvelegemer, fremstillet til formålet.

Den visuelle metode

Ved den visuelle metode foregår revnekonstateringen ved en besigtigelse af betonfladen med det blotte øje. Revneforløbet fastholdes ved at optegne det med tusch enten direkte på betonfladen eller på et fotografi af denne.

Metoden skal, for at kunne betegnes som objektiv, udføres med omhu. Grænsen for, hvor små revnevidder der tydeligt kan skelnes fra andre strukturer, varierer efter laboratoriets erfaringer ikke meget fra observatør til observatør; den ligger normalt omkring 10—20 μ , men i visse tilfælde betydeligt højere, afhængigt af revnernes udformning og overfladens beskaffenhed.

Xylolmetoden

Konstatering og fastholdelse af revneforløbet foregår som ved den visuelle metode, men der opnås en tydeliggørelse af revner ved, at betonfladen fugtes med xylol. Ved fugtningen sker der en ind sugning af xylol i revner og stærkt porøse partier, mens resten af fladen står blank. Fordampningen medfører, at overfladen tørrer i løbet af kort tid. Revner med ikke for stor vidde samt stærkt porøse partier holder sig imidlertid, på grund af tilførsel af den opsugede xylol, fugtige nogle sekunder længere end den øvrige flade. For revner med vidder større end ca. 30 μ , sker ingen tydeliggørelse, idet kapillarkirkningen her er ringe. Da disse revner alligevel normalt kan ses med det blotte øje, vil de blive registreret under optegningen.

Det er en svaghed ved denne metode, at det tydeliggjorte revneforløb kun er synligt i få sekunder, hvorved en betydelig subjektiv faktor indføres under optegningen.

Fluorescensmetode I

Fluorescensmetode I virker efter et lignende princip som xylolmetoden. Betonfladen besprøjtes med forstøvet fluorescerende olie, som får tid til at trænge ind i revner og porøse partier, før fladen aftørres med et rensmiddel. Olie opsuges herefter fra betonen i et sugende materiale, som i forstøvet

tilstand besprøjtes overfladen i mindre til forstøvet

Ved små revnevidder vil der, foruden den olie, som er trængt ind gennem revnernes sidevægge, være ophobet olie i selve revnerne, således at der optages betydelige oliemængder i det sugende materiale. Dette vil ikke være tilfældet ved store revnevidder, hvorfor sådanne revner undertiden aftegner sig utydeligt ved den ultraviolette bestråling.

Da den fluorescerende olie tillige trænger ned i porøse partier af betonoverfladen, vil også disse ved bestrålingen fremtræde lysende, hvilket kan utydeliggøre revnebilledet. Imidlertid er lysintensiteten i almindelighed kraftigst for revnerne, idet mængden af den ind sugede olie er afhængig af størrelsen af arealerne af revnernes sidevægge. Lysintensiteten for en revne vil således i første række være mere afhængig af revnedybden end af revnevidden. Dette betyder at revnebilledet hovedsagelig kun vil blive utydeliggjort af de porøse partier, når revnernes dybde ikke er væsentlig større end den dybde, hvortil olien er trængt ned i de porøse partier, eller når revnernes sidevægge er tættere end betonoverfladen. Revnebilledet utydeliggøres dog også af, at olien efterhånden vil brede sig fra revnerne ud i det sugende materiale. Dette modvirkes ved, at betonoverfladen besprøjtes med fixativ i det øjeblik revnebilledet opnår maximal skarphed, således at denne kan fastholdes. Selv om det påsprøjtede sugende materiale er præpareret med fixativ, kan det når som helst fjernes fuldstændigt ved afbørstning.

Revneforløbet kan herefter på et vilkårligt tidspunkt optegnes på transparent papir, der lægges direkte over betonfladen. I stedet for denne optegning kan revnebilledet affotograferes i ultraviolet lys i forbindelse med et UV-filter, som indskydes foran objektivet. I reglen opnås dog sjældent ved fluorescensmetode I stor kontrast i de affotograferede revnebilleder.

Fluorescensmetode II

Ved denne metode anvendes ligesom ved fluorescensmetode I en olie som i forstøvet tilstand sprøjtes på betonfladen. I olien er opslemmet kugleformede fluorescerende partikler, hvis diameter varierer mellem 1 og 6 μ .

Den påsprøjtede olie vil trænge ned eller ind i revner og porøsiteter, hvorved de fluorescerende partikler vil transporteres hen mod og efterhånden opfylde revner og porer, som herefter vil fremtræde lysende ved bestråling med ultraviolet lys. At der også aflejres partikler på den del af betonfladen, som ikke har revner eller porøsiteter, medfører, at hele fladen vil få et svagt fluorescerende skær, idet overfladen ikke kan aftørres, uden at revnebilledet forstyrres. I almindelighed er dog koncentrationen af partikler betydelig mindre på betonfladen end ved revner og porøsiteter, hvorfor dette skær ikke virker

gør samme forhold sig gældende som ved fluorescensmetode I. Hvor en revnes vidde er så lille, at de fluorescerende partikler ikke kan trænge ind, vil partiklerne aflejres over revnen i ret stor mængde, idet kapillarvirkningen ved disse revner almindeligvis er stor. Således vil fine revner normalt fremtræde skarpt og tydeligt ved bestråling med ultraviolet lys. Revner, hvis vidde er stor i forhold til partikelstørrelsen, vil derimod vanskeligt kunne fremtræde tydeligt, især ikke hvor revnedybden er stor, idet revnen da vanskeligt kan opfyldes af de fluorescerende partikler.

For at imødegå denne ulempe er metoden udvidet til at omfatte en udfyldning af revner og porer med pulveriseret kridt, inden olien påsprøjtes. Kridtet påføres i tør tilstand og bearbejdes således at revner og porer er fuldstændig udfyldte, og betonfladen aftørres herefter. Ved udfyldningen forøges kapillarvirkningen for store og mellemstore revner betydeligt, ligesom det undgås, at disse revner skal opfyldes med de fluorescerende partikler for at fremtræde lysende ved bestrålingen med ultraviolet lys. De fine revner opfyldes ikke af kridt, men fremtræder som omtalt alligevel tydeligt.

Det er en fordel ved metoden, at bredden af den lysende stribe, som under bestrålingen med ultraviolet lys markerer en revne, omtrent er lig med vedkommende revnes vidde. Dette giver et tydeligt billede af revneviddernes indbyrdes størrelsesforhold, hvilket ikke opnås med de andre beskrevne metoder; dog vil meget fine revner altid fremtræde med en bredde, som er større end revnevidden, idet de fluorescerende partikler ligger som en vold over revneåbningen. De enkelte porer i eventuelle porøse partier vil ligeledes fremtræde skarpt ved denne metode, således at de lettere skelnes fra revnerne. Forskellen i lysintensitet for revner og porer og for den øvrige betonflade er på grund af den forøgede kapillarvirkning stor, hvilket medfører, at metoden er velegnet i forbindelse med fotografering.

Metoden er relativt nem at anvende, men kræver omhu ved påføringen af kridtpulveret.

Mikroskoperingsmetoden

Revner i betonprøver konstateres ved hjælp af mikroskop enten på tyndsnit eller på glatte, helst polerede, overflader. Til tyndsnit benyttes polarisationsmikroskop i forbindelse med gennemfaldende lys, og til overflader stereomikroskop i forbindelse med påfaldende lys. Almindeligvis observeres ved $100\times$ forstørrelse; men større og mindre forstørrelsesgrader benyttes hyppigt til studier af detaljer eller i tilfælde, hvor der ønskes et større overblik.

De sikreste observationer opnås i tyndsnit. Prøven bliver, ved den på SBI's laboratorium udarbejdede præparationsmetode [58 P 5], [61 A 7], inden slib-

ningen gennemimprægneret med farvet kunstharpix, således at det originale revnebillede fikseres. Under mikroskopet fremtræder revner med selv meget lille vidde tydeligt som røde linier på den lysegrå eller gullige baggrund.

Ved studiet af polerede betonoverflader med stereomikroskop er observationen af revner med meget lille vidde mere vanskelig, idet overfladen ikke er imprægneret eller farvet. Revner med stor vidde observeres som sorte linier på betonfladens lysegrå baggrund. Revner med lille vidde kan observeres på samme måde eller som fine hvide linier af pulveriseret cementpasta, hvor kanterne ved revnen er knust. I andre tilfælde afsløres de af den skygge, som det skråt indfaldende mikroskoplys frembringer, og der vil derfor være mulighed for at overse sådanne revner, f. eks. hvis lyset falder ind parallelt med revnens længderetning eller hvis betonfladen på hver side af revnen ligger i forskelligt plan og danner "tag" over revnen.

Undersøgelser på betonprismer

For at kunne foretage en foreløbig vurdering af metodernes egnethed og for eventuelt at kunne planlægge en undersøgelse med kontrollerede forsøgsbetingelser, er revneforløbet i de i indledningen nævnte 15 betonprismer blevet kortlagt ved den visuelle metode, xylolmetoden, fluorescensmetode I og mikroskoperingsmetoden.

Prismernes data

Prismerne er udtaget af en større serie, og er derfor forskellige i henseende til betonsammensætning og det antal frostcykler, de har været underkastet. Således varierer cementindholdet fra 470 til 718 kg/m³, v/c-tallet fra 0,4 til 0,6, sand/grus-procenten fra 40 til 80 og betonens finhedsmodul, FM_B , fra 1,46 til 3,97. Antallet af frostcykler har varieret mellem 96 og 234. Prismernes størrelse var $60\times 10\times 10$ cm. Med en almindelig mekanisk stensav deltes hvert prisme i 2 dele ved et halveringssnit vinkelret på sidefladerne, hvorved der fremkom 2 snitflader med en indbyrdes afstand i det oprindelige prisme på ca. $\frac{1}{2}$ cm. På den ene af disse flader anvendtes den visuelle metode og fluorescensmetode I, og på den anden xylolmetoden. Mikroskoperingsmetoden anvendtes på tyndsnit fremstillet af beton fra et plan parallelt med halveringssnittet beliggende ca. 6 cm fra dette. De fremstillede tyndsnit dækker kun halvdelen af hvert prismes tværsnit; de har dimensionerne 5×10 cm.

Revnetypernes vidder og fordeling

Som grundlag for en sammenligning af metoderne er anvendt længden af de konstaterede revner i hvert prisme. Revnerne blev opdelt i 3 typer:

Tabel 1. Betonprismernes revneintensitet, I_R (cm/cm²), bestemt ved mikroskopoperingsmetoden, den visuelle metode, xylolmetoden og fluorescensmetode I.

I_R er tillige anført i % af I_R -mikroskopering

Prisme nr.	FM_B	Mikroskoperingmetode		Visuel metode		Xylolmetode		Fluorescensmetode I	
		I_R cm/cm ²	I_R %	I_R cm/cm ²	I_R %	I_R cm/cm ²	I_R %	I_R cm/cm ²	I_R %
1	1,46	0,90	100,0	0,19	21,1	0,46	51,2	1,26	140,0
2	1,48	0,18	100,0	0,02	11,1	0,36	200,0	1,55	862,0
3	1,95	1,40	100,0	0,13	9,3	0,48	34,2	1,97	141,0
4	2,26	1,29	100,0	0,35	27,1	0,44	34,1	1,56	121,0
5	2,33	1,29	100,0	0,22	17,1	0,39	30,2	2,36	183,0
6	2,37	4,10	100,0	0,44	10,7	0,67	16,3	1,47	35,8
7	2,62	1,40	100,0	0,21	15,0	0,42	30,0	1,32	94,0
8	2,62	0,68	100,0	0,08	11,8	0,59	86,8	0,59	86,7
9	3,46	1,64	100,0	0,42	25,6	0,75	45,7	0,95	57,8
10	3,55	2,09	100,0	0,32	15,3	0,79	37,8	1,28	61,2
11	3,58	2,11	100,0	0,46	21,8	0,72	34,1	1,39	66,0
12	3,60	2,14	100,0	0,13	6,1	0,62	29,0	0,77	36,0
13	3,60	1,54	100,0	0,33	21,4	0,75	48,6	1,18	76,6
14	3,63	1,18	100,0	0,37	31,4	0,67	56,8	1,42	120,2
15	3,97	2,11	100,0	0,58	27,5	1,01	47,8	1,45	68,8

1) partikelrevner, som er revner i stenpartikler (> 4 mm[□]), 2) kontaktrevner, som er revner, der forløber i kontaktzonen mellem stenpartikler og mørtel, samt 3) mørtelrevner, der ikke har tilknytning til stenpartikler. Hver type opmålt ved hver metode for sig ved hjælp af et kortur, og den totale længde, R , udregnedes for hvert prisme. På grundlag heraf udregnedes revneintensiteten, I_R , som forholdet mellem R og den undersøgte flades areal. Måleresultaterne er anført i tabel 1.

Nogen direkte korrelation mellem I_R for de fire metoder fandtes ikke. Dette kunne heller ikke forventes, idet revnelængden for hver forekommende revnevidde da skulle være procentisk lige stor i alle prismerne. At denne fordeling faktisk er forskellig fra prisme til prisme, belyses af målinger af vidderne for de tre revnetyper og af det forhold, at hver revnetypes andel af den samlede revnelængde ikke er af samme størrelsesorden i de 15 prismere.

Målinger af revnevidder er foretaget på de 15 tyndsnit. På hvert tyndsnit indtegnedes 2 linier parallelt med de lange kanter i ca. 1,5 cm's afstand fra disse. Vidden af alle revner, der blev skåret af linierne, målt ved hjælp af polarisationsmikroskop med påmonteret måleokular. Ialt målt vidden af 133 mørtelrevner, 139 kontaktrevner og 36 partikelrevner. Revnevidderne blev inddelt i 10 klasser, hvis grænser er angivet i tabel 2.

Tabel 2. Klassenævningerne af de ni revnevidder

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Revnevidde	< 5 μ	≥ 5 < 10 μ	≥ 10 < 20 μ	≥ 20 < 40 μ	≥ 40 < 80 μ	≥ 80 < 160 μ	≥ 160 < 325 μ	≥ 325 < 650 μ	≥ 650 < 1300 μ	≥ 1300 < 2600 μ

Resultatet af målingerne fremgår af fig. 1, hvor den kummulerede hyppighed for de tre revnetypers vidder er vist. Kurven for partikelrevner er behæftet med stor usikkerhed, idet den er optegnet på grundlag af kun 36 observationer. Det fremgår af figuren, at partikel- og kontaktrevnerne gennemgående optræder med større vidde end mørtelrevnerne.

I tabel 3 er for mikroskoperingmetoden anført de tre revnetypers procentiske andel af den totale revnelængde i hvert prisme. Revnetypefordelingen varierer, som nævnt, stærkt fra prisme til prisme. En mineralogisk undersøgelse af de 15 tyndsnit, som blev foretaget i en anden sammenhæng, viste, at kontakt- og partikelrevners procentiske andel af den totale revnelængde vokser med stigende FM_B . Dette forhold er anskueliggjort ved regressionslinien i fig. 2, hvor summen af de i tabel 3 anførte partikel- og kontaktrevneandele er sat i relation til prismernes FM_B .

Sammenholdes fig. 1 og 2 ses det, at der i de prismere, der er fremstillet af beton med stort FM_B , findes større længde af revner med stor vidde, end i de prismere, hvor betonens FM_B er lille.

Tabel 3. Revnetypernes procentiske andel af den totale revnelængde (mikroskoperingmetoden)

Prisme nr.	Partikelrevner %	Kontaktrevner %	Mørtelrevner %
1	10,9	26,9	62,2
2	18,4	11,2	70,4
3	5,3	24,3	65,4
4	6,6	28,7	64,7
5	29,7	9,7	60,6
6	5,4	22,8	71,8
7	2,0	23,2	74,8
8	21,3	32,6	46,1
9	20,7	29,4	49,9
10	5,4	48,9	45,7
11	1,9	44,6	53,5
12	35,1	32,4	32,5
13	22,8	30,4	46,8
14	6,2	37,2	56,6
15	2,9	43,2	53,9

Metodernes afhængighed af revnevidden

På SBI's laboratorium anvendes, som omtalt i indledningen, almindeligvis mikroskoperingsmetoden, når revneforløb skal kortlægges i detaljer, og efter laboratoriets erfaring konstateres ved denne metode, når den anvendes på tyndsnit, med god sikkerhed alle forekommende revner med vidder over ca. 5 μ . Mikroskoperingsmetoden er derfor anvendt som referencemetode i forbindelse med bestemmelse af, om revneintensiteten bestemt ved de tre andre metoder er afhængig af den konstaterede fordeling af revnevidder i prismerne.

I fig. 3 er således værdierne for henholdsvis I_R -visuel, I_R -xylol og I_R -fluorescens, udtrykt i procent af I_R -mikroskopering, indtegnet i afhængighed af FM_B . I denne figur er desuden for fluorescensmetode I indtegnet regressionslinien for afhængigheden af FM_B ; korrelationskoefficienten for denne linie er $-0,581$, svarende til signifikansniveau = $0,035$. Afhængighed af FM_B er ikke fundet for den visuelle metode og for xyloletoden, idet signifikansniveauet for regressionslinierne for disse metoder er større end $0,10$. Denne uafhængighed af FM_B er i fig. 3 antydning ved, at der for de to metoder er indtegnet vandrette linier for middelværdien af de 15 observationer.

Det ses af de indtegnede linier, at der ved såvel den visuelle metode som ved xyloletoden er konstateret mindre revneintensitet end ved mikroskoperingsmetoden. Yderligere ses det, at fluorescensmetode I giver større revneintensitet end mikroskoperingsmetoden for prismar med $FM_B < 2,7$, og mindre revneintensitet end mikroskoperingsmetoden for prismar med $FM_B > 2,7$. Sammenholdes dette med fig. 1 og 2, ses det, at fluorescensmetode I tilsyneladende medtager en del revner med lille vidde, som ikke konstateres ved mikroskoperingsmetoden, og endvidere at fluorescensmetode I ikke medtager alle revner med stor vidde.

Usikkerheden på de fundne resultater er meget stor, hvilket fremgår af de i fig. 2 og 3 indtegnede 95 %-konfidensintervaller. En del af usikkerheden er utvivlsomt knyttet til selve metoderne, men også forhold, som er metoderne uvedkommende, har medvirket. Eksempelvis kan nævnes, at kun fluorescensmetoden og den visuelle metode er anvendt på samme snitflade i hvert prisme. Afstanden fra denne snitflade til de snitflader, på hvilke xyloletoden og mikroskoperingsmetoden er anvendt, er henholdsvis 1 og 7 cm. For at afklare hvilken indflydelse dette forhold kunne have på de foretagne målinger, bestemtes revneintensitetens størrelse ved fluorescensmetode I i forskellige snit i prisme 11.

Det blev her fundet, at revneintensiteten gennem hele prismet varierede fra 79 til 127 % af middelværdien og at revneintensiteten i snit med 6 cm indbyrdes afstand maksimalt varierede fra 85 til 115 % af middelværdien.

Fig. 1. Kummuleret hyppighed for partikelkontakt- og mørtelrevners vidde målt mikroskopisk på betonprismer. ● Cumulative frequencies of the widths of cracks passing through particles of aggregate (particle cracks), through surfaces of contact between particles of aggregate and cement mortar alone (mortar cracks). The widths of cracks were measured with a microscope on concrete prisms.

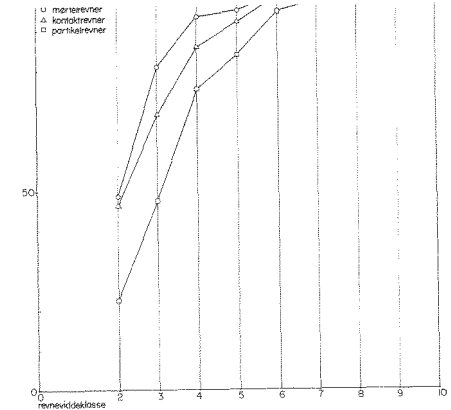


Fig. 2. Relationen mellem betonprismernes finhedsmodul, FM_B , og partikel- plus kontaktrevners procentiske andel af den totale revnelængde (mikroskoperingsmetoden). De stiplede linier angiver 95 %-konfidensintervallet. ● Relation between the fineness modulus, FM_B , of the concrete prisms and the sum of the lengths of particle cracks and contact cracks expressed in per cent of the total length of cracks (microscopic method). The dash-line curves represent the 95 per cent confidence limits.

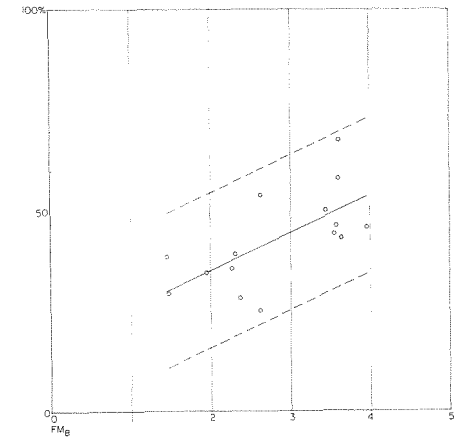
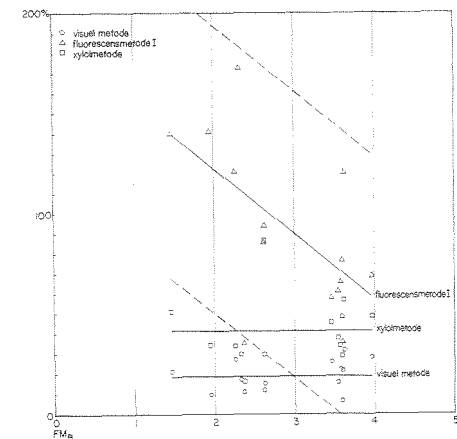


Fig. 3. Relationen mellem betonprismernes finhedsmodul, FM_B , og revneintensitet, bestemt ved den visuelle metode, xyloletoden og fluorescensmetode I, i procent af revneintensiteten bestemt ved mikroskoperingsmetoden. For fluorescensmetode I er med stiplede linier angivet 95 %-konfidensintervallet. ● Relation between the fineness modulus, FM_B , of the concrete prisms and the intensity of cracks determined by means of the visual method, the xylol method, and the fluorescence method I, and expressed in per cent of the intensity of cracks determined by means of the microscopic method. The dash-line curves represent the 95 per cent confidence limits for fluorescence method I.



Resultatet af undersøgelsen af de tre metoder bekræfter, hvad der under metodebeskrivelsen er nævnt om hver af metoderne, og har derfor, til trods for usikkerheden på måleresultaterne, dannet grundlag for de videre undersøgelser, således at fluorescensmetode I ikke er medtaget i disse. Udskydelsen af fluorescensmetode I skyldes, at man ved denne metode ifølge den foreløbige undersøgelse ikke med sikkerhed kan konstatere revner med stor vidde, således som det er tilfældet ved den visuelle metode og xylolmetoden. I næsten alle tilfælde, hvor man ønsker at konstatere revner, tillægges de kraftige revner størst betydning, og fluorescensmetode I må derfor betragtes som praktisk uanvendelig, idet en kombination af denne og den visuelle metode, ved hvilken de kraftige revner kan konstateres, er ret besværlig. Muligheden for at undgå ulemperne ved fluorescensmetode I er givet ved at anvende olie med opslemmede partikler kombineret med en opfyldning af revnerne med kridt, som ved fluorescensmetode II.

Undersøgelser på mørtelprøvelegemer

De fortsatte undersøgelser har omfattet den visuelle metode, xylolmetoden, fluorescensmetode II og mikroskoperingsmetoden. Undersøgelserne har særligt taget sigte på nøje at bestemme den øvre og nedre grænse for vidderne af de revner, som kan konstateres ved hver af metoderne. Der fremstilledes på laboratoriet 10 mørtelprøvelegemer, på hvis ene overflade de 4 metoder anvendtes.

Prøvelegemernes data

De ti prøvelegemer, hvis størrelse var $8,5 \times 8,5 \times 3,0$ cm, fremstilledes af sømaterialer med maximal kornstørrelse 4 mm med et cementindhold på 370 kg/m^3 . Der anvendtes rapidcement, og v/c-tallet for blandingen var 0,83. Prøvelegemerne støbtes i plasticforme. De to kvadratiske flader var orienteret vandret og benævnes i det følgende henholdsvis over- og underside; undersiden støbtes mod form, mens oversiden holdtes fri. Umiddelbart efter udstøbningen anbragtes i mørtelen 3 \varnothing 10 mm expansionsrør af 2 cm's længde med den ene røråbning i plan med prøvelegemets overside. Expansionsrørene var forsynet med en keglestubformet kerne, som efter 10 dages lagring af prismene blev presset ind i rørene ved hjælp af en trykpresse. Herved fremkaldtes et revneforløb, som var tydeligt også i prøvelegemernes underside. Ved den beskrevne fremgangsmåde opnåedes, at undersiden blev en meget glat flade med et revneforløb, hvor alle normalt forekommende vidder var repræ-

senteret. For at undgå yderligere deformationer beskyttedes prøvelegemerne overside med en pålimet glasplade. Prøvelegemerne er i hele undersøgelsesperioden blevet opbevaret i luft med konstant temperatur og fugtighedsgrad, således at fugt- og temperaturbetingede deformationer ikke er forekommet.

Konstatering af revner

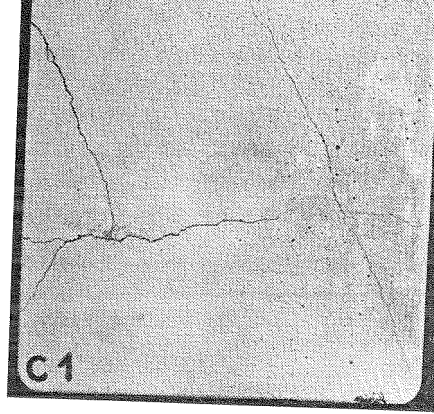
De fire metoder anvendtes på een og samme flade i hvert prøvelegeme, nemlig den omtalte glatte underside. Efter fotografering af fladen for fremstilling af arbejdsfoto i mål 1:1, blev revneforløbet kortlagt ved mikroskoperingsmetoden. Der anvendtes stereomikroskop med påmonteret måleokular, således at revnevidderne kunne måles. Revnevidderne inddeltes i de 10 klasser, hvis grænser er anført i tabel 2, og revnerne indtegnedes på arbejdsfotoet med een farve for hver klasse. Revnelængden målt for hver klasse for sig på arbejdsfotoet ved hjælp af en stikpasser.

Revnekonstateringen ved den visuelle metode og xylolmetoden foretoges på samme måde som ved den foreløbige undersøgelse, hvor revneforløbet optegnedes på transparent papir. Ved at sammenholde de optegnede revnebilleder med de tilsvarende arbejdsfotos inddeltes revnerne i de før nævnte klasser, og længden opmålt for hver klasse for sig. Fluorescensmetode II anvendtes i forbindelse med fotografering af de lysende revneforløb. Revnebilledet for hvert prisme blev sammenholdt med det tilsvarende arbejdsfoto, og da det konstateredes, at alle revner, som var observeret ved mikroskoperingsmetoden, også var medtaget ved fluorescensmetode II, tillagdes hver revnevidde-klasse samme længdeværdi som var målt ved mikroskoperingsmetoden. Imidlertid var en del revner, som ikke var observeret ved mikroskoperingsmetoden, medtaget ved fluorescensmetode II; kontrolobservationer viste, at disse revner ikke kan observeres ved mikroskoperingsmetoden; og det må derfor antages at deres vidde er mindre end ca. 5μ , som er den mindste revneviddestørrelse, der med sikkerhed kan observeres mikroskopisk. Længden af de ved fluorescensmetode II konstaterede fine revner er ikke opmålt.

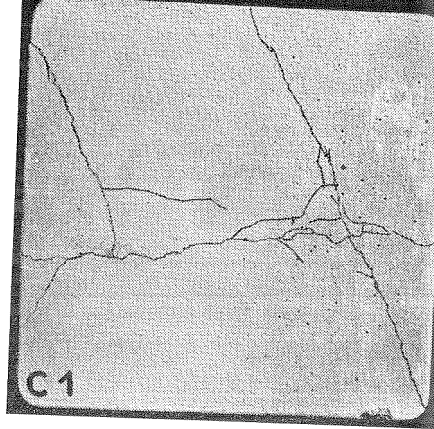
Revneforløbet, bestemt ved de fire metoder, er for prøvelegemerne C 1 og C 9 vist i fig. 4 og 5.

Måleresultater

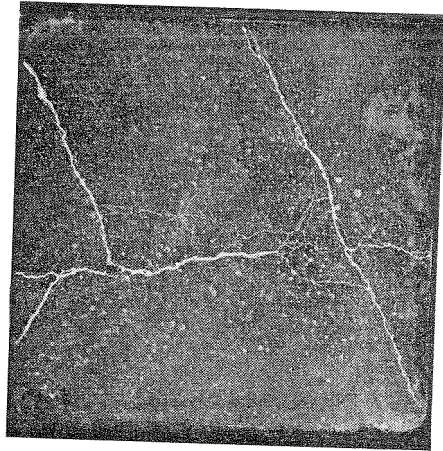
Længden af de ved mikroskoperingsmetoden konstaterede revner, R_M , er anført i tabel 4. Den ved den visuelle metode, xylolmetoden og fluorescensmetode II i hvert prøvelegeme konstaterede revnelængde, R_V , R_X og R_F , er for revnevidde-klasserne 2—10 udregnet i procent af den faktiske revnelængde, som for disse klasser er defineret som R_M . Middelværdierne af $\frac{R_V \cdot 100}{R_M}$, $\frac{R_X \cdot 100}{R_M}$



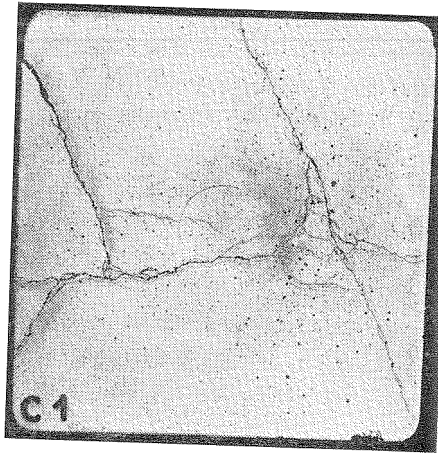
a. Den visuelle metode. • *Visual method.*



b. Xylolmetoden. • *Xylol method.*



c. Fluorescensmetode II. • *Fluorescence method II.*

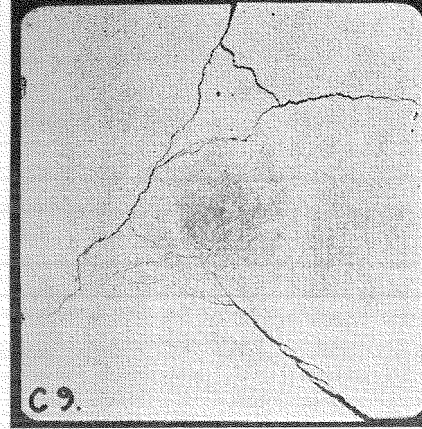


d. Mikroskoperingsmetoden. • *Microscopic method.*

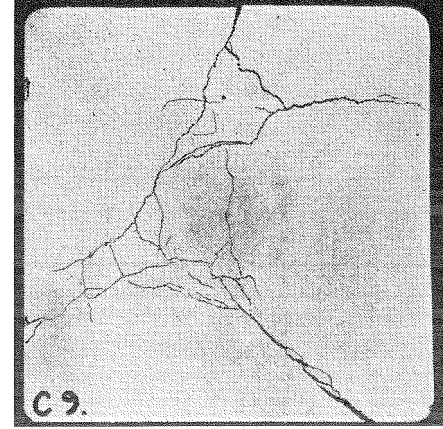
Fig. 4. Revneforløb i mørtelprøvelegeme C1 konstateret ved de fire metoder. • *Mortar test specimen C1. Crack patterns observed by means of the four methods used in these tests.*

og $\frac{R_F \cdot 100}{R_M}$ er sammen med de tilsvarende variationskoefficienter, V , anført i tabel 5.

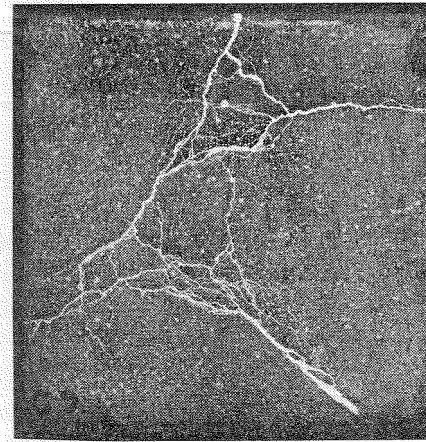
De i tabel 5 anførte middelværdier er affildet i histogramform i fig. 6 a, 6 b og 6 c. I de 3 figurer er indtegnet en linie, der afgrænser observationsområdet; denne linie svarer til de mikroskopiske observationer og angiver således pr.



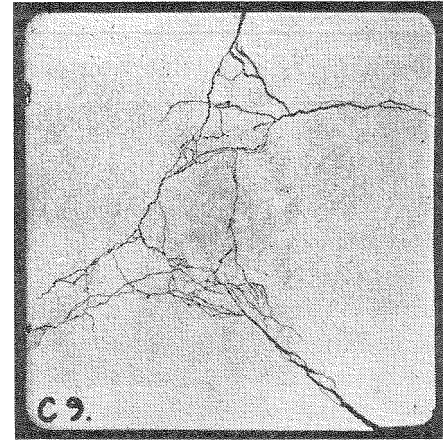
a. Den visuelle metode. • *Visual method.*



b. Xylolmetoden. • *Xylol method.*



c. Fluorescensmetode II. • *Fluorescensmethod II.*



d. Mikroskoperingsmetoden. • *Microscopic method.*

Fig. 5. Revneforløb i mørtelprøvelegeme C9 konstateret ved de fire metoder. • *Mortar test specimen C9. Crack patterns observed by means of the four methods used in these tests.*

definition for klasserne 2—10 den faktiske revnelængde. Om de for mikroskoperingsmetoden anførte 100 % af den faktiske revnelængde i klasse 2 (5—10 μ) er helt i overensstemmelse med de virkelige forhold, kan gøres til genstand for diskussion, idet længden af alle ved mikroskoperingsmetoden konstaterede revner med vidde $< 10 \mu$ er medregnet i denne klasse; sandsynligvis er dette dog ikke meget ukorrekt, idet man efter laboratoriets erfaringer mikroskopisk

Prisme	Revnevidde-klasse									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C 1	0,0	12,7	8,5	3,3	4,4	6,2	10,5	2,3	0,5	0,0
C 2	0,0	15,7	7,2	9,4	2,0	1,7	2,7	13,7	0,2	0,0
C 3	0,0	16,0	6,9	5,5	8,0	11,9	5,4	0,4	0,9	0,4
C 4	0,0	6,6	1,4	2,3	4,1	5,4	2,8	7,2	1,3	0,0
C 5	0,0	13,4	10,2	4,9	5,9	9,5	2,4	0,8	1,0	0,0
C 6	0,0	12,8	5,8	2,9	6,9	8,8	7,1	4,5	0,8	0,0
C 7	0,0	8,7	7,4	4,5	7,2	9,5	9,0	0,0	0,0	0,0
C 8	0,0	11,3	6,3	2,9	3,3	6,9	3,9	13,0	2,8	1,2
C 9	0,0	15,8	7,6	5,1	10,8	6,8	8,7	3,9	2,4	1,4
C 10	0,0	8,3	0,6	2,6	1,9	1,9	7,1	0,0	0,0	2,0

kan observere revnevidder $> 5 \mu$ med god sikkerhed, mens revnevidder $< 5 \mu$ kun observeres under gunstige omstændigheder. I klasse 1 er i overensstemmelse hermed for mikroskoperingsmetoden angivet 0 %, og for revnevidder $< 5 \mu$ gives således ingen referencemetode.

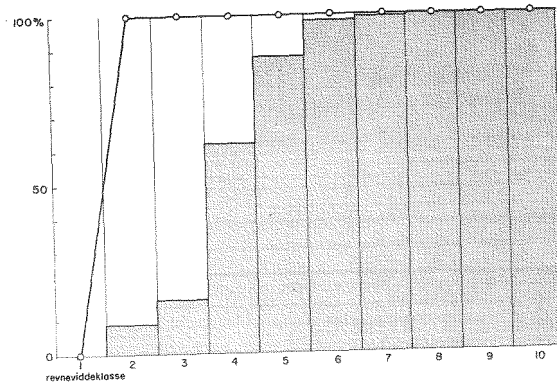
Det fremgår af fig. 6 a og 6 b, at man ved såvel den visuelle metode som ved xylolmetoden med sikkerhed kun har kunnet observere revner, hvis vidde er større end ca. 80μ . Dette tal forekommer ud fra en fysiologisk betragtning stort, idet $10-20 \mu$ i almindelighed regnes at være den nedre grænse for størrelsen af objekter, som kan konstateres visuelt; de her fundne ca. 80μ er sikkert i første række bestemt af revnens udformning, overfladens beskaffenhed og lignende ikke-fysiologiske forhold. Det ses yderligere, at xylolmetoden i forhold til den visuelle metode giver tydeligt forbedrede observationer af fine revner, dog medtages ved begge metoder kun en lille procentdel af revner med vidde mellem 5 og 10μ .

For fluorescensmetode II gælder, at alle revner med vidde $> 5 \mu$ er konstateret og at der her ud over er konstateret en del revner med mindre vidde, hvilket i fig. 6 c er antydnet ved, at der for disse revnevidder er indtegnet en søjle, hvis øvre begrænsning ikke er angivet.

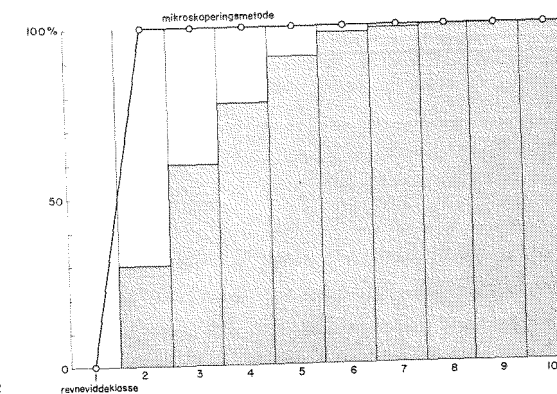
Talmæssige udtryk for usikkerheden på måleresultaterne findes kun for den visuelle metode og xylolmetoden. Variationskoefficienterne, der er angivet i tabel 5, er for de mindste revnevidder meget store for begge metoder, men gennemgående størst for den visuelle metode. Usikkerheden må i første række være knyttet til selve metoderne, men det må tages i betragtning, at antallet af prizmer er relativt lille. Den visuelle metode og xylolmetoden er i modsætning til fluorescensmetode II og mikroskoperingsmetoden følsomme

Fig. 6. Middelværdier af revnelængder i mørtelprøvelegemer målt henholdsvis ved den visuelle metode, xylolmetoden og fluorescensmetode II (fordelt på revneviddeklasserne) i procent af revnelængden målt ved mikroskoperingsmetoden. 100 % angiver den faktiske revnelængde. ● Mean values of the lengths of cracks in mortar test specimens determined by means of the visual method, the xylol method, and the fluorescence method II, respectively, classified according to crack width and expressed in per cent of the length of cracks determined by means of the microscopic method. The actual length of cracks corresponds to 100 per cent.

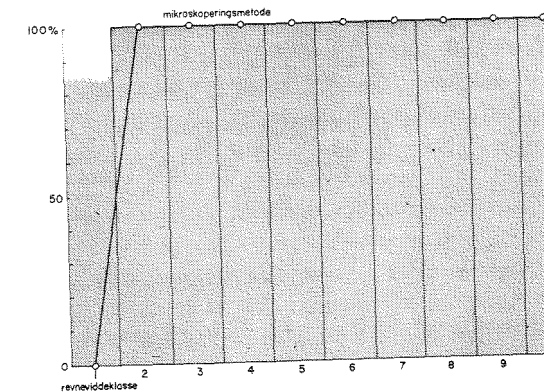
- a. Den visuelle metode. ● Visual method.
- b. Xylolmetoden. ● Xylol method.
- c. Fluorescensmetode II. ● Fluorescence method II.



a. Den visuelle metode



b. Xylolmetoden



c. Fluorescensmetode II

$\left\{ \frac{R_M}{R_M} \right\}$, og variationskoefficienter, V , for revnelængde i mørtelprøvelegemer målt henholdsvis ved den visuelle metode, xylolmetode og fluorescensmetode II (fordelt på revnevidde-klasserne) i procent af revnelængden målt ved mikroskoperingsmetoden

		Revnevidde-klasse									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Visuel metode	$M \left\{ \frac{R_V}{R_M} \right\}, \%$		8,4	15,8	62,0	87,6	98,2	99,5	100,0	100,0	100,0
	V		100,0	79,8	28,7	11,8	3,9	1,7	0,0	0,0	0,0
Xylolmetode	$M \left\{ \frac{R_X}{R_M} \right\}, \%$		29,6	59,7	77,3	91,1	98,2	99,5	100,0	100,0	100,0
	V		55,3	36,2	21,0	9,3	3,9	1,7	0,0	0,0	0,0
Fluorescensmetode II	$M \left\{ \frac{R_F}{R_M} \right\}, \%$	*	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	V		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

* Revnelængden ikke opmålt.

overfor revnernes udformning, og en ulige fordeling fra prøvelegeme til prøvelegeme af tydelige og ikke-tydelige revner indenfor hver gruppe kan således have influeret på spredningen for disse to metoder. Denne antagelse underbygges af, at variationskoefficienterne gennemgående er mindst for xylolmetoden, ved hvilken der sker en tydeliggørelse af revnerne. Imidlertid medfører denne tydeliggørelse, at muligheden for at forveksle andre strukturer med revner stiger. På 8 af de 10 prøvelegemer forekommer ved xylolmetoden tilfælde af forveksling af andre strukturer med revner; ved den visuelle metode er dette kun sket i 1 prøvelegeme. Længden af de fejlagtigt konstaterede revner udgør mellem 0,5 og 2,5 % af den i hvert prøvelegeme ved xylolmetoden målte revnelængde, i eet prøvelegeme udgør den dog 11,0 %. Ved den visuelle metode udgør den fejlagtigt konstaterede revnelængde 2,1 % af den målte revnelængde.

Sammenfatning

Resultatet af de foretagne undersøgelser fremgår af den følgende vurdering af metoderne.

Mikroskoperingsmetoden er efter laboratoriets erfaringer velegnet til kon-

statering af revnelængde i beton, og ikke ganske for konstaterede revnevidder er ca. 5 μ , kun i undtagelsestilfælde får man ikke medtaget revner med vidde over denne værdi. Metoden giver de bedste resultater ved anvendelse på tyndsnit, men kan anvendes på betonoverflader, hvor emnernes størrelse ikke overskrider ca. 15 x 15 x 10 cm. Imidlertid er metoden, og især fremstillingen af tyndsnit, tidsrøvende, ligesom den kun kan benyttes af geologer eller andet specialtrænet personale.

Den visuelle metode er ligesom xylolmetoden nem at anvende, og ved begge metoder konstateres alle revner med vidde større end ca. 80 μ , men en med størrelsen aftagende mængde af fine revner.

Xylolmetoden giver i forhold til den visuelle metode forbedrede observationer af fine revner. Muligheden for at forveksle andre strukturer med revner er tilstede ved begge metoder, men er mest udpræget for xylolmetodens vedkommende.

Fluorescensmetode I er praktisk uanvendelig, idet ikke alle revner med stor vidde konstateres.

Fluorescensmetode II vil i mange tilfælde kunne anvendes i stedet for mikroskoperingsmetoden, idet alle revner, som konstateres mikroskopisk, også kan observeres ved denne metode. At der tillige konstateres revner med vidde mindre end 5 μ kan gøre metoden usikker, for så vidt det ikke vides, om alle revner mindre end denne værdi medtages. Usikkerheden kan imødegås ved en fornuftig fortolkning af revnebillederne. Da revneforløbet fremtræder skarpt og hver revne fremtræder med en bredde, der omtrent er lig med revnevidden, vil fortolkningen kunne foretages, uden at metoden får præg af at være subjektiv, når rutinen er indarbejdet. Fluorescensmetode II er fortrinsvis velegnet på snitflader eller på glatte overflader.

Summary

This paper deals with the development of methods for detection and measurement of cracks in concrete surfaces. Four methods are described and discussed, viz., inspection of cracks with the naked eye (visual method), accentuation of cracks by wetting the surface with xylol (xylol method), and recording of cracks by means of fluorescent oil or particles (fluorescence method I and II). The results obtained by means of these methods are compared with those of studying and measuring cracks with the microscope. It is shown that the fluorescence method in its original form is not reliable. In an improved form it is shown to reveal the same number of cracks as that which can be seen with the microscope, and in addition some cracks whose width (< 5 μ) is smaller than that which can normally be detected with the