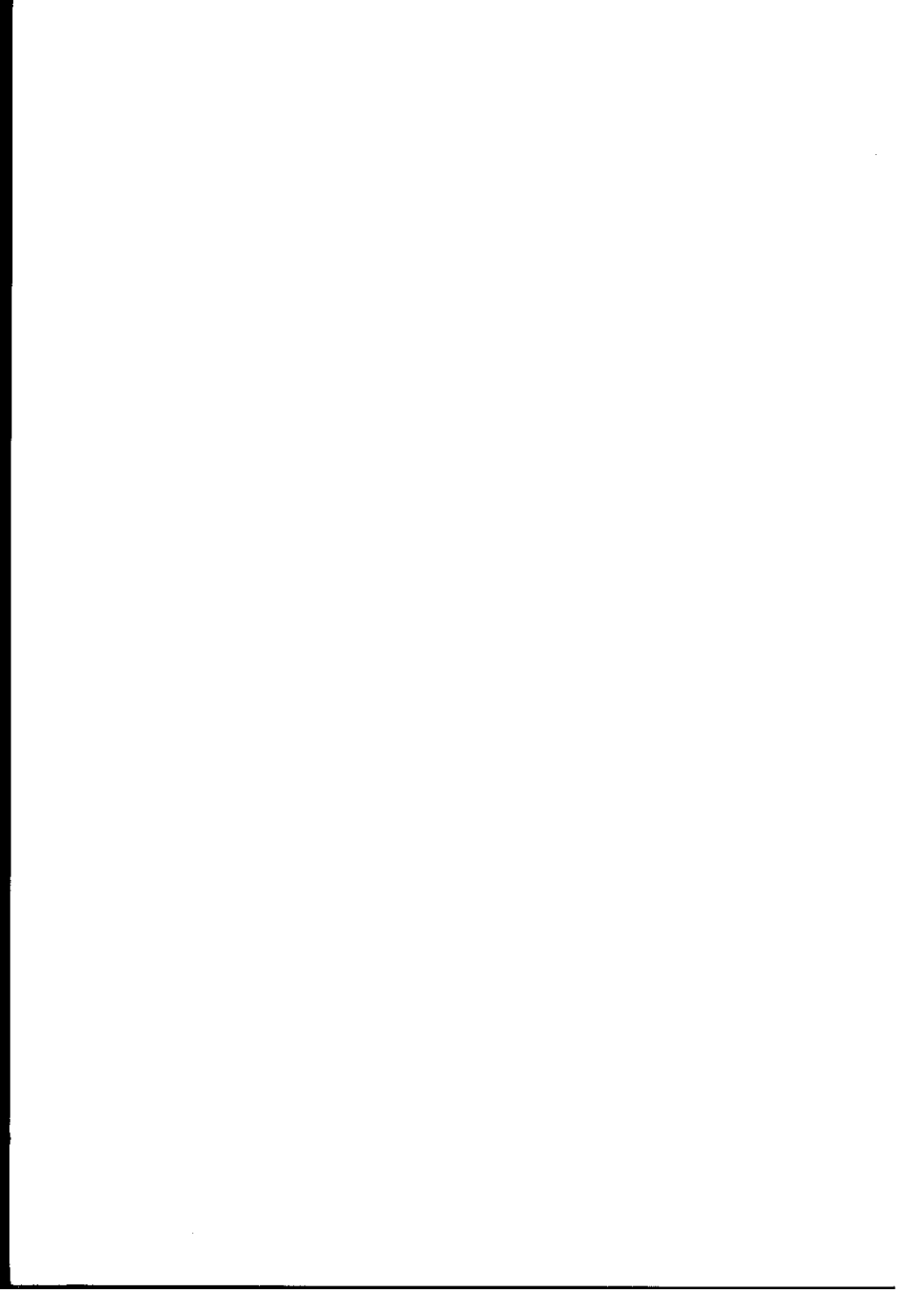


DBF

PRØVNINGSMETODER FOR BETON

Indlæg på møde 1.3.1978

**PUBLIKATION 4:1978
DANSK BETONFORENING**



DANSK BETONFORENING

PRØVNINGSMETODER FOR BETON

KØBENHAVN, november 1978

FORORD

Forfatterne til artiklerne i nærværende publikation har udarbejdet deres bidrag på grundlag af foredrag holdt ved et møde i Dansk Betonforening med fællestitlen: "Prøvningsmetoder for beton". Mødet afholdtes den 1. marts 1978 i København.

INDHOLD	Side
Ulf Bellander BETONSTYRKER I KONSTRUKTIONER	5
P. Kierkegaard-Hansen LOK-TEST	7
S. Borgselius FORSØG MED LOKTEST	17
Erik Trudsøe BETONKVALITET MÅLT VED RESONANSFREKVENNS	23
Preben Christensen, Niels Thaulow, Halldor Gudmundsson, Arne Damgård Jensen STRUKTUR- OG BESTANDELSANALYSE AF BETON	39
Ole Andersen GEODÆTISK KONTROL- OG DEFORMATIONS MÅLING	63
Eigil V. Sørensen MÅLING AF BETONS HÆRDNINGSGRAD	75

DANSK BETONFORENING

Cement- og Betonginstituttet, Stockholm

BETONSTYRKER I KONSTRUKTIONER

af

Ulf Bellander

November 1978

Ulf Bellander har ikke udarbejdet noget skriftligt indlæg, men henviser til de 2 sidste dele af værket:

Ulf Bellander: "Hållfasthet i färdig konstruktion"

Del 2: "Uföörstöörande metoder. Litteraturstudie",
CBI forskning-research, nr. 2:77, Stockholm 1977.

Del 3: "Uföörstöörande metoder. Laboratorie- och fältföörsök".
CBI forskning-research, nr. 3:77, Stockholm 1977.

Værket blev den 8. februar 1978 forsvaret for den tekniske doktorgrad på KTH i Stockholm.

DANSK BETONFORENING

Lok-Test ApS

LOK-TEST

af

P. Kierkegård-Hansen

November 1978

INDHOLD	Side
Historisk baggrund	8
Forskning	8
Sammenfatning	13
Litteratur	14

HISTORISK BAGGRUND

I 1959 nedsatte Dansk Ingeniørforening et udvalg til forberedelse af den nye betonnorm DS 411, som udkom i 1975. Udvalget skulle blandt andet komme med forslag til mere tidssvarende kontrolregler. Det virkede imidlertid urealistisk på udvalgets medlemmer at indføre en avanceret statistisk kvalitetskontrol, som kunne tage højde for afvigelser på nogle få procent, når man vidste, at den eksisterende målemetode - knusning af støbte cylindre - kunne give værdier som afveg $\pm 20\%$ eller mere fra betonens styrke i konstruktionen. Man havde naturligvis kendskab til de forskellige målemetoder, som kunne anvendes ved måling på selve konstruktionen, men de var alle indirekte målemetoder, som målte andre egenskaber end styrken.

I juni 1962 fremkom ideen til at skabe et lille lokalt brud ved at udlokke en keglestub af konstruktionen. Eller som ideen egentlig var udformet, belastningen på den lille konstruktionsdel skulle kun øges til den krævede styrke. Hvis der ikke ved denne belastning indtraf brud, var betonen på det sted tilstrækkelig god. Hvis der opstod brud var styrkekravet ikke opfyldt.

FORSKNING

I de forløbne 16 år er der udført en lang række undersøgelser, som har haft til formål dels at verificere sammenhængen mellem lokstyrken og cylindertrykstyrken dels at undersøge, om denne relation ændrer sig, når man ændrer på forskellige variable som f.eks. cementtype, stenstørrelse, hærdebetingelser.

Ved de indledende forsøg, som blev udført først på Danmarks Ingeniørakademis Bygningsafdeling senere på Statens Byggeforskningsinstitut påvistes en lineær sammenhæng mellem lokstyrken og cylinderstyrken [1]. Dette viste, at lokstyrken hverken er en træk- eller forskydningsstyrke men derimod en styrke nært beslægtet med trykstyrken. Den fundne relation var i alle tilfælde uafhængig af cementtypen.

Da det således var påvist, at der virkelig var realiteter i denne nye prøvemethode, bad Dansk Ingeniørforening i 1970 Afdelingen for Bærende Konstruktioner, DtH, om at foretage en officiel prøvning af metoden. Det blev dr. Herbert Krenchel, der kom til at udføre den meget store og meget omhyggelige serie forsøg, som blev sammenfattet i to rapporter [2]. Den af Krenchel fundne relation afviger kun ubetydeligt fra den tidligere fundne sammenhæng, og den er i alle tilfælde uafhængig af forskellige hærdetider og hærdeforhold.

I Stockholm udførte Ulf Bellander i 1974-76, som den første uden for Danmark en tilsvarende undersøgelse med detdaværende Lok-Test udstyr. Bellanders forsøg havde til formål at undersøge kendte prøvemethoders egnethed til vurdering af en betons styrke [3]. Bellander fandt ligeledes en lineær sammenhæng mellem lokstyrken og trykstyrken, men der er her anvendt terninger i stedet for cylindre, hvorfor relationer naturligvis ikke er sammenfaldende med de tidligere fundne linier. Relationen er dog i alle tilfælde uafhængig af største stenstørrelse og hårdebetingelserne. I undersøgelsen foretages en vurdering af metodernes nøjagtighed, idet trykstyrken bestemmes som funktion af de værdier, som fremkommer ved hver af de øvrige målemetoder. Derefter beregnes standardafvigelsen omkring de fundne regressionslinier, og observationernes maksimale afvigelse fra linierne bestemmes. Resultaterne er vist i

Målemetode	Standardafvigelse, residual, MPa	Max. afvigelse fra linien, MPa
Ultralyd	8.0	-19.1, + 12.6
Betonhammer	4.5	-10.3, + 12.3
Lok-Test	3.3	- 7.7, + 6.3
Laboratoriekuber	3.3	
Byggepladskuber	5.7	-10.5, + 11.0

Tabel 1. Sammenligning af forskellige målemetoders nøjagtighed ved måling på vægelementer og dæk.

Selv om alle forsøg viser en lineær sammenhæng mellem lokstyrken og trykstyrken - hvilket som tidligere nævnt klart indikerer, at man med Lok-Test måler en styrkeegenskab nært beslægtet med trykstyrken - er der utallige som har spurgt, om det ikke er trækstyrken, der måles, når man trækker i betonen. Det var derfor et meget vigtigt bidrag til denne diskussion, som Bjarne Chr. Jensen og Mikael Bræstrup fremlagde i 1976 [4]. Ved hjælp af Coulombs brudteori påviser de på teoretisk grundlag, at det virkelig er trykstyrken, som måles, når man udlokker en lille del af konstruktionen.

I 1975 blev de offentlige myndigheder interesseret i metoden. Georg Christiansen fra Statens Vejlaboratorium tog initiativ til et samarbejde mellem DSB, P. L. Avnstrøm, og Vejdirektoratet, H. H. Gotfredsen, der med bistand fra blandt andet Cowiconsult udførte en ny meget stor serie forsøg. Resultaterne herfra er vist i rapporten fra DSB og Statens Vejlaboratorium [5]. Også

I disse forsøg finder man den lineære sammenhæng mellem lokstyrken og cylinderstyrken, og linien ligger kun med en lille afvigelse fra de tidligere fundne linier, hvilket formodentlig skyldes forskelligheder ved måling af cylinderstyrken.

Det sidste eksperimentelle forsøg, som skal omtales, er udført af Poul Erik Poulsen på Danmarks Ingeniørakademi med bistand fra Teknologisk Institut [6]. Formålet med forsøget var at bestemme en konstruktions styrke ved at knuse den og derefter sammenligne denne virkelige styrke med de resultater, man får ved måling med andre prøvemethoder. Konstruktionerne, som blev knust, var søjleelementer med et tværsnit på 30 x 30 cm og en højde på 1 m. Ved disse forsøg fandt man ligeledes den lineære sammenhæng mellem lokstyrken og trykstyrken.

Til vurdering af de enkelte prøvemethoders egnethed beregnedes korrelationskoefficienten mellem den virkelige styrke og resultaterne fra de forskellige målemethoder. Korrelationskoefficienten er som bekendt en størrelse, der udtrykker, hvor god sammenhængen er mellem to sæt målinger. Hvis korrelationskoefficienten er 1, er sammenhængen perfekt, hvis den er 0, er der slet ingen sammenhæng.

I tabel 2 er vist de korrelationskoefficienter, som er op-

Målemetode	Korrelationskoefficient.
Ultralyd	0.50
Betonhammer	0.53
Lok-Test	0.96
Støbte cylindre	0.84
Udborede cylindre	0.92

Tabel 2. Korrelationskoefficienter for måleværdier opnået ved fem forskellige målemethoder set i relation til et konstruktionselements virkelige styrke målt ved knusning af hele elementet.

nået for fem forskellige prøvemethoder. Betydningen af korrelationskoefficienten kan være vanskelig at forstå. Derfor er det måske lettere at vurdere prøvemethodernes økonomiske værdi, når der i det følgende beregnes, hvor mange målinger der skal foretages for at kunne konstatere en styrkeændring på 1 MPa.

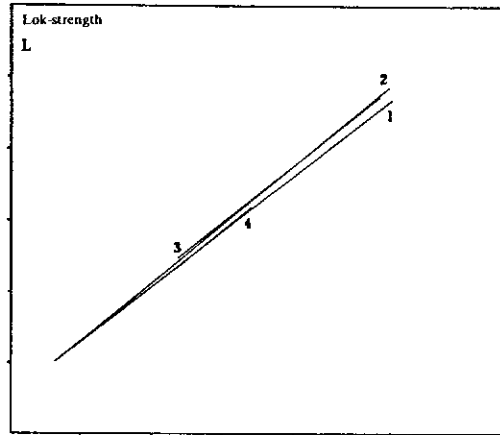
Det antages, at betonen er fuldstændig homogen og i styrkemæssig kontrol ved en styrke på f.eks. 30 MPa. Af en eller anden årsag sænkes styrken 1 MPa. Hvor mange observationer skal der da anvendes, hvis man ved en statistisk test på 5% signifikationsniveau vil være 90% sikker på at opdage denne styrkereduktion på 1 MPa? I tabel 3, er anført de nødvendige antal beregnet på baggrund af data i [6].

Målemetode	Antal nødvendige observationer
Ultralyd	216
Betonhammer	179
Lok-Test	10
Støbte cylindre	32
Udborede cylindre	15

Tabel 3. Det antal observationer som er nødvendige for med rimelig sikkerhed (90%) at kunne konstatere et fald i betonstyrken på 1 MPa.

SAMMENFATNING

Hovedresultaterne fra de 4 store danske forsøgsserier, [1], [2], [3] og [6], kan sammenfattes i en enkelt figur, der viser sammenhængen mellem lok-styrken og betontrykstyrken. Man ser, at der



Figur 1. Resultatet af 4 uafhængige danske forsøgsserier. Liniernes længder angiver de i forsøget benyttede variationer på betonstyrken.

kun er en ubetydelig forskel mellem resultaterne for de forskellige serier, en forskel, der let lader sig forklare i forskelle ved måling af trykstyrken, jfr. f.eks. [7]. Ved omregning af middelstyrken anvendes i praksis formelen

$L_m = 5 + 0.8\sigma'_{bm}$. Den tilsvarende rette linie kan indtegnes på figuren ved at forbinde de to krydser. Ved omregning af karakteristiske værdier anvendes formel $L_k = 4 + 0.7\sigma'_{bk}$, jfr. [8] og [9].

LITTERATUR

- [1] Kierkegaard-Hansen, Peter: "Lok-Strength", Nordisk Betong, nr. 3, 1975, pp 19-28.
- [2] Rapport nr. S 3/69 1970 og 1974: "Lok-styrkeprøvning af Beton", Afdelingen for Bærende Konstruktioner, Danmarks tekniske Højskole.
- [3] Jensen, O. Westermann og Leksø, Steen: "Prøvning af betonkonstruktioners styrke med Lok-Test", Statens Vejlaboratorium, Laboratorierapport nr. 30, december 1976 og DSB, Teknisk Rapport nr. 1, V.7, 1977.
- [4] Bellander, Ulf: "Hållfasthed i färdig"konstruktion", CBI, Forskning 3:77, del 3.
- [5] Jensen, Bjarne Chr. og Bræstrup, Mikael, W:
"Lok-Tests determine the compressive strength of concrete", Nordisk Betong, nr. 2, 1976, pp. 9-11.
- [6] Poulsen, Poul Erik m.fl.: "Ikke destruktiv styrkeprøvning af beton", Teknologisk Institut, Afdelingen for Byggeteknik, 1978.
- [7] Leksø, Steen: "Støbte betonprøvers personafhængighed", Statens Vejlaboratorium, Laboratorierapport nr. 28, 1976.
- [8] Leksø, Steen m.fl.: "Fastlæggelse af beregningsprocedure ved Lok-Test måling", Statens Vejlaboratorium, Interne Notater nr. 77, 1978.
- [9] Leveringsbetingelser og Prøvningsmetoder nr. 10:
"Vejledning i udførelse af styrkekontrol i betonkonstruktioner med Lok-Test udstyr", Statens Vejlaboratorium 1977.

DANSK BETONFORENING

H. Hoffmann & Sønner A/S

FORSØG MED LOK-TEST

Stitunnel ved Tåstrup station

af

S. Borgselius

November 1978

INDHOLD	Side
Enterprisens omfang	17
Beton	17
Kontrol	17
Prøvningsresultater	18
Konklusion	18

Bygværk: Stitunnel til gennempresning under
jernbanen ved Tåstrup Station.

Bygherre og tilsyn: D.S.B.

Entreprenør: H. Hoffmann & Sønner A/S

Betonleverandør: 4K.

Entreprisens omfang.

Entreprisen omfatter støbning af insitu tunneldel nord for jernbanen og to tunneldele syd for jernbanen til gennempresning. Dertil kommer trapper, elevatorskakt m.v.

Beton.

Der er brugt 3 forskellige betontyper i entreprisen. Som noget nyt ved DSB-arbejder er der brugt beton tilsat flyveaske og proportioneringerne er:

Cement	kg	250	225	200
Flyveaske	kg	150	130	150
Vand	l.	170	160	160
Bakkesand	kg	616	595	560
Søarter	kg	0	575	575
Søngødder	kg	0	575	575
Skærver 8-25 mm	kg	1.100	0	0
Plastificering	g/100 kg	200	200	200
Luft	%	4-6	4-6	4-6
Trykstyrke σ_{bk}	MN/m ²	25	20	15

Kontrol.

Modtagekontrollen omfattede måling af sætmål og luftindhold samt udstøbning af prøveemner i 15 x 30 cylindre. Derudover blev det aftalt med DSB, at H. Hoffmann & Sønner A/S monterede Lok-bolte for at lave sammenlignende forsøg med henblik på senere brug af Lok-test på byggepladsen.

Prøvningsresultater.

Det viste sig at være meget svært at opnå det krævede luftindhold på 4-5%, og det meste af betonen har haft et luftindhold på ca. 2%.

Udtrækningen af lok-boltene er foretaget af Statens Vejlaboratorium, hvorfra rapporten indeholdende prøveresultaterne kan rekvireres.

Resultaterne af modtagekontrollen og trykprøvningen er vist på side 20, hvor også resultaterne af fabrikskontrollen er vist.

KONKLUSION.

Hvis man vælger at bruge Lok-Test til styrkekontrol på byggepladsen, skal man være klar over, at det er den udstøbte beton der bliver kontrolleret i modsætning til traditionel betonkontrol, hvor det er den leverede beton der kontrolleres.

Det var ikke i alle tilfælde muligt at lave Lok-kontrollen i Tåstrup, idet det ville genere arbejdet på andre områder og der var nogle Lok-bolte der måtte opgives for ikke at sinke arbejdet. Det vil derfor være nødvendigt med en nøje planlægning allerede på projekteringsstadiet, hvis Lok-test skal bruges.

Selve monteringen skal være meget omhyggelig og boltene bør så vidt muligt monteres vandret. Ved montering ovenned som "flydende" bolt vil der som regel opstå lunger under monteringspladen, hvorved der ved prøvningen kan ske fejlbrud og dermed stor spredning i de enkelte resultater.

Der vil endvidere som regel opstå et slamlag af varierende tykkelse i oversiden af betonen, hvilket også kan give variationer i prøvningsresultaterne.

Ved den lodrette montering er det reelt ikke den udstøbte beton der kontrolleres, idet boltene først monteres efter udstøbningen, hvorefter bolten vrikkes ned i betonen.

Den vandrette montering kan udføres inden udstøbningen og der skal helst bruges en monteringsplade, så bolten bliver siddende rigtigt under støbearbejdet. Et afvigende resultat kan dog skyldes at man med stavvibratoren har slået bolten løs eller skæv.

Ved brugen af Lok-test kan der opstå problemer mellem entreprenør og betonleverandør og det vil være klogest at aftale proceduren mellem tilsyn, leverandør og entreprenør inden arbejdet startes op.

Fabrikskontrollen og Lok-kontrollen er 2 vidt forskellige metoder til kontrol af betonens styrke, der hverken kan eller må sammenlignes direkte. Hvis der udelukkende bruges Lok-kontrol på arbejdspladsen, har entreprenøren en mulighed for at skærpe kontrollen m.h.t. luftindhold, sætmål og runvægt m.v.

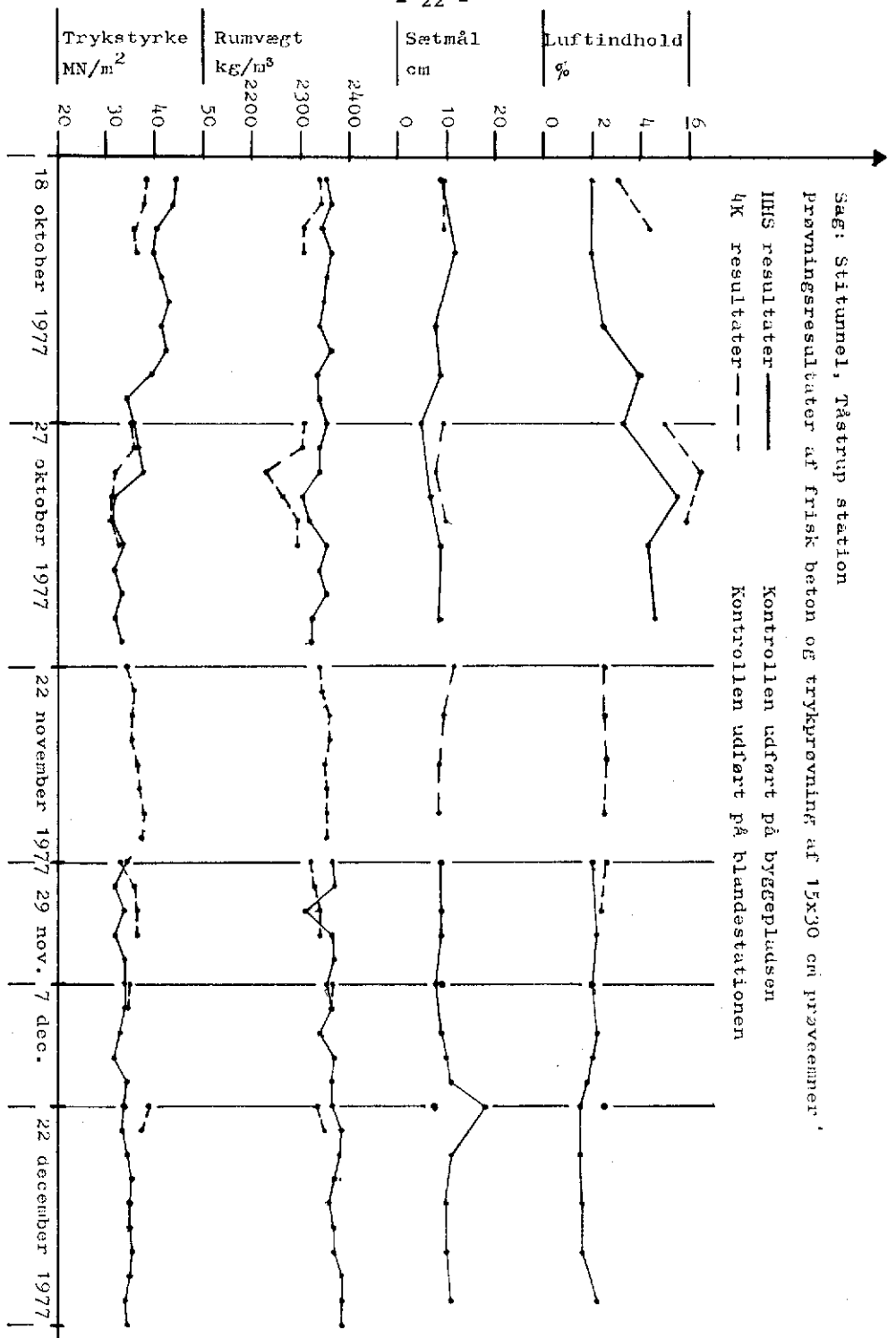
Hvis der er forskel på udstøbningskvaliteten, vil det vise sig på Lok-resultaterne og det er nemmere at forklare medarbejderne på arbejdspladsen, at de skal være omhyggelige med udstøbningen og vibreringen af den leverede beton, når prøvningen foregår på byggepladsen fremfor at komme med et stykke papir med nogle trykprøvningsresultater.

Af hensyn til arbejdsprogrammet bør Lok-boltene tillades trukket efter f.eks. 14 dage og der bør af hensyn til betonens modning laves kontrol med temperaturforløbet i konstruktionen enten v.h.a. Maturity computer eller indstøbte ledninger i konstruktionen som kan forbindes med et eller flere termometre.

Styrkekontrol med Lok-test er sandsynligvis ikke mindre rigtig end udstøbning af prøvecylindre, hvis man vel at mærke betragter resultaterne som et hele og ikke som enkeltværdier.

Hvis der udstøbes prøver på fabrik og byggeplads af samme sats, vil der p.g.a. transporttiden, vind og vejr m.v. være forskel i resultaterne af de udstøbte prøvecylindre. Selv hvis to forskellige personer udstøber prøvecylindre af samme sats på samme tidspunkt, vil der være forskel i prøveresultaterne. Dette emne er nærmere behandlet i Statens Vejlaboratoriums rapport om udstøbte betonprøvers personafhængighed.

Betonnormens tekst er ikke helt entydig m.h.t. betonkontrollen, hvilket giver mulighed for individuel tolkning af normens tekst, hvorfor de der kontrollerer betonen med rette kan hævde, at normen er fulgt.



DANSK BETONFORENING
DANMARKS INGENIØRAKADEMI
Bygningsafdelingen

BETONKVALITET MÅLT VED RESONANSFREKVENS

af

Erik Trudsø

INDHOLD	Side
BETONKVALITET MÅLT VED RESONANSFREKVENNS	23
Virkemåde og betjening	23
Beregning af elastiske konstanter og lydhastighed samt dæmpning	27
Målemetodens anvendelsesområde	32
Litteratur	35

BETONKVALITET MÅLT VED RESONANSFREKVENS

Betonkvalitet kan betyde dels selve materialets egenskaber, dels det fremstillede emnes dimensionsnøjagtighed. Når man måler resonansfrekvenser af et betonemne, afhænger måleresultatet både af materiale og af dimensioner. Hvis man derfor kender materialet godt nok, kan man muligvis slutte sig til tykkelse eller længde af bygværksdele, som man måske ellers ikke kan komme til at måle direkte på. Denne mulighed vil vi se på senere; først skal vises, hvordan metoden afslører egentlige materialeegenskaber hos prøvelegemer af kendte dimensioner.

Under målingen er de virksomme materialeegenskaber

1. massefylde ρ ,
2. dynamisk stivhed E ,
3. indre dæmpning σ og
4. Poisson's forhold ν .

Af disse egenskaber frembyder almindeligvis kun de 3 sidste et måleproblem. Vi ser først på en helt konkret måleopstilling og betragter derefter måleresultater og fortolkning af disse.

Virkemåde og betjening

DIAB's opstilling til at måle E_d og logaritmisk dekrement δ har efterhånden nået en ret tilfredsstillende udformning.

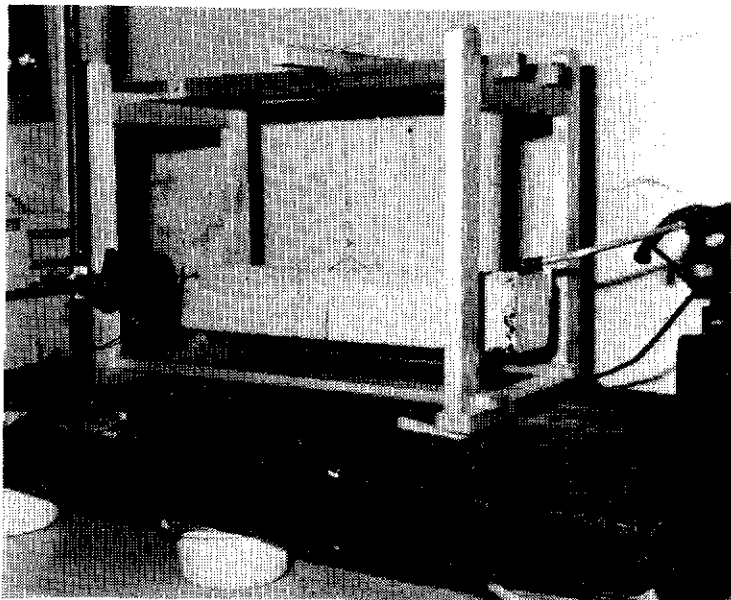


Fig. 1.

På figur 1 ses et betonprisme, som underkastes en resonansfrekvensmåling. Prismets dimensioner er $10 \times 10 \times 60$ cm, og det hænger i en galvaniseret ståltråd, der er 1 mm tyk og snoet 2 gange rundt om prismets midte. Ståltrådens dobbelte overpart er fastgjort til et træstativ, der selv står på en stærkt dæmpet grundplade, som vejer 60 kg og er limet sammen af bløde træfiberplader omkring indpressede armeringsjern. Fra omgivelserne er denne plade isoleret ved at hvile på 6 håndboldblærer, hver i sin plastskål. Egenfrekvensen ligger under 10 Hz.

Prismet bringes i tvungne svingninger af en vibrator (Brüel & Kjør "minishaker", type 4810), der er forbundet mekanisk med prøvelegemet ved hjælp af et tyndvægget messingrør, som er fastspændt til hjørnet af prismet med en pålimet messingholder. Med denne anordning kan prismet bringes til at foretage vridningssvingninger om sin længdeakse og tillige bøj-

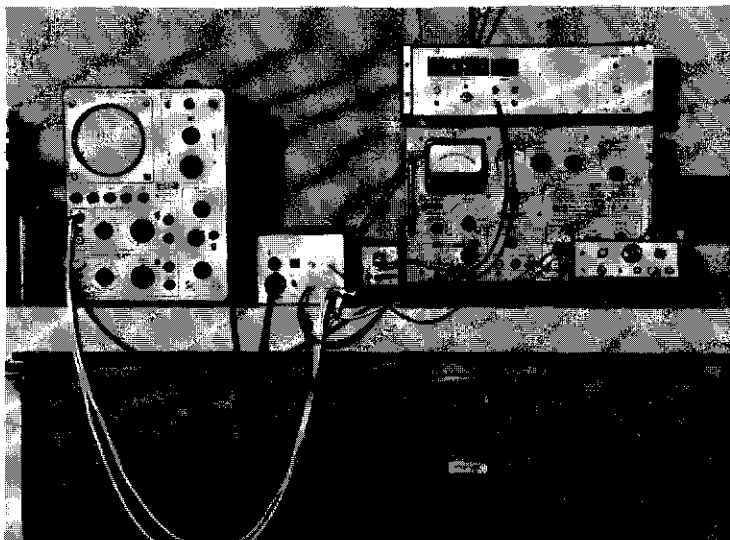


Fig. 2.

ningssvingninger i det vandrette plan. Det er også muligt at lade vibratoren angribe prismet aksialt, så det kommer i længdesvingninger.

I figurens højre side ses en pick-up af den elektrodynamiske type, fabrikat "Ortofon". Den hviler med sin safirspids direkte på betonprismet og holdes i ethvert tilfælde orienteret efter prismeoverfladens udsvingsretning ved den pågældende svingningsart. Alternativt anvendes også et Brüel & Kjør accelerometer.

Vibratoren drives af en tonegenerator med kraftforstærker, som på figur 2. Frekvens og amplitude reguleres kontinuerligt, og frekvensen aflæses på en Grundig Universal Zähler, UZ 144. Det elektriske signal fra pick-up'en er proportionalt med prismets lokale udsvingshastighed. Det føres gennem en transformator til et rørvoltmeter og et oscilloskop, se figur 2. En resonansfrekvens for det svingende system kende-

tegnes ved maksimal hastighedsamplitude for given kraftpåvirkning og opsøges ved regulering af tonegeneratoren under samtidig iagttagelse af rørvoltmeter eller oscilloskop. Rørvoltmeteret findes i Radiometer Wave analyser, type 4810, som tillige indeholder et filter og en tonegenerator.

Dæmpningen måles ved den afvigelse fra en opsøgt resonansfrekvens, der under uforandret kraftpåvirkning lader hastighedsamplituden reducere til brøkdelen $\frac{\sqrt{2}}{2}$ af dens værdi ved resonansfrekvensen.

Såfremt man ikke kender den omtrentlige beliggenhed af prismets grundfrekvenser ved de tre svingningsarter, kan det være påkrævet at konstatere samtlige resonansfrekvenser inden for et stort frekvensområde. Derved bliver det i reglen muligt at fastslå enhver af de fundne svingningers art samt at identificere svingningens "modus", dvs. dens beskaffenhed som grundsvingning eller oversvingning af en eller anden orden.

Ved oscilloskopets hjælp konstaterer man bl.a. subharmoniske frekvenser. Antallet af "sløjfer" i den tilhørende Lissajous-figur er som bekendt udtryk for, hvor mange udsving prøvelegemet gør for hvert udsving af drivsystemet. En grundfrekvens kendes derfor bl.a. på, at den fremgår ved multiplikation af en subharmonisk frekvens med det iagttagne antal "sløjfer". Ved prizmer af et lidet dæmpet materiale kan man ofte iagttage subharmoniske frekvenser fra halvdelen og helt ned til en femtedel af grundfrekvensen.

Når en grundfrekvens er konstateret, kan svingningens art identificeres ved dens knudeplan-beliggenhed. Bøjningssvingningen har to knudeplaner, teoretisk i en afstand fra endefladerne på 0.224 gange prismelængden, medens længde- og vridningssvingningerne har eet knudeplan - midt mellem endefladerne. Den indstillelige pick-upbærer (se figur 1) muliggør hurtig flytning og omorientering af pick-up'en og dermed bekvem lokalisering af knudeplanerne.

Til yderligere kontrol af grundfrekvensernes identitet anvendes oversvingningsfrekvenserne, som ved længde- og vridnings-

svingninger udgør hele multipla af grundfrekvensen. Det teoretisk rigtige forhold mellem bøjningssvingningernes over- og grundfrekvenser afhænger derimod af prismets dimensioner, se nærmere /1/.

Beregning af elastiske konstanter og lyd hastighed samt dæmpning

På basis af grundfrekvenserne for de tre svingningsarter kan man beregne følgende elastiske konstanter for materialer i et prisme eller en cylinder:

den dynamiske elasticitetskoefficient for sammen-trykning E_d ,

den dynamiske elasticitetskoefficient for forskydning G_d - og

den dynamiske værdi af Poisson's forhold ν .

Beregningens teori går tilbage til Lord Rayleigh, men er udbygget ved bidrag fra senere forskere, således som beskrevet i de to skrifter /1/ og /2/, hvorfra de følgende beregningsformler er hentet; heri betegner w prøvelegemets vægt og f_0 grundfrekvensen, medens indices l , b og ν refererer til svingningsarterne.

Ud fra længdesvingningens grundfrekvens f_{0l} kan E_d beregnes ved ligningen

$$E_{dl} = D \cdot W \cdot f_{0l}^2, \quad (1)$$

hvor i faktoren D afhænger på følgende måde af tyngdeaccelerationen g , prøvelegemets længde l , arealet A og den polære inertiradius k af dets tværsnit samt Poisson's forhold:

$$D = \frac{4 \cdot l}{g \cdot A} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\pi^2 \cdot \nu^2 \cdot k^2}{l^2}} \quad (2)$$

For et rektangulært prisme med tværdimensionerne t og w er

$$k = \sqrt{\frac{t^2 + w^2}{12}}, \quad (3)$$

medens en massiv cylinder med diameter d har

$$k = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot d \quad (4)$$

E_d kan også beregnes på basis af bøjningssvingningens grundfrekvens f_{ob} og følger da af ligningen

$$E_{db} = C \cdot W \cdot f_{ob}^2, \quad (5)$$

hvor C er en dimensionsafhængig faktor. Da C bestemmes ved hjælp af formler, som er adskilligt mere komplicerede end ovenstående udtryk for D , skal der blot henvises til formler og kurver i /1/. Som en vigtig parameter optræder her forholdet $\frac{r}{l}$ mellem en inertiradius r for tværsnittet af prøvelegemet og dets længde. Til forskel fra den polære inertiradius k hører r til en neutralakse i tværsnittet, nemlig den som er vinkelret på bøjningssvingningens plan. Ved kvadratiske og cirkulære tværsnit antager r værdien $\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot k$.

Blandt forudsætningerne for bestemmelsen af C og D indgår kendskab til Poisson's forhold ν , der imidlertid ikke altid kendes, men i hvert fald kan antage værdier mellem 0 og 1/3. Heri består der en usikkerhed, som ifølge (1) og (5) overføres på den dynamiske elasticitetskoefficient, uanset ved hvilken af de to svingningsarter den pågældende resonansfrekvens er målt.

Såfremt omstændighederne i øvrigt motiverer en vidtdreven nøjagtighed, kan det være påkrævet først at beregne E_d foreløbigt på basis af en skønnet ν -værdi for dernæst at bestemme ν nøjagtigere ved at indsætte den foreløbigt fundne E_d i den simple ligning (8) - se senere - som sammenknytter ν og E_d med den ad anden vej fundne G_d . Med det således korrigerede ν beregnes en rigtigere værdi af E_d osv. Dog er E_d kun lidt afhængig af ν , hvad der dels gør den iterative proces stærkt konvergent, dels gør den overflødig i de fleste praktisk forekommende tilfælde. For beton kan den dynamiske værdi eksempelvis godt variere mellem 0.15 og 0.32, alt efter alder, sammensætning, vandindhold m.m., se /3/.

Såfremt man fejlagtigt ansætter ν til $1/6$ i stedet for en eventuel korrekt værdi på $1/3$, indføres der en fejl på ca. 1% af E_{db} ved de omtalte betonprismer. Ved at skønne en mere central udgangsværdi for ν såsom 0.27, kan man uden videre begrænse fejlen på den første bestemmelse til højst ca. 0.5% af E_{db} . For det samme prisme betyder indsættelsen i (2) af $\nu = 1/6$ i stedet for $1/3$ kun en ændring på ca. 0.37% af E_{d1} , og den eventuelle fejl kan altså almindeligvis reduceres til højst ca. 0.2% ved valg af en rimelig udgangsværdi.

Ved dobbeltbestemmelse af E_d for et prøveprisme fandtes følgende gennemsnitsværdier:

$$\begin{aligned} E_{db} &= 673.000 \text{ kg/cm}^2 \text{ og} \\ E_{d1} &= 682.000 \text{ kg/cm}^2, \end{aligned}$$

altså en indbyrdes afvigelse på ca. 1.3% eller ca. 0.7% fra de to resultatets gennemsnit. Uvist af hvilken grund er i almindelighed E_{d1} - som her - en smule større end E_{db} .

På tilsvarende måde bestemmes G_d på basis af vriddingssvingningens grundfrekvens f_{ov} , nemlig ved formlen

$$G_d = B \cdot W \cdot f_{ov}^2, \quad (6)$$

hvor i faktoren B bestemmes af

$$B = \frac{4 \cdot l \cdot R}{g \cdot A} \quad (7)$$

Koefficienten R er lig med 1,000 ved et cirkulært tværsnit og lig med 1,183 ved et kvadratisk. Vedrørende R-værdier for prøvelegemer af andre tværsnit henvises til /1/.

I modsætning til E_d er G_d uafhængig af ν , der som omtalt selv kan beregnes ud fra disse to elasticitetskoefficienter - efter formlen

$$\nu = \frac{E_d}{2 \cdot G_d} - 1 \quad (8)$$

De fundne elasticitets- og tværdeformationskoefficienter er materialekonstanter i den forstand, at de principielt er uafhængige af prøvelegemets tilfældige form og kun beror på prøvematerialets beskaffenhed.

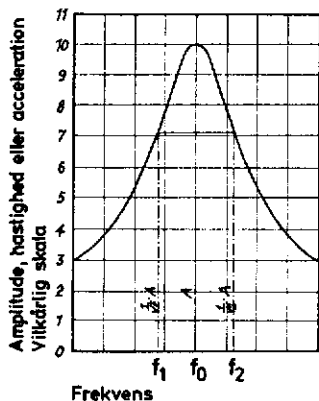


Fig. 3.

Endelig beregnes materialets indre dæmpning i form af det logaritmiske dekrement δ , dvs. med tilnærmelse den relative udsvingsformindskelse, som indtræffer pr. svingning, når det anslåede prøvelegeme klinger af uden ydre dæmpning.

Lad f_2 og f_1 betegne de nærmeste frekvenser over, henholdsvis under resonansfrekvensen f_0 , ved hvilke udsvingshastigheden udgør brøkdelen $\frac{\sqrt{2}}{2}$ af udsvingshastigheden ved f_0 , når drivsystemets kraftpåvirkning i øvrigt er uforandret. Da er

$$\delta = \frac{\pi \cdot (f_2 - f_1)}{f_0} \quad (9)$$

Måling af δ udviser betydeligt større spredning end de elastiske konstanter. Det hænger bl.a. sammen med, at båndbredden $f_2 - f_1$ er en lille differens mellem 2 store tal, og ved lave frekvenser kan man være nødt til at måle frekvenserne over 10 sek. for at få resultatet med en nøjagtighed på 0.1 Hz.

Også ophængningsvilkårene er væsentlige for, at prøvelegemet ikke skal dæmpes nævneværdigt af andet end sin egen indre dæmpning.

Det er forsøg hermed, som har resulteret i den nu udformede ophængning. Herom henvises til /4/, /5/ og /6/.

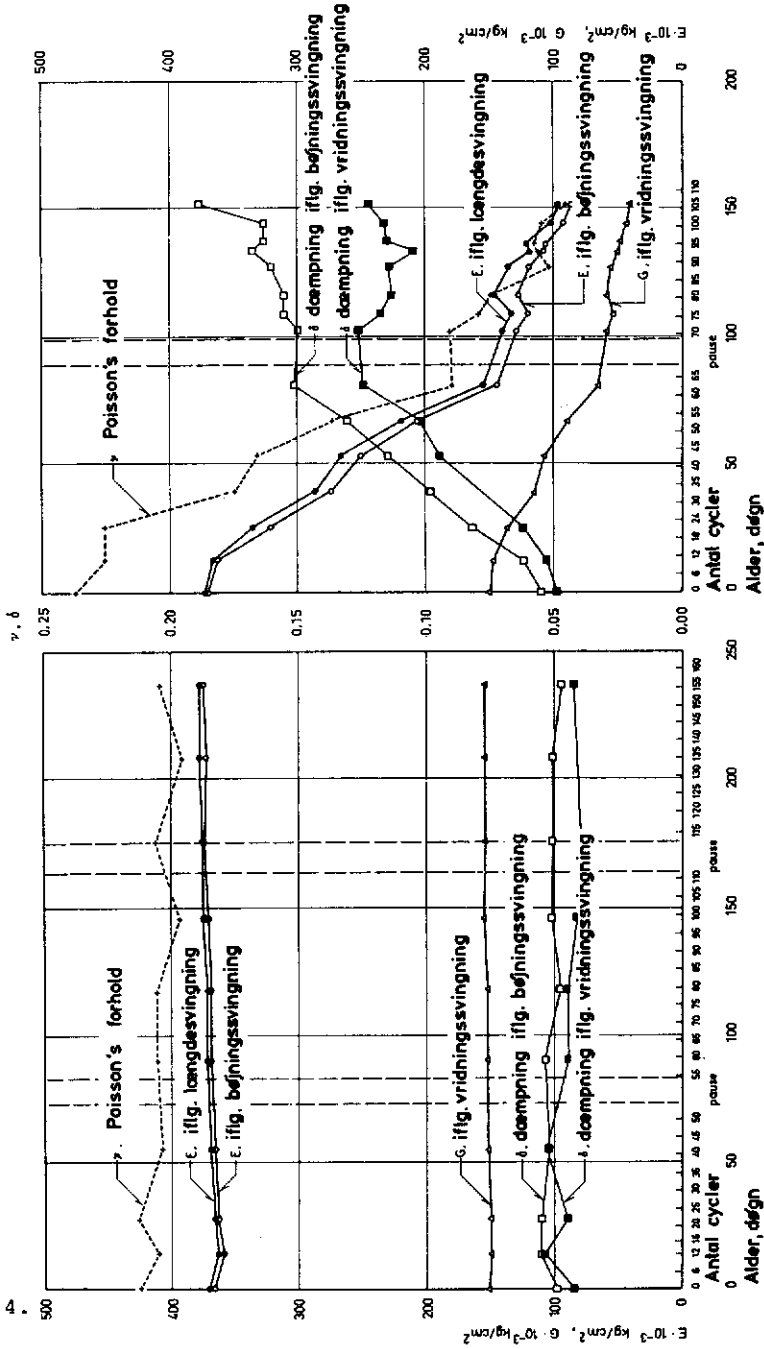


Fig. 4.

Målemetodens anvendelsesområde

En karakteristisk anvendelse af resonansfrekvensmetoden sker overfor prøvelegemer, der underkastes en efterhånden nedbrydende påvirkning, såsom ved gentagne frysninger eller optøninger eller gennem kemiske angreb på materialet.

Fra Alkaliudvalgets arbejde i sin tid stammer figur 4. Man var her interesseret i forskellige betonsorters bestandighed overfor frysning og optøning, og ved hjælp af resonansfrekvensmetoden fulgte man tilstanden hos et større antal betonprismer, efterhånden som antallet af frost- og optøningsomgange voksede /7/.

Til venstre ses måleresultater for et frostbestandigt betonprisme; de dynamiske værdier af elasticitetskoefficienter og Poisson's forhold samt det logaritmiske dekrement er afsat i afhængighed af antallet af frysnings- og optøningscykler. Man ser, hvorledes disse materialeegenskaber er praktisk talt uforandrede endnu efter 155 omgange, medens de på billedet til højre, som angår et ikke-frostbestandigt betonprisme, er forandret meget stærkt allerede efter 40 cykler; således er de dynamiske elasticitetskoefficienter for sammentrykning samt for forskydning aftaget stærkt, ligesom også Poisson's forhold (der jo beror på materialets indre sammenhæng) - medens den indre dæmpning er vokset kraftigt.

Den ikke-destruktive prøvemethodes overlegenhed viser sig her ved sammenligning med det tilfælde, at man i stedet valgte at konstatere gentagne frostbehandlings indflydelse på eksempelvis terningstyrken. I så fald måtte man knuse mindst een terning for hvert enkelt målepunkt af den resulterende kurve; hertil ville kræves meget mere arbejde og materiale, og måleresultaterne ville udvise væsentligt større usikkerhed, bl.a. fordi de knuste terninger ifølge sagens natur ikke kan være identiske.

Det har i øvrigt vist sig, at resonansfrekvensmetoden er den mest følsomme overfor diverse nedbrydende langtidspåvirkninger på beton, såsom fra sulfatangreb og fra kulsyreholdigt

vand /8/. Også betons hærdningsforløb kan forfølges med denne fremgangsmåde.

Vender vi os imod den indledningsvist nævnte mulighed for at konstatere betonemners dimensionsnøjagtighed og tilsvarende, kan først henvises til, at in-situ funderingspæle undersøges for længde og eventuelle revner. Hvorledes dette i enkeltheder går til, fremgår bl.a. af den beretning /9/, som ing. Ole sørensen (Birch & Krogboe) aflagde ved Teknologisk Instituts arrangement "Æmnedage om vibrationsteknik", dec. 1977. Ved hjælp af en kraftig elektromagnetisk vibrator på toppen af pælen sættes denne i længdesvingninger, hvis grundfrekvens og højere resonansfrekvenser opsøges med et accelerometer anbragt samme sted. Svingningsspektret giver da god mulighed for at finde længden af og eventuelt fejl i den nedrammede pæl - undertiden til overraskelse for folk, der havde sat deres lid til ramningsjournalen. Metoden kræver meget elektronisk udstyr, men den er åbenbart på kraftig fremmarch.

Betonvareindustrien stiller jo stedse større kvalitetskrav, eksempelvis til produkter som rør og bygningsdele, der fremtræder med veldefinerede former og dimensioner. Det forekommer rimeligt, at resonansfrekvensmetoder finder indpas her; selv om lyd hastighedsmetoden måske nok synes mest direkte anvendelig, vil passende ophængningsvilkår utvivlsomt gøre det let at sætte sådanne betonemner i veldefinerede resonanssvingninger. Afvigelser fra normale forløb af sådanne spektre kan da afsløre enten materialefejl eller revner eller dimensionsmangler.

Til slut skal omtales en vigtig mulighed for at bruge resonansfrekvensmåling af betonpladers tykkelse. Hertil kan desværre ikke bruges en tilsvarende "ekko-lod"-metode som ovenfor stålplader eller lignende metalemner; ved disse befinder sender og modtager sig på samme side af emnet; dette er muligt i kraft af, at impulsen reflekteres fra bagsiden og vender tilbage som et detekterbart ekko, hvis tidsforsinkelse i forhold til sendeimpulsen er et mål for en kombination af materialets tykkelse t , stivhed E og rumvægt ρ .

DANSK BETONFORENING

Byggeteknik. Teknologisk Institut

STRUKTUR- OG BESTANDELSANALYSE AF BETON

af

Preben Christensen

Niels Thaulow

Halldor Gudmundsson

Arne Damgård Jensen

November 1978

INDHOLD	Side
STRUKTUR- OG BESTANDELSANALYSE AF BETON	38
Model	38
Data	41
Data fra elektroniske og andre metoder	46
Data indhentet ved accelererede holdbarhedsforsøg	47
Eksempler på anvendelser	48

STRUKTUR- OG BESTANDDELSANALYSE AF BETON

Generelt

En hærnet beton indeholder i sig vidnesbyrd om de anvendte delmaterialer, de anvendte arbejdsmetoder, betonens senere påvirkninger og eventuelle skader. Ved analyse af betonens struktur og bestanddele, under anvendelse af passende metoder og kombinationer af metoder, lader det sig i princippet gøre at dissekere en beton i sine bestanddele, redegøre for dens tilblivelse og kortlægge rækkefølgen af hændelsen opstået i betonen efter dens hærning (f.eks. skader). Under anvendelse af de samme metoder og teknikker lader det sig gøre med rimelig sandsynlighed at bestemme kvaliteten af en relativt frisk udstøbt beton, og derudfra forudsige holdbarheden ved sammenligning med en idealiseret model, og ved sammenligning med det eksisterende erfaringsgrundlag, der naturligtvis til stadighed må udbygges, justeres og forbedres.

Struktur- og bestanddelsanalyse er således både et værktøj til styring og kontrol af den frisk udstøbte beton, og et værktøj til skadesudredning for gammel beton.

Model

Skadet beton

Årsagen til at en beton underkastes analyse efter disse metoder er i reglen, at den er så revnet, at der begynder at opstå frygt for konstruktionens sikkerhed. For at tilrettelægge en hensigtsmæssig reparation, er det vigtigt at klarlægge skadesårsagen og fjerne de grundlæggende årsager, idet skaderne ellers blot vil opstå igen. Der er brugt megen tid på at klarlægge hovedårsagen til skaders opståen, men det er vigtigt at erkende, at der i de sjældneste tilfælde kan peges på een og blot een årsag, i alt fald når betonkonstruktio-

onen har været udsat for naturens og menneskenes nedbrydende kræfter i mere end een vinter. Det er også vigtigt at erkende, at beton er thermodynamisk ustabil under de tryk-temperaturomstændigheder, der hersker i konstruktionen, og derfor skal forvitre. En holdbar beton er derfor en beton, der er fremstillet på en sådan måde, at forvittringshastigheden ned sættes til et rimeligt niveau.

Holdbar beton

Ved vurdering af en betons forventede holdbarhed sammenlignes med en model:

En holdbar beton består af et velfordelt system af gode tilslagsmaterialer i en tæt, velhydratiseret cementpasta. Betonen skal indeholde et indblandet luftporesystem med bestemte karakteristika. Betonen skal være uden revner, kemiske omdannelser etc. Den skal være velkomprimeret og skal kunne modstå definerede påvirkninger.

Enhver afvigelse fra denne model fortolkes negativt med hensyn til holdbarhed.

Analysemetoder

I princippet måles og vurderes struktur- og bestanddelsparametre visuelt under anvendelse af optiske metoder og apparatur spændende fra øjet over lup til optiske mikroskoper med op til 600x forstørrelse. Observationerne suppleres efter behov med scanning elektronmikroskop-undersøgelser, op til 20.000x forstørrelse, samt med røntgenografiske og kemiske metoder, der muliggør kvantitative bestanddelsbestemmelser fra hele prøveemnet til et volumen mindre end een μm^3 .

En række andre metoder til anvendelse under specielle omstændigheder findes tilgængelige, enten på Teknologisk Institut eller i laboratorier, hvormed Byggeteknik samarbejder, og bringes i anvendelse efter behov.

Undertiden suppleres analyserne med accelererede holdbarhedsforsøg.

Præparater

Det er umiddelbart klart, at betonen skal behandles før analysen på en sådan måde, at strukturen bevares som den var på udtagningsstidspunktet. Dette gælder ned til de mindste dele deri. Det er også klart, at andet end betonens overflade skal

gøres tilgængeligt for inspektion, d.v.s. man skal kunne se betonkonstruktionens indre. Oftest fremstilles præparater af udborede betoncylindre. Til andre formål opskæres laboratoriefremstillede cylindre, fliser eller andet. Enhver af de følgende omtalte analysemetoder kræver specielle præparater. Der anvendes planslib, d.v.s. sløbne og polerede skiver af betonen, hvor overfladen er gjort tilgængelig for inspektion. Planslibene behandles evt. således, at de strukturparametre, der ønskes målt, kan erkendes (kontrastpræpareres). Dette sker enten ved en sortfarvning efterfulgt af spartling med hvid pasta, hvorved luftporer og revner fremtræder hvide på sort baggrund, eller undertiden ved imprægnering af overfladen med fluorescerende stoffer, hvorved porer og revner ligeledes fremhæves. Fluorescensanalyse af planslib anvendes p.t. ikke i Byggeteknik.

Til andre optiske undersøgelser anvendes tyndslib. Et tyndslib er en 20 µm tyk skive af f.eks. beton, der på begge sider er poleret. Betonskiven er klæbet på en glasplade og dækket af et tyndt dækglas. Betonen imprægneres med epoxy tilsat et kraftigt fluorochrom. Dette muliggør analyse i almindeligt optisk polarisationsmikroskop og i fluorescensmikroskop på samme præparat.

De normale tyndslib er ca. 25 x 40 mm og indeholder størrelsesordenen 3000 sandkorn. Analyse af stenfraktionerne fordrer derfor enten specielle tyndslib eller planslib. Tyndslibene er fremstillet op til 15 x 30 cm størrelse. Arbejdstiden for et normalt tyndslib ligger på ca. 1 time. Et planslib fremstilles ligeledes på ca. 1 time. Fremstillingstiden er længere på grund af ventetid med udtørring af prøve og hærkning af platten.

Ved scanning elektronmikroskopi anvendes præparater, hvor overfladen er gjort ledende ved pådampning af kulstof eller guld. Der anvendes brudstykker, planslib eller tyndslib.

De øvrige analysemetoder, der lejlighedsvis anvendes, fordrer speciel præparation, der ikke skal omtales nøjere.

DATA

I tabelform er her redegjort for de data, der kan fremskaffes. Samtidig er vist hvilke analysemetoder og præparater data indhentes fra. Der er grupperet i tre grupper efter metode:

- Lysoptisk metode
 - Elektroniske og andre metoder
 - Accelererende afprøvninger
- Data fra lysoptisk analysemetoder

Analysemetode	Præparater	Data
Visuel inspektion	Borekærner	<u>Tilslag</u>
Lup	Skårne emner	- Type
Stereomikroskop	(Evt. polerede eller præparerede på anden vis)	- Form
		- Orientering
		- Fordeling
		<u>Cementpasta</u>
		- Cementtype (grå, hvid, slagcement)
		- Pastafordeling
		- Karbonatisering (dybde)
Alle data er kvalitative		<u>Porer</u>
		- Form
		- Fordeling
		- Art (indblandet, indkapslet)
Forstørrelsesinterval 1-60 x.		<u>Revner</u>
		- Fordeling
		- Orientering
		<u>Andet</u>
		- Kemiske reaktioner
		- Geludfældninger
		- Vurdering af betonens overflade
		- Armering

Analysemetode	Præparater	Data
<p>Automatisk mikroskopi</p> <p>Alle målinger kvantitative og karakteriseret talmæssigt.</p> <p>Forstørrelse 60 x</p> <p>Opløsningsevne (1,86 μm)</p>	<p>Kontrastpræparerede <u>planslib</u></p>	<p><u>Luftporefordeling</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - % luft total - % luft i porer > 2 mm - Powers afstandsfaktor - Indre specifik overflade - Histogram af porefordeling
	<p>Efter ætsning af cementpasta</p>	<p>Pastavolumen hvorefter v/c tal kan beregnes efter visse supplerende målinger og forudsætninger.</p> <p>Tilslaget kornkurve, kornform samt eventuelle orientering (flydelinier).</p>
	<p>Efter yderligere ætsning af planslibet.</p>	<p>Stenenes kalkindhold</p>
	<p>Fluorescens-imprægnerede tyndslib (20 μm)</p>	<p>Pastavolumen (Pastaporøsitet)</p> <p>Sandets kornkurve, kornform samt eventuelle orientering (flydelinier)</p>

Analysemetode	Præparater	Data
<p>Fluorescensmikroskop</p> <p>Forstørrelse 6-630 x</p> <p>Kvantitative resultater efter behov.</p>	<p>Fluorescens- imprægnerede tyndslib (20μm)</p>	<p><u>Revner</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Mængde - Placering (i tilslag - pasta vedhæftning - andre) - Fordeling og relationer til porer - tilslag eller andet - Bredde - Revnemønster <p><u>Porer</u> (indkapslet og indblandet luft)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Form - Fordeling - Tilslagsporøsitet <p><u>Cementpasta</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Pastaporøsitet (størrelsesorden af v/c tal - homogenitet)

Analysemetode	Præparater	Data
<p>Polarisationsmikroskop</p> <p>Kvantitative data kan opnås ved punkttælling.</p> <p>I reglen kvalitative vurderinger.</p> <p>Forstørrelse 6-630 x</p>	<p>Tyndslib (20 µm)</p>	<p><u>Tilslag</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Type - Form - Porøsiteter - Urenheder (fx lerklumper) - Kemiske reaktioner <p><u>Cementpasta</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Cementtype (Portland-cement, slaggecement, supersulfatcement) - Pastafordeleling - Hydratiseringsgrad, rester af cementkorn - Calciumhydroxid, fordeleling og størrelse - Karbonatisering - Gelimprægneringer <p><u>Porer</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Fordeleling - Størrelse - Udfyldninger med fx <ul style="list-style-type: none"> Ettringit Alkalikiselgel Calciumhydroxid - Fyldningsgrad - Karbonatisering omkring porer - Relationer mellem porer og revner <p><u>Revner</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Større revner - Vedhæftningsrevner - Pastarevner

Analysemetode	Præparater	Data
Polarisations- mikroskop		<ul style="list-style-type: none">- Revnemønstre- Udfyldninger i revner med fx<ul style="list-style-type: none">EttringitAlkalikiselgelCalciumhydroxid- Karbonatisering omkring revner- Relationer til tilslag og porer

DATA FRA ELEKTRONISKE OG ANDRE METODER

Analysemetode	Præparater	Data
Scanning-elektron- mikroskop. Energidispersiv røntgenanalyse Forstørrelse 10.000 x	Brudstykker Planslib Tyndslib Overfladen ledende	Billeder af rumlige forhold Vurdering af krystallisations- forløb Kvantitative grundstofanaly- ser Grundstoffordeling
Røntgendiffraktion	Pulverpræpa- rater	Identifikation af krystalline produkter i tilslag og cement- pasta Kvantitativ måling af calsi- umhydroxid
Højtemperatur- metoder DTA DTG	Specielle	Måling af kemiske reaktioner der følges af varmeoptagelse eller varmeafgivelse
Kemiske metoder	Specielle	Måling af chlorid Måling af sulfat Grundstofanalyser af enhver art
Andre metoder (infrarød absorp- tion) (gaskromatografi) (andet)	Specielle	Diverse

DATA INDHENTET VED ACCELEREREDE HOLDBARHEDSFORSØG

Påvirkning	Metode	Resultat
Fugtig luft	Lagring under definerede temperatur og fugtforhold	Vurdering af risiko for alkalikiselreaktioner (geludfældninger - springere).
Specielle atmosfærer	Efter behov	Bestandighed overfor den pågældende atmosfære
Frost	ASTM C 618 (måling af længdeændring)	Frostbestandighed ved definerede vandmætningsgrader
Frost-tøsalt	Cyklisk påvirkning efter Dobrolobov Romer (måling af expansioner)	Bestandighed overfor kombineret frost-tøsalt
Mættet NaCl ved 50°C	Egen (Måling af expansion) Visuel inspektion	Revner Springere Vurdering af risiko for alkalikiselreaktioner
Vandmætning	RILEM forslag	Muliggør beregning af totalporøsitet samt kapillarporøsitet

Eksempler på anvendelser

Resultater opnået under anvendelse af disse metoder findes eksemplificeret i Vejdirektoratets skrift BETONBROERS HOLDBARHED. Del 1, INDLEDENDE UNDERSØGELSER (1978).

Metoderne har i stort omfang været bragt i anvendelse ved vurdering af skadet beton iøvrigt dels fra Danmark, dels fra Mellemøsten og fra Island.

I kontrolsituationen har især måling af luftporefordeling været anvendt ved en række nyere konstruktioner, især belægninger af beton, men også ved visse brokonstruktioner. Målingerne udføres på ca. 3 døgn gammel beton.

Vurdering af forventet holdbarhed efter disse metoder har været anvendt især til mindre fabriksfremstillede betonemner, f.eks. kantsten.

Der er en stigende tendens til at struktur- og bestanddelsanalyser indgår i betonspecifikationerne som supplement til eller som afløsning for mere traditionelle krav.

Det må sluttelig bemærkes, at anvendelse af disse teknikker ikke nødvendigvis skal anvendes på beton. Teknikkerne tillader vurdering af stort set alle produkter, der lader sig præparere efter disse metoder. Eksempelvis er undersøgt kalkmørtler, epoxy-mørtler, teglsten, fliser og fuger fra svømmehaller samt natursten anvendt som byggemateriale.

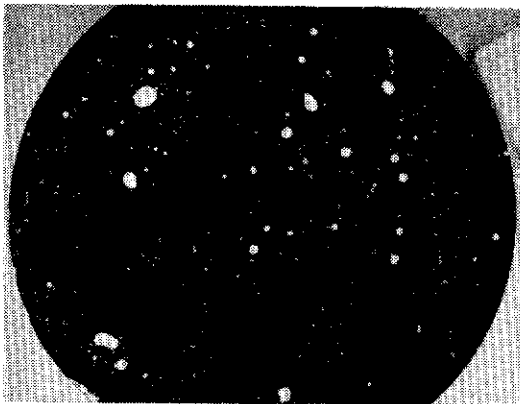


Fig. 1.

Kontrastpræpareret planslib til måling af
luftporefordeling.

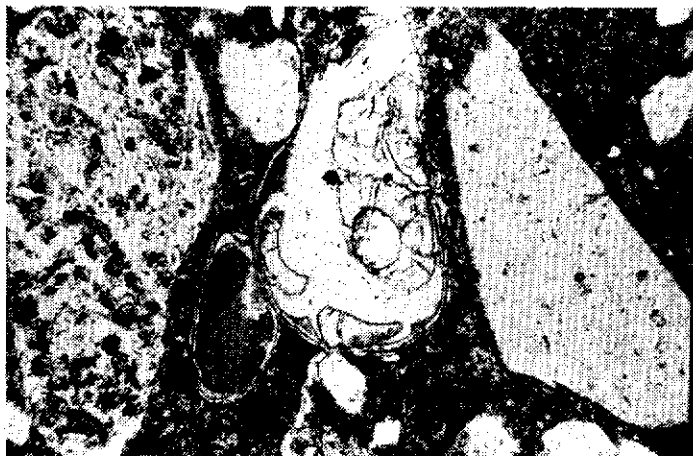


Fig. 2.

Tyndslib (x60) visende en partikel, der totalt er omdannet til alkalikiselgel med svindrevner. Der ses desuden to andre korn af flint, der ikke viser tegn på reaktioner.



Fig. 3.

Tyndslib (x630) visende et C₃S korn omgivet af calciumsilikathydrater, der er zonare (år-ringe).

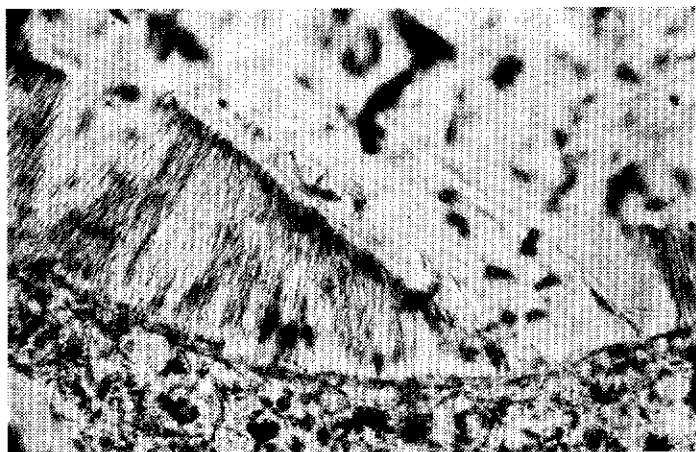


Fig. 4.

Tyndslib (x240) visende den indre væg af en
luftpore, der delvis er udfyldt af plade-
formet calciumhydroxid, delvis af fibrøs
ettringit.



Fig. 5.

Tyndslib (x60) visende to luftporer totalt udfyldt af pladeformet calciumhydroxid og ettringit i neg.

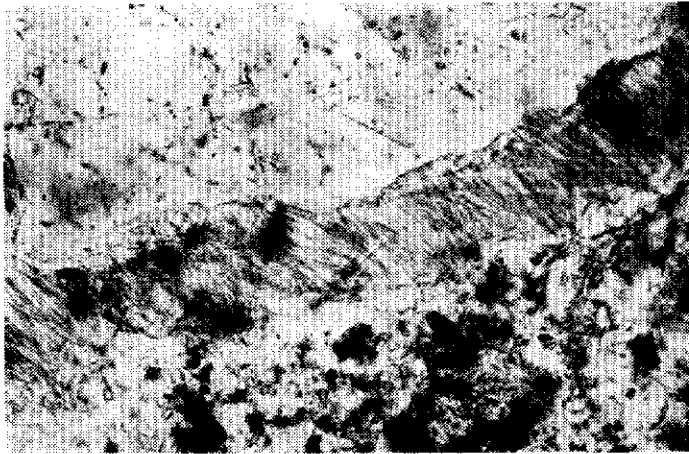


Fig. 6.

Tyndslib (x60) visende en revne, der er på grænsen mellem et klart kvartskorn og cementpasta. Reynen er udfyldt af fibrøs ettringit, der er vokset i revnen, fordi der var plads dertil. Revnen er ikke forårsaget af krystalvækst.



Fig. 7.

Scanning elektronmikrofoto af porer. Den ene to-
talt udfyldt af ettringit, den store delvis be-
vokset af ettringit på væggen. En revne i cement-
pastaen ses.

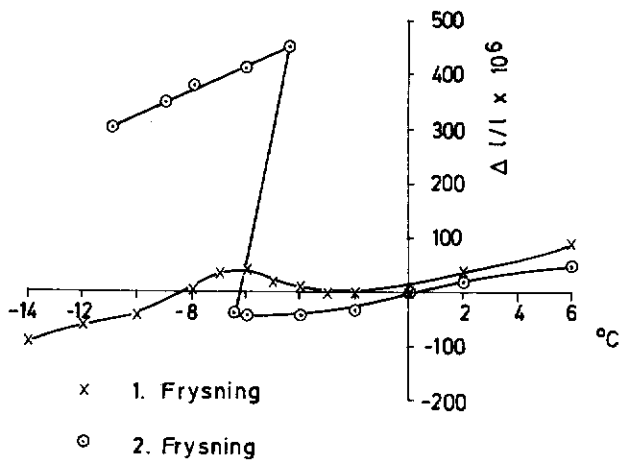


Fig. 9.

Måling af cementmørtels frostbestandighed efter ASTM C 618. Mørtelen viser expansion ved -6 °C inde i prøveemnet.

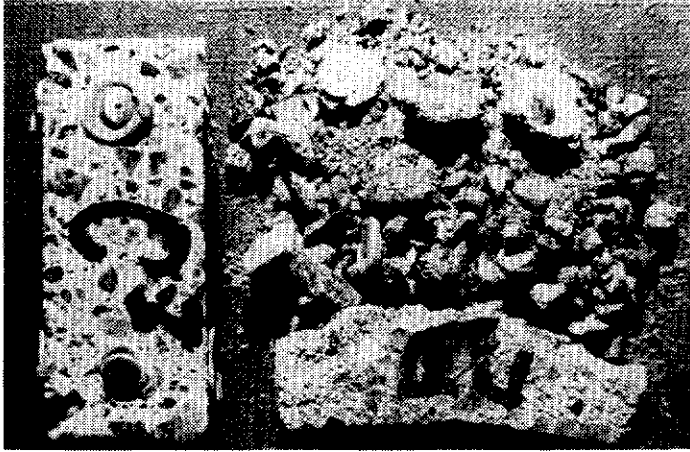


Fig. 10.

Prøveemner testet for frost-tø-tøsalt-
bestandighed. Emnet til højre er ikke
bestandigt.

DANSK BETONFORENING

Dansk Præcisionslandmåling ApS

GEODÆTISK KONTROL- OG DEFORMATIONS MÅLING

af

Ole Andersen

November 1978

INDHOLD	Side
GEODETISK KONTROL- OG DEFORMATIONSMALING	61
Indledning	61
Kontrolmåling	61
Beskrivelse og forudsigelse af handlingsforløb	64
Specialinstrumenter og deres anvendelse	65
Eksempel på geodætisk kontrol- og deformationsmåling ...	68

GEODÆTISK KONTROL- OG DEFORMATIONSMALING.

af landinspektør Ole Andersen,
Dansk Præcisionslandmåling ApS.

Indledning.

Når man skal belyse emnet geodætisk kontrol- og deformationsmåling, er det meget vigtigt at præcisere forholdet mellem middelfejl og tolerancer.

Kravet til et bygværks konstruktion er normalt angivet med tolerancer; svarende hertil arbejder vi i landmålingen og geodæsien med et middelfejlsbegreb. Middelfejlen er defineret ved, at middelfejlskvadratet er middeltallet af kvadratet på fejlene på en uendelig lang forsøgsrække. Foretager vi en grafisk fremstilling af målefejlene, vil vi få den bekendte Gausskurve. Her vil 68% af samtlige målinger ligge mellem 1 x middelfejlen og -1 x middelfejlen. 95% af samtlige målinger vil ligge mellem 2 x middelfejlen og -2 x middelfejlen, og 99,7% af samtlige målinger vil ligge mellem 3 x middelfejlen og -3 x middelfejlen. Hvad der ligger uden for ± 3 x middelfejlen, anser man normalt inden for landmålingen for "grove fejl". Sagt med andre ord er tolerancen for en given måling = 6 x middelfejlen.

Kontrolmåling.

I DS-Rekommandation nr. 1050, Tolerancer i byggeriet - Anvendelse af måltolerancer, er angivet følgende:

"Anvender man en målemetode, hvis unøjagtighed (angivet ved en tolerance) ikke overstiger ca. 1/4 af tolerancen på det mål, som skal kontrolleres, vil målemetoden kun have uvæsentlig indflydelse på måleresultat-

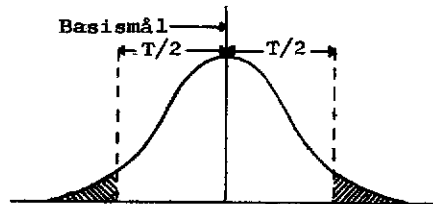
tet".

Dette vil med andre ord sige, at 6 x målemiddelfejlen skal være lig med 1/4 af tolerancen, eller:

$$\text{Målemiddelfejlen} = 1/24 \times \text{tolerancen.}$$

Der har desværre været nogen misforståelse omkring dette spørgsmål, idet en del har opfattet målemiddelfejlen som værende lig med tolerancen for målingen. For at belyse, hvad der sker, hvis man går ud fra denne antagelse, kan man undersøge, hvor stor risikoen er for, at et element eller lignende bliver fejlgodkendt.

I fig. 1 er forudsat, at målemiddelfejlen = 1/4 T og at elementets basismål er uden systematisk fejl, hvilket vil sige, at dimensionerne på elementet skal fordele sig med halvdelen af tolerancen til begge sider for basismålet. Vi vil i dette tilfælde finde, at der er en risiko for fejlgodkendelse på 4,6%.



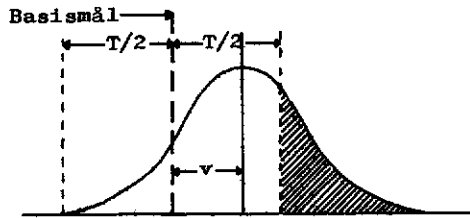
Målemiddelfejl = 1/4 x tolerancen

Basismål uden systematisk fejl

Risiko for fejlgodkendelse: 4.6 %

fig. 1.

Har vor målemetode derimod en systematisk afvigelse på f. eks. $1/3 T$ i basismålet, vil vi finde, at risikoen for fejlgodkendelse stiger til 24,2% (fig. 2).



Målemiddelfejl = $1/4$ x tolerancen

$v = T/3 =$ systematisk afvigelse i basismål

Risiko for fejlgodkendelse: 24.2 %.

fig. 2.

En så stor risiko er naturligvis ganske uacceptabel. Forbedrer vi målemiddelfejlen til $1/12 T$ og stadig ser på et eksempel, hvor der er en systematisk afvigelse på $1/3 T$ i basismålet, vil vi finde, at der er en risiko på 2,3% for en fejlgodkendelse af elementer.

Hvor stor en fejlrisiko i %, der er ved forskellige målemiddelfejl og systematisk afvigelse i basismålet er angivet i tabellen:

Systematisk afvigelse i basismål	Risiko for fejlgodkendelse i %					
	Målemiddelfejl					
	1/24 T	1/12 T	1/6 T	1/5 T	1/4 T	1/3 T
0	0	0	0.3	1.2	4.6	13.4
1/6 T	0	0	2.3	4.5	10.0	18.1
1/3 T	0	2.3	16.0	21.2	24.2	31.5

Vi ser her tydeligt, at risikoen for fejlgodkendelse stiger kraftigt, når målenøjagtigheden reduceres.

Følger vi DS-Rekommandation og anvender en målemetode, der har en målemiddelfejl, som er 1/24 af tolerancen, vil vi ved præferencetal for tolerancer på 10, 16, 24, 40 og 60 mm skulle anvende målemetoder, der giver os målemiddelfejl på henholdsvis 0.4, 0.7, 1.0, 1.7 og 2.5 mm. Man må erkende, at skal man kontrollere, om tolerancer på under 24 mm er overholdt, kan man ikke anvende et normalt stålmålebånd eller et normalt byggepladsnivellerinstrument, men man er nødt til at anvende specialinstrumenter til dette formål eller lade etablere specielle prøveopstillinger, hvor man kan opnå større nøjagtigheder.

Beskrivelse og forudsigelse af handlingsforløb.

Geodætiske målinger er særdeles anvendelige til registrering af krybning, svind, sætninger og deformationer i betonbygværker. Ønsker man at foretage målinger, der beskriver et handlingsforløb, skal man tilrettelæg-

ge at udføre sine målinger således, at man kan opnå en punktmiddelfejl på mellem $1/4$ og $1/6$ af de forventede bevægelser.

Drejer det sig derimod om at forudsige et handlingsforløb, altså at ekstrapolere ud fra de målinger man har foretaget, er det nødvendigt at foretage målingerne således, at punktmiddelfejlen bliver ca. $1/20$ af de forventede maksimale deformationer.

Kravene til punktmiddelfejl ved såvel beskrivelse som forudsigelse af et handlingsforløb er fremkommet efter et grundigt kommissionsarbejde i "International Federation of Surveyors".

Forventer man en maksimal deformation på 10 cm, må man for at forudsige et handlingsforløb anvende en målemetode, der giver en punktmiddelfejl på 5 mm. Er den forventede maksimale deformation på 1 cm, skal man anvende en målemetode, der giver en punktmiddelfejl på 0.5 mm.

Specialinstrumenter og deres anvendelse.

De metoder, vi i dag anvender til geodætisk kontrol- og deformationsmåling, er de fra landmålingen almindeligt kendte metoder, nemlig nivellement, vinkelmåling og afstandsmåling, dog i noget mere forfinet udførelse end man benyttede for 25 år siden. Lige som inden for alle andre tekniske felter er der sket en rivende udvikling med landmålingsinstrumenter, således at man i dag har geodætiske specialinstrumenter, med hvilke man uden anvendelse af den store arbejdskraftmængde, der tidligere var nødvendig, kan opnå meget store nøjagtigheder.

Dansk Præcisionslandmåling har som det eneste private

firma i Danmark anskaffet sig sådanne specialinstru-
menter, der kan tilfredsstille de største krav til
nøjagtigheder inden for opgaver som
Hovedpunktsbestemmelse ved afsætningsarbejder.

Præcisionsnivellement af fikspunktsnet.

Fortætning af plane fikspunktsnet.

Etablering og måling af kontrolbaner for afstands-
målere.

Sætnings- og deformationsmåling af bygninger og
broer.

Sætnings- og deformationsmåling af jordbygværker.

Præcisionsafsætning af maskindele.

Systemnet og målemetoder til justering af store ma-
skiner.

Af vor instrumentpark skal jeg specielt fremhæve 3
instrumenter:

Præcisionsnivellerinstrumentet NI 002, der er et au-
tomatisk horisonterende nivellerinstrument med luft-
dæmpet kompensator, der fremstiller en absolut hori-
sont ved, at kompensatoren anvendes i 2 hinanden mod-
satte stillinger.

Sammen med præcisionsnivellerinstrumentet anvendes
præcisionsstadier af invar, der er en metallegering
med en temperaturudvidelseskoefficient, som er så
lille, at denne er helt uden betydning for målinger-
nes nøjagtighed.

Nøjagtigheden af et nivellerinstrument angives nor-
malt som målingsnøjagtigheden for 1 km dobbeltnivel-
lement. For dette instrument er kilometermiddelfej-
len på

$$\pm 0.2 - \pm 0.3 \text{ mm.}$$

Erfaringer fra maskinmontage har vist, at højdeforskelle mellem punkter inden for 40 m kan bestemmes med dette instrument med en nøjagtighed på
 ± 0.02 mm.

Kern DKM 3 - teodolitten er en kompakt bygget teodolit, der er meget lidt følsom over for vindpåvirkninger. Teodolittens kikkert er forsynet med en spejloptik, der har en objektivåbning på 68 mm. Kikkertens forstørrelse kan vælges til 45 x eller 30 x afhængig af forholdene.

Retningsmiddelfejlen for en retning målt i to kikkertstillinger med dette instrument er
 $\pm 1/10.000$ gon (400 g-system) eller
0.3" (360°-systemet),
hvilket svarer til ± 0.1 mm på en afstand af 65 m.

Præcisionsafstandsmåleren TELLUROMETER MA 100 er en elektrooptisk afstandsmåler, der anvender moduleret, infrarødt lys som målemedie. Instrumentet anbringes i den ene ende af den linie, der ønskes målt. I den anden ende af linien anbringes et specielt kalibreret prisme, der reflekterer målelyset tilbage i instrumentet. Ved en fasemåling bestemmes afstanden mellem afstandsmålerens og reflektorens opstillingspunkter. Instrumentet har en målingsnøjagtighed ved almindelige målinger på

± 1.5 mm ± 2 mm pr. km,

hvor de 2 mm skyldes usikkerhed i bestemmelsen af meteorologien i målelinien.

Ved en speciel målemetodik kan målingsnøjagtigheden bringes ned på

± 0.5 mm ± 2 mm pr. km.

Instrumentet har en rækkevidde på godt 2 km og kan

arbejde i et temperaturområde fra $- 20^{\circ}$ C til $+ 55^{\circ}$ C.

Eksempel på geodætisk kontrol- og deformationsmåling.

Tiden tillader ikke en detaljeret gennemgang af de enkelte målemetoder, der kan anvendes til vertikale og horisontale målinger. Jeg skal blot ved et eksempel beskrive 1) Det Trigonometriske Nivellement, 2) Fremskæring fra Faste Hovedpunkter samt 3) Fuldmåling med Vinkler og Afstande.

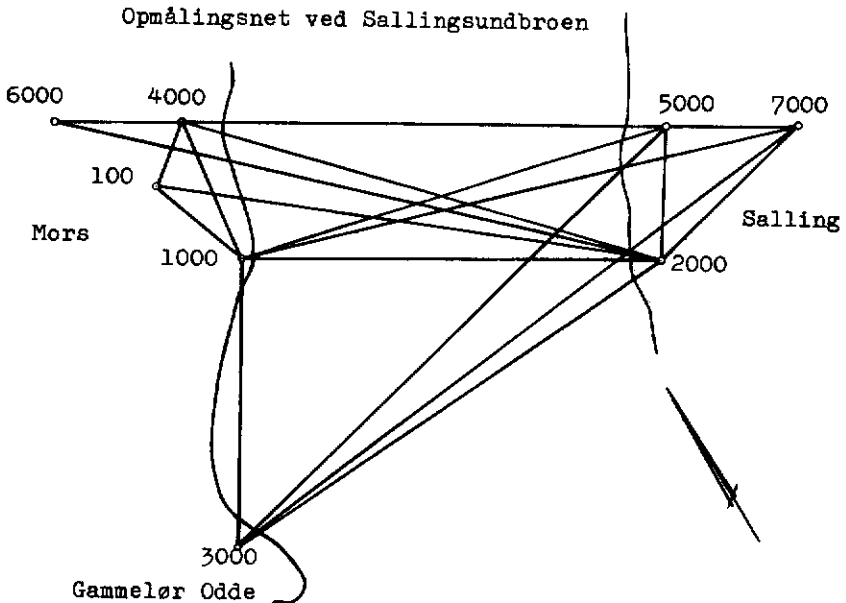


Fig. 3

Eksemplet er fra Sallingsundbroen, hvor der omkring brostedet er etableret et hovednet. Punkterne 1000, 2000 og 3000 er etableret som postamenter, på hvilke måleinstrumenterne direkte kan opstilles. Punkterne 4000, 5000, 6000 og 7000 ligger i broelinien. Hovednettet er målt 2 gange uafhængigt af hinanden med vinkler og afstande. Vinklerne er målt med KERN DKM 3-teodolitten og afstandene med Tellurometer MA 100. De 2 uafhængige målinger er hver for sig udjævnet og derefter transformeret ind over hinanden. Resultatet af transformationen viste, at punktmiddelfejlen var ± 1 mm.

Både kontrol- og deformationsmålingsproceduren blev tilrettelagt således, at målingerne kunne udføres af de tilsynsførende, rådgivende ingeniører B. Højlund Rasmussen's medarbejdere på byggepladsen.

For at kunne måle de enkelte pillers sætninger og bevægelser er der på hver bropille anbragt målemærker, således at de kan ses fra punkterne 1000, 2000 og 3000. Der er på hver pille anbragt målemærker umiddelbart over isbryderkonstruktionen og lige under broens overbygning. Pillernes bevægelser bestemmes ved fremskæring fra punkterne 1000, 2000 og 3000 ved satsmåling med Vejdirektoratets KERN DKM 3-teodolit, der er indkøbt til formålet.

For at kunne bestemme koterne til pillerne på vand er det nødvendigt nøje at kende luftens brydningsindeks. Da sigterne til pillerne næsten går gennem de samme luftlag som sigtet mellem 1000 og 2000, kan man bestemme luftens brydningsindeks ved at måle højdevinklen mellem disse to punkter, hver gang man tager en højdevinkelmåling til pillerne.

For at bestemme højdeforskellen mellem punkterne

DANSK BETONFORENING

Aalborg Portland, Cement- og Betonlaboratoriet

MÅLING AF BETONS HÆRDNINGSGRAD

af

Eigil V. Sørensen

November 1978

INDHOLD	Side
MÅLING AF BETONS HÆRDNINGSGRAD	74
Røntgendiffraktion'	74
Indre overfladeareal	75
Ikke-fordampeligt vand	76
Porøsitet	77
Volumenkontraktion	77
Varmeudvikling	79
Maturity-transformation	80
Litteraturhenvisninger	81

MÅLING AF BETONS HÆRDNINGSGRAD

Eigil V. Sørensen
AALBORG PORTLAND, Cement- og Betonlaboratoriet

Betons hærdningsgrad, eller rettere cementens hydratiseringsgrad, er defineret som

mængden af reageret cement i forhold til den oprindelige mængde af cement

Hydratiseringsgraden er en dimensionsløs størrelse, som varierer fra 0 for det friskblandede materiale til 1 for det fuldstændigt reagerede materiale.

Betonens egenskaber udvikles som følge af, og i takt med, den fremadskridende reaktion mellem cement og vand, den såkaldte hydratisering. Det er derfor naturligt at samle interessen omkring hydratiseringsgraden som værende en fundamental parameter for betonens egenskabsudvikling.

I det følgende gives en kort omtale af nogle af de hyppigst anvendte metoder til måling af hydratiseringsgraden, samt de principper, der ligger til grund for metoderne.

Røntgendiffraktion

Røntgendiffraktometri er en af de målemetoder, som anses for værende mest direkte til måling af hydratiseringsgraden. Ved denne metode opnås et mål for, hvor stor en del af de oprindelige klinkerminerale, som er forsvundet og omdannet til calciumsilikathydrater.

Måleprincippet består i at sende røntgenstråling gennem en pulveriseret prøve af materialet, og derefter at måle intensiteten af den diffrakterede stråling i forskellige retninger. Retningen af den diffrakterede stråling afhænger af afstanden mellem gitterplaner i det krystallinske materiale, hvorved de forskellige cementminerale kan identificeres. Intensiteten af den diffrakterede stråling afhænger af mængden af den pågældende fase.

I fig. 1 er skematisk vist røntgendiffraktogrammer for en cementpasta ved fremadskridende hydratisering. Højden af toppene A, som stammer fra nogle af de oprindelige cementmineraller, ses at aftage med hydratiseringstiden. Samtidigt vokser højden af toppen B, som hovedsageligt stammer fra et reaktionsprodukt.

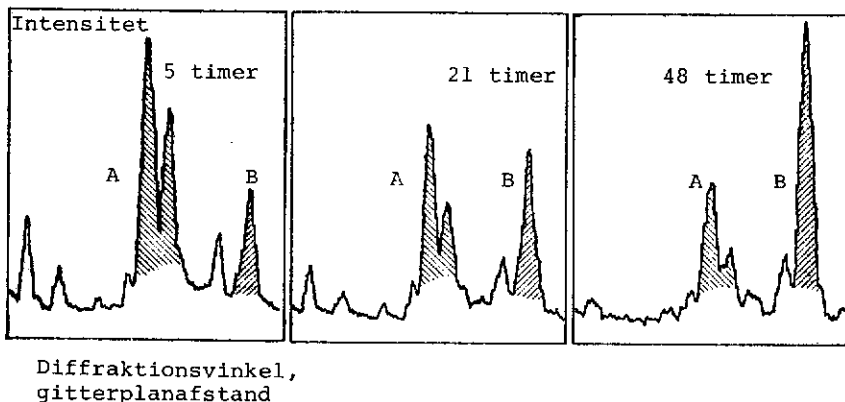


Fig. 1. Røntgendiffraktogrammer af cementpasta hydratiseret 5, 21 og 48 timer ved 20°C. Skematisk

Indre overfladeareal

Ved cementens hydratisering dannes reaktionsprodukter, hvis overfladeareal er langt større end cementpartiklernes. Cementpartiklernes specifikke overflade er op til ca. $0.5 \text{ m}^2/\text{g}$, medens en hårdnet cementpasta har en specifik overflade af størrelsesordenen $100\text{-}300 \text{ m}^2/\text{g}$. Størrelsen af det indre overfladeareal bliver således et mål for hydratiseringsgraden.

Det indre overfladeareal kan måles på to måder. Ved den ene metode måles den adsorberede mængde af en passende gas som funktion af gassens relative damptryk. Den mest almindelige adsorbat er vanddamp eller kvælstof. De opnåede måleresultater behandles ifølge den såkaldte BET-teori, hvorefter det indre overfladeareal kan beregnes. Normalt er den beregnede overflade langt større ved anvendelse af vanddamp end ved brug af kvælstof.

Den anden metode til måling af cementpastaens indre overfladeareal er forholdsvis ny. Denne metode baserer sig på røntgendiffraktometri i området for små diffraktionsvinkler. Ud fra sådanne røntgendiffraktogrammer kan den indre overflade beregnes [1].

Ikke-fordampeligt vand

Den måske hyppigst anvendte metode til måling af cementens hydratiseringsgrad er måling af reaktionsprodukternes indhold af kemisk bundet vand.

Ved hydratiseringsprocessen bindes en del af det oprindelige blædevand kemisk, hovedsageligt som hydratvand. Ved atmosfæretryk afgår dette vand først fra cementpastaen ved temperaturer over 100°C , hvorfor det ofte benævnes "ikke-fordampeligt vand". Indholdet af kemisk bundet vand bestemmes fra vægttabet ved opvarmning til ca. 1000°C fra en forud valgt "tør" tilstand, f.eks. svarende til ovntørring ved 105°C .

I fig. 2 er vist et eksempel på den tidsmæssige udvikling af indholdet af kemisk bundet vand. Resultaterne stammer fra forsøg med cementmørtel, vandlagret ved 20°C .

Ikke-fordampeligt vand,
g/g cement

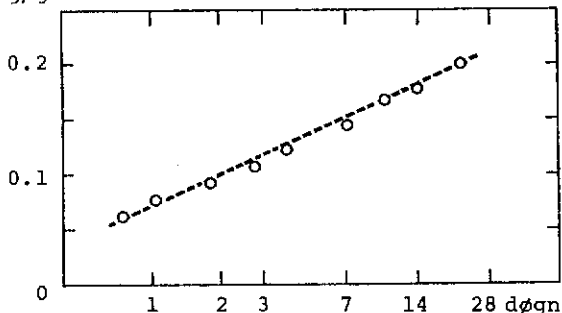


Fig. 2. Indhold af ikke-fordampeligt vand som funktion af tid ved 20°C vandlagring.

Porøsitet

Ikke alene indholdet af ikke-fordampeligt vand, men også det potentielle indhold af fordampeligt vand, eller med andre ord porøsiteten af cementpastaen, kan anvendes til karakterisering af hydratiseringsgraden.

Idet cementens hydratiseringsprodukter fylder mere end den oprindelige cement, aftager porøsiteten med den fremadskridende hydratisering. I fig. 3 er vist to eksempler på udviklingen af porøsiteten i cementpasta under vandlagring (fra [2]).

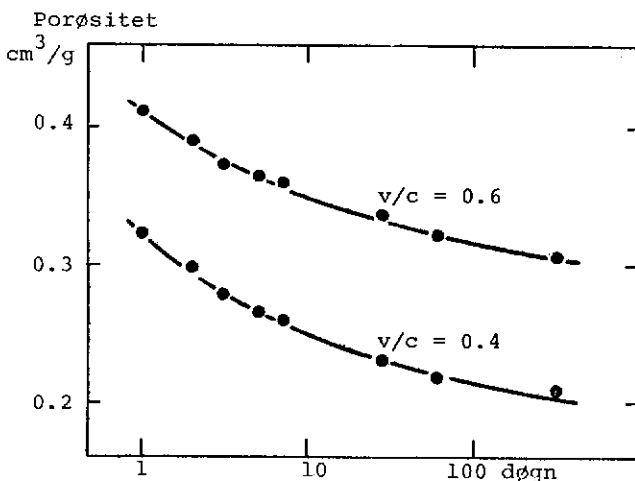


Fig. 3. Udvikling af cementpastas porøsitet. Fra [2].

Volumenkontraktion

Ved den kemiske binding af vandet i hydratiseringsprodukterne aftager vandets specifikke volumen med ca. 25%. Kort efter blandingen af cementpasta eller beton er det volumen, som ikke er opfyldt af fast stof, nemlig porevoluminet, helt opfyldt af blandevandet. Efterhånden som hydratiseringen skrider frem bliver en større og større del af porerne luftfyldte, hvis der ikke tilføres vand udefra, idet det kemisk bundne vand så at sige "fylder for lidt", nemlig ca. 25% mindre end det gjorde i fri tilstand.

Dette forhold kan udnyttes til måling af hydratiseringsgraden, idet volumenkontraktionen er proportional med mængden af reageret cement. I princippet kan volumenkontraktionen måles helt simpelt med et apparatur som vist i fig. 4.

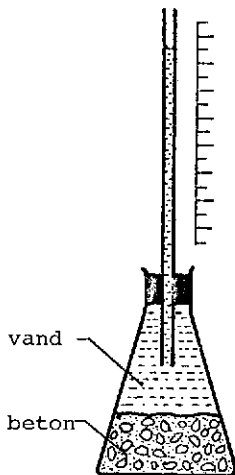


Fig. 4. Måling af volumentkontraktion

Under hydratiseringen trænger vand udefra ind i cementpastaens porer i takt med volumenkontraktionen. Kontraktionens størrelse måles ved at følge vandoverfladen i røret. Fig. 5 viser et eksempel på resultatet af en sådan måling.

De fleste af de tidligere omtalte metoder til måling af hærdningsgraden egner sig bedst til analyse på cementpasta, hvorimod måling af volumenkontraktion udmærket kan foretages direkte på beton. Hvis der måles ved varierende hærdetemperatur, vil det ofte være nødvendigt at foretage en vis korrektion på grund af uens temperaturbevægelser i apparaturet. En sådan korrektion kan f.eks. foretages ved anvendelse af en inaktiv parallelprøve som sand. Apparat samt måleprincip og -metode findes i øvrigt beskrevet i [3].

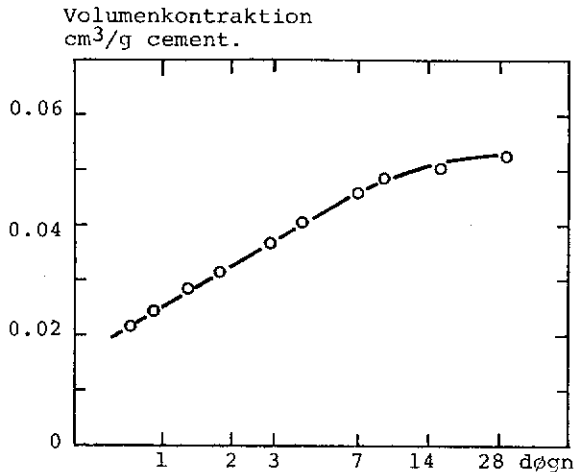


Fig. 5. Eksempel på volumenkontraktion som funktion af tid ved 20°C.

Varmeudvikling

Reaktionen mellem cement og vand er en exoterm proces, d.v.s. der frigøres varme ved hydratiseringen. Varmedviklingsforløbet under hydratiseringsprocessen har i lang tid været genstand for stor interesse i forbindelse med studier af hydratiseringsforløbet, herunder også til karakterisering af hærtningsgraden.

Den frigjorte varmemængde til et givet tidspunkt kan måles ved to metoder, opløsningskalorimetri og ledningskalorimetri. Ved opløsningskalorimetri måles varmetoningen ved opløsning af den hærtnede cementpasta i en blanding af salpetersyre og flussyre, hvoraf den udviklede hydratiseringsvarme bestemmes. Ved ledningskalorimetri måles varmestrømmen bort fra en hydratiserende prøve, idet prøven holdes ved konstant temperatur. Fig. 6 viser et eksempel på varmeudviklingsforløbet for cementpasta under hydratisering ved forskellige temperaturer, målt ved ledningskalorimetri.

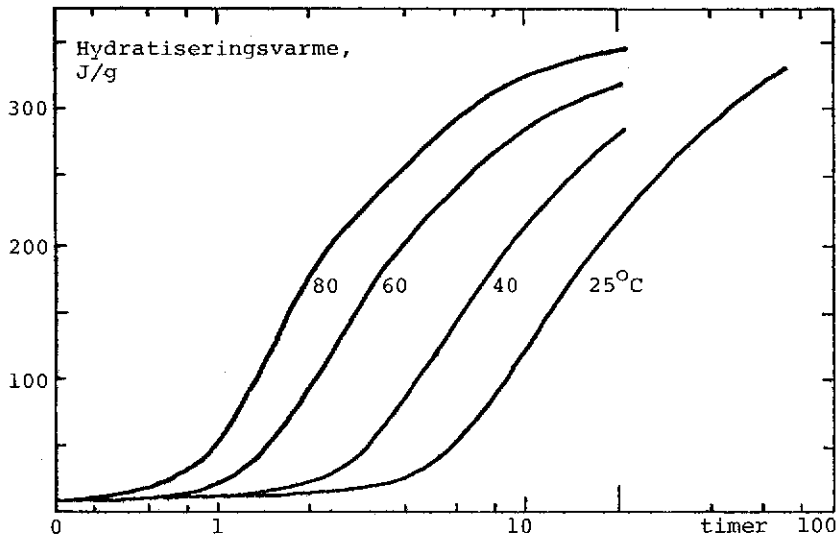


Fig. 6. Varmeudviklingsforløb ved isotherm hydratisering af rapid-cement, målt ved ledningskalorimetri.

Maturity-transformation

Som afslutning på denne kortfattede gennemgang af metoder til måling af betons hærtningsgrad omtales maturity-transformationen, som vinder stadig større udbredelse i betonpraksis.

Indførelse af maturitybegrebet (maturity = "modenhed") er motiveret i behovet for at kunne sammenligne hærdeprocesser, der forløber under forskellige tid-temperatur betingelser. Hydratiseringshastigheden vokser med temperaturen, og man har fundet, at hastighedens temperaturafhængighed meget nøje følger Arrhenius' udtryk for termisk aktiverede processer [4].

Med en maturityfunktion baseret på ovennævnte udtryk er det muligt at transformere sand hærdetid til ækvivalent tid ved referencetemperaturen 20°C, kaldet maturity. Ved en given hærtningsgrad bliver maturity således den tid, som skulle anvendes for at opnå den samme hærtningsgrad, hvis temperaturen under hærningen havde været konstant 20°C. En forsvarlig anvendelse af maturity-transformationen forudsætter

[4], at betonen sikres rimelige hårdeforhold, herunder at en tilstrækkelig mængde vand til fortsat hydratisering er til stede, samt at betonen beskyttes mod for tidlig frysning.

Ved anvendelse af maturity-transformationen fås et relativt mål for hærtningsgraden, nemlig den ækvivalente alder ved 20°C hærtning. Måling af maturity foretages mest bekvemt med den hertil udviklede Maturity Computer, hvis temperaturføler registrerer betonens temperatur under hærtningen og automatisk omsætter sand tid til maturity [4].

Litteraturhenvisninger

- [1] Winslow, D.N. & Diamond, S.:
"Specific surface of hardened portland cement paste as determined by small-angle X-ray scattering".
J. Amer. Cer. Soc., vol. 57, no 5 (1974), pp. 193-197.
- [2] Winslow, D.N. & Diamond, S.:
"A mercury porosimetry study of the evolution of porosity in portland cement".
J. Materials, vol. 5, no 3 (1970) pp. 564-585.
- [3] Jung, F.:
"Ein einfaches Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung der Festigkeit von Beton".
Beton- und Stahlbetonbau, no 1, 1974, pp. 16-19.
- [4] Freiesleben Hansen, P & Pedersen, E.J.:
"Måleinstrument til kontrol af betons hærtning".
Nordisk Betong, no. 1, 1977, pp. 3-7.



ISBN 87-87823-00-4
teknisk forlag a-s . København