

Aalborg Universitet



Ikke-Destruktiv Prøvning af Beton

Jensen, Jens Kristian Jehrbo

Publication date:
1978

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Jensen, J. K. J. (1978). *Ikke-Destruktiv Prøvning af Beton*. Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitet. DCE Technical Reports Nr. 7806

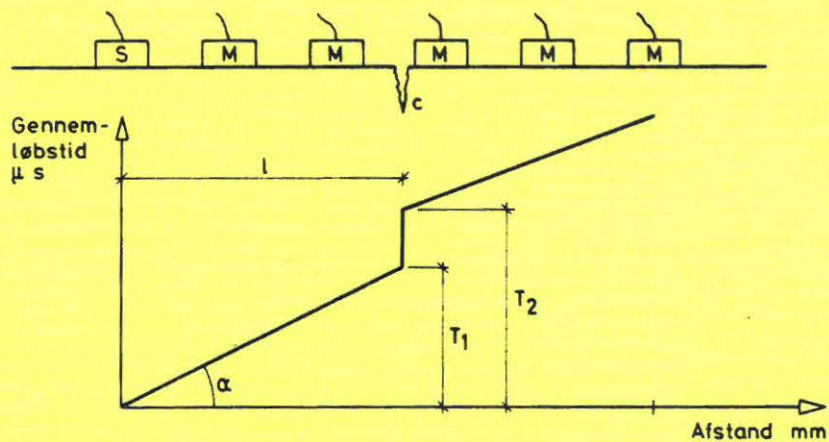
General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



$$c = \frac{l}{2} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2} \right)$$

<u>INDHOLD</u>	side
FORORD	1
INDLEDNING	2
TILBAGESLAGSMETODEN	3
DYNAMISKE METODER	7
Resonansfrekvensmetode	7
Lydhastighedsmetode	8
Ultralyd	9
Metoder	9
Influerende faktorer og anvendelser	10
UDTRÆKSMETODER	29
Lok-test apparat	29
Anvendelser	30
Forsøg	30
EKSPERIMENTELLE UNDERSØGELSER	32
ANDRE METODER	50
KONKLUSION	53
SLUTNING	54
LITTERATUR	55

FORORD

Denne rapport omhandler resultatet af det arbejde, der er gjort i forbindelse med de to projekter

Lok-test prøvning af beton

Ikke-destruktiv prøvning af beton.

Projekterne har omfattet et litteraturstudium, der især for den ikke-destruktive prøvning har været ret omfattende. I litteraturlisten findes et passende udvalg af den gennemgåede litteratur.

Endvidere har projekterne omfattet en række laboratorieforsøg, som er udført på instituttet. Hertil har laboratoriemedarbejder Arne Thomsen ydet en stor og uegennyttig indsats, og han har også fotograferet opstillinger m.m.

Forsøgsresultaterne er behandlet statistisk af forfatteren og hertil er bl.a. anvendt programmer, som ligger til brug på universitetscenterets datacenter.

Renskrivningen af manuskriptet er udført af sekretær Tove Jensen, fotografierne er fremstillet af teknisk assistent Norma Hornung, og tegningerne er udført af teknisk assistent Ingrid Christensen, som også har lavet det øvrige fotoarbejde. Trykningen er foretaget på centertrykkeriets afdeling i Danmarksgade.

Konsistoriums forskningsudvalg og instituttet har bevilget penge til indkøb af apparatur. Udgifterne til materialer m.m. er delvis dækket af instituttet.

Alle implicerede parter bedes modtage min hjerteligste tak.

Jens Kr. Jehrbo Jensen

INDLEDNING

Til ikke-destruktiv prøvning af beton er der udviklet en lang række metoder, som har forskellige anvendelser og udbredelse. Nogle metoder er simple at anvende, andre kræver et kompliceret udstyr for at kunne bruges fornuftigt.

I princippet er en målemetode ikke-destruktiv, når det emne, man måler på, efterlades i samme stand efter målingen som før, hvilket medfører at målingen kan gentages. For betons vedkommende vil egenskaberne ændre sig med tiden - hurtigst til at begynde med og efterhånden langsommere. Det betyder altså, at den målte egenskab vil have forskellige værdier til forskellige tidspunkter for den samme beton. Men hvis egenskaberne kan måles igen og igen er prøvemethoden ikke-destruktiv.

I det følgende skal omtales en række ikke-destruktive metoder til måling på (hærdnet) beton. I tabel 1 ses en samlet oversigt over de væsentligste metoder. Nogle af metoderne beskrives mere indgående, og der er beskrevet og udført en række forsøg med nogle af disse metoder. Resultaterne af disse vurderes og sammenlignes med litteraturen.

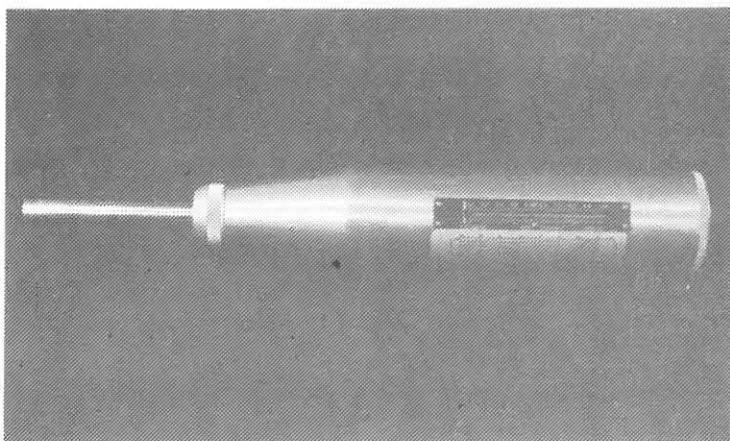
<u>METODER</u>	<u>EKSEMPLER</u>
1. Tilbageslagsmetoden	Schmidt hammer
2. Dynamiske metoder	Ultralyd m.m.
3. Udtræksmetoder	Lok-test
4. Overfladehårdhedsmetoder	Williams pistol Franck hammer
5. Indtrængningsmetoder	Windsor pistol
6. Radioaktive metoder	
7. Magnetiske metoder	Covermeter
8. Elektriske metoder	
9. Mikrobølge absorption	
10. Akustisk emissionsteknik	

Tabel 1. Oversigt over ikke-destruktive prøvemethoder.

TILBAGESLAGSMETODEN

Schmidt hammeren er et af de hyppigst anvendte instrumenter til ikke-destruktiv prøvning af beton. Figur 1 viser en sådan hammer af type N, som er den mest anvendte type.

Figur 1.
Schmidt hammer.

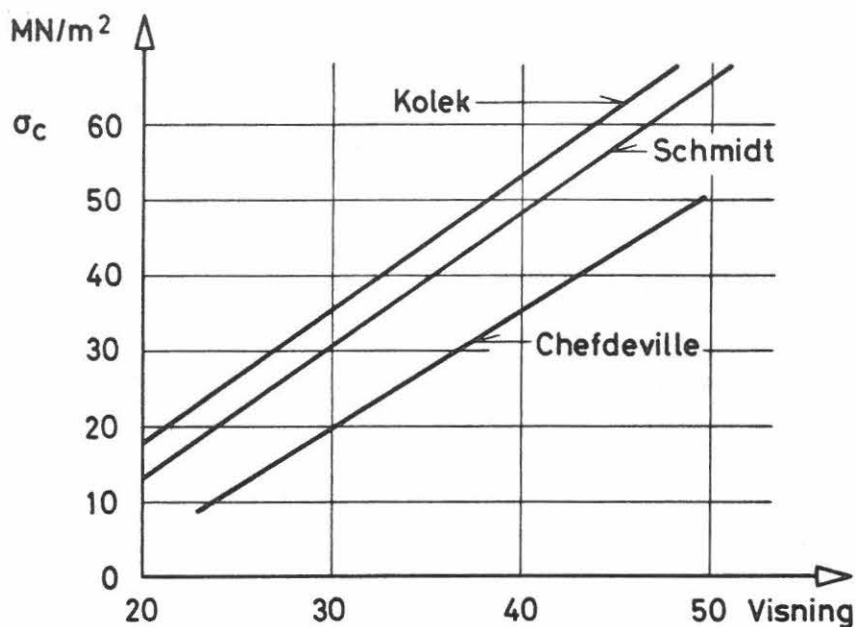


Prøvningen sker ved, at man presser spidsen af instrumentet imod betonoverfladen. Ved et bestemt tryk udløses en hammer inde i apparatet, og denne rammer spidsen med en bestemt energi for derefter at blive tilbagekastet på grund af betonens hårdhed og stivhed. Det stykke, som hammeren tilbagekastes, aflæses som et hammertal (rebound number, 20-50) og tages som et udtryk for betonens kvalitet.

Apparatet er simpelt i brug, og selv om der ikke umiddelbart er nogen relation mellem betons styrke og hammertallet, kan man alligevel finde empiriske relationer, som tillader bestemmelse af styrken $\pm 20\%$.

Apparatet fås i udgaver med forskellig hammerenergi (0,75 - 30 Nm). Normalt anvendes en energi på 2,25 Nm (type N).

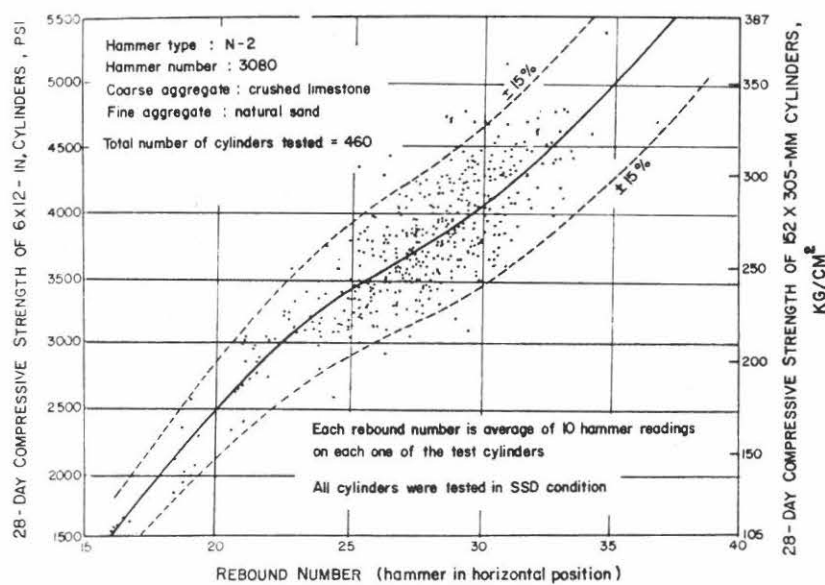
Med apparatet følger en kalibreringskurve, som ikke må anvendes ukritisk. Figur 2 viser et eksempel på kalibreringer af samme hammertype. Det ses, at det er nødvendigt selv at foretage kalibrering med den beton, man ønsker hammeren anvendt til. Forsøg omtalt i litteraturen bekræfter dette.



Figur 2. Kalibreringskurver for Schmidt hammer, type N.

Figur 3 viser resultatet af en forsøgrække med en bestemt hammer, hvor samhörørende værdier mellem cylindertrykstyrke og hammervisning er optegnet.

Figur 3.
Relation
mellem
cylinder-
trykstyrke
og hammer-
visning med
én hammer.



Influerende faktorer

I det følgende skal omtales en række faktorer, der influerer på hammertallet.

Overfladens beskaffenhed

Hvis overfladen er ru, f. eks. efter en træform, fås en lavere visning, og det er derfor ofte nødvendigt at slibe overfladen plan og glat inden prøvningen.

Prøveemnets stivhed

Ved små prøveemner vil prøvningen bevirke, at emnet bevæger sig, når hammeren slår. Resultatet bliver i så fald for lavt, og sådanne prøvelegemer indspændes derfor med en belastning på 1-2 MN/m² inden prøvning.

Ved brug i marken er der som regel ingen problemer.

Betonteknologiske parametre

Som vist på figur 2 spiller tilslaget en rolle for resultatet, hvilket skyldes, at betonens stivhed er sammensat af stivheden af cementpastaen og af tilslaget, som jo udgør 3/4 af betonens samlede vægt. Specielt ved letbeton er metodens spredning større end normalt.

For betoner med forskellig alder gælder, at den yngste beton vil give den højeste hammervisning for samme styrke.

En våd beton giver en lavere visningsgrad end en tør beton med samme styrke.

Prøvningsretning

Prøvningen foregår altid vinkelret på betonoverfladen. Det betyder, at apparatet i nogle tilfælde danner en vinkel $\alpha \neq 0$ med vandret retning. Er dette tilfældet, vil visningen for samme styrke afvige 2-5 enheder fra værdien ved vandret prøvning. Prøves der skråt nedad, trækkes der fra, og afvigelsen lægges til ved prøvning skråt opad. Korrektionen er størst ved de svage betoner.

Anvendelser

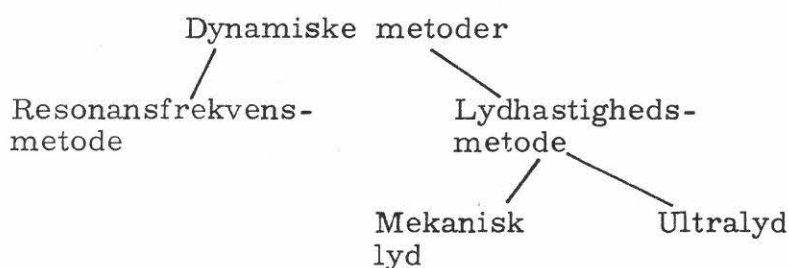
Ved anvendelse af Schmidt hammeren kan man på simpel måde få et indtryk af en betons ensartethed i en given konstruktion. En nor-

mal fremgangsmåde er den, at man f.eks. på en væg afprøver hammeren i punkter med faste afstande. Der foretages 5-10 prøvninger i hvert punkt, og det er herefter muligt at optegne kurver med samme hammervisning, hvorfra man kan indkredse eventuelle svage felter i betonen.

Hammeren er anvendt til sammenligning med betonstyrken, se under omtalen af eksperimentelle undersøgelser.

DYNAMISKE METODER

Disse metoder bygger på det faktum, at en lyds udbredelseshastighed i et legeme afhænger af bl.a. legemets stivhed og massefylde. Lord Rayleigh har beskrevet, at der findes en sammenhæng mellem lydhastigheden og legemets resonansfrekvens. Dette udnyttes til ikke-destruktiv prøvning og de dynamiske metoder kan groft inddeles, som vist nedenfor.



Resonansfrekvensmetode

Ved denne metode udsættes et prøvelegeme (f.eks. en lang, tynd stang) for svingninger, hvis frekvens varieres. Ved en bestemt frekvens opstår der resonans, og denne frekvens benyttes til bestemmelse af det dynamiske E-modul, idet det gælder, at

$$E_d = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \rho \cdot n^2 \cdot L^2$$

hvor E_d = dynamiske elasticitetsmodul (MN/m^2)

ρ = massefylden (kg/m^3)

n = resonansfrekvensen (s^{-1})

L = prøvelegemets længde (m).

Endvidere gælder det for lange, tynde emner, at

$$E_d = \rho \cdot V^2$$

hvor V = lydhastigheden (km/s).

For flade emner (plader) gælder, at

$$E_d = \rho \cdot V^2 (1 - \nu^2)$$

og for massive konstruktioner gælder, at

$$E_d = \rho \cdot V^2 \cdot \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

hvor ν = Poissons forhold.

Metoden skal ikke omtales nærmere, men det ses, at man ved måling af n og V kan bestemme E_d og ν .

Resonansfrekvensmetoden er en udpræget laboratoriemetode og anvendes f.eks. til løbende bestemmelse af E -modulet ved holdbarhedsundersøgelser. Der henvises til litteraturen (27).

Lydhastighedsmetode

Når lyd udbreder sig i et materiale, sker det som længdebølger (kompressionsbølger), tværbølger (forskydningsbølger) og overfladebølger (Rayleigh bølger). Bølgernes hastigheder forholder sig som ca. 2:1:0,9, og længdebølgerne anvendes derfor mest til ikke-destruktiv prøvning af beton.

Mekanisk lyd

Ved denne metode udsættes et prøvelegeme for et hammerslag i den ene ende, hvorved der dannes en lydbølge i emnet. Disse lydbølger omsættes til elektriske impulser i 2 pick-up'er, der er forbundet med et galvanometer. Med kendskab til forskellige apparatkonstanter kan lydhastigheden beregnes.

Når lydbølgen løber igennem emnet, vil amplituden falde, hvilket kan gøre bestemmelsen besværlig.

Flere forfattere har fundet rimelig god korrelation mellem bøjningsstyrke og elasticitetsmodul bestemt på denne måde.

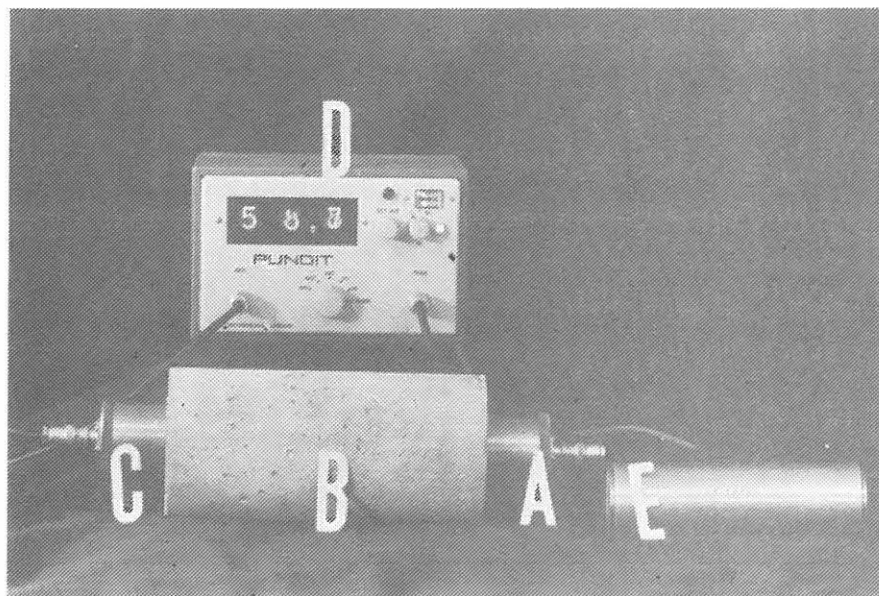
Metoden er blevet forbedret med en hammer, som giver flere slag pr. sekund, og dette skulle give en bedre bestemmelse af gennemløbstiden.

Der henvises til litteraturen (27).

Ultralyd

I denne rapport skal ultralydmetoder til ikke-destruktiv prøvning af beton beskrives indgående. Figur 4 viser et billede af et moderne udstyr til måling på beton.

Figur 4. Ultralydapparat (PUNDIT).

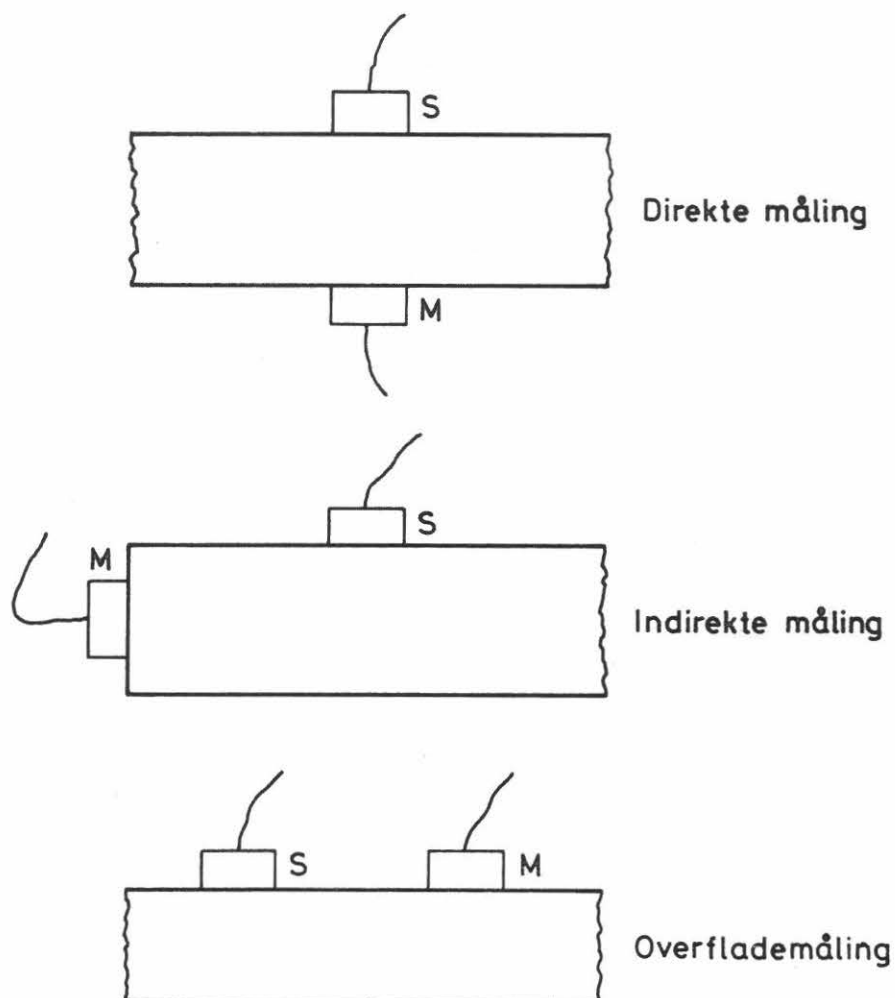


Princippet i dette apparat er, at der udsendes lydimpulser fra senderlydhovedet A gennem prøvelegemet B til modtagerlydhovedet C. De to lydhoveder - der er frit ombyttelige - er elektroakustiske transducere. Hver lydhovedstørrelse har sin frekvens og til brug ved beton anvendes frekvenser i området 25 - 54 - 200 kHz. Apparatet er indrettet således, at man direkte på digitaltælleren D kan aflæse, hvor lang tid (i μs) lyden er om at løbe fra sender til modtager. Ved division af afstanden i mm med gennemløbstiden fås lyd hastigheden v i km/s.

Koblingen af lydhovederne til prøvelegemet sker med pumpefedt eller lignende. Apparatet har 3 måleområder (0,1 - 9990 μs). Til justering af apparatet findes der en kalibreret prøve E med påtrykt gennemløbstid.

Metoder

Måling med ultralyd kan udføres på principielt 3 forskellige måder, som vist på figur 5.



Figur 5. Målemetoder: S = sender, M = modtager.

Den bedste metode er den direkte metode, fordi følsomheden er størst, og vejlængden er veldefineret. Ved prøvning på konstruktioner er man ofte nødt til at anvende en af de to andre metoder. Men de er mere usikre, fordi vejlængden ikke er så veldefineret. Det skal bemærkes, at den sidste metode kan anvendes til bestemmelse af revnedybder og tykkelse af dårlig overfladebeton.

Influerende faktorer og anvendelser

I det følgende skal gennemgås nogle af de faktorer, der influerer på resultatet af en prøvning, og nogle anvendelser skal behandles.

Overfladebeskaffenhed

Det er vigtigt at sørge for god kontakt mellem beton og lydhoved. Er der støbt mod en stålform, er dette normalt ikke noget problem. Er der støbt mod en træform, kan det være nødvendigt at slibe overfladen plan evt. rette af med en tynd pasta.

Vejlængde

Principielt skulle hastigheden være uafhængig af vejlængden, men da betonen er inhomogen, kan korte vejlængder bevirke, at gennemløbstiden ændres. Dette skyldes, at bølgelængden bliver for stor i forhold til måleafstanden. Ved maksimal kornstørrelse på højst 16 mm skal minstevejlængden være 100 mm, og mindst 150 mm for beton med d_{\max} op til 32 mm. Der kan måles med ultralyd over meget store afstande (50 m). Litteratur (22).

Temperatur

Mindre variationer i den ydre temperatur vil ikke ændre lydshastigheden væsentligt. For større ændringer henvises til nedenstående tabel, som angiver korrektionen i % af hastigheden ved 20°C.

Korrektion i %		
Temperatur °C	Lufttørret beton	Vandmættet beton
60	+ 5,0	+ 4,0
50	+ 3,5	+ 2,8
40	+ 2,0	+ 1,7
20	0	0
0	- 0,5	- 1,0
< - 4	- 1,5	- 7,5

Tabel 1: Temperaturkorrektion.

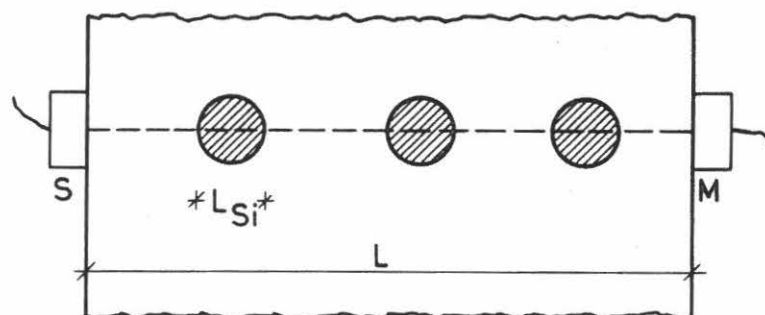
Man lægger mærke til den store korrektion ved frysning af vandmættet beton.

Fugtindhold

Er der fugt i betonen forøges lydshastigheden - mest for de svage betoner. Der regnes normalt med op til ca. 2% større hastighed i vandmættet beton end i almindelig tør beton.

Armering

Når man måler på beton er der ofte armering i nærheden. Da lydshastigheden i armeringen er større end i beton (5-6 km/s ~ 3-4 km/s), vil tilstedeværelse af armeringen betyde, at lyden løber dels i beton, dels i armering.



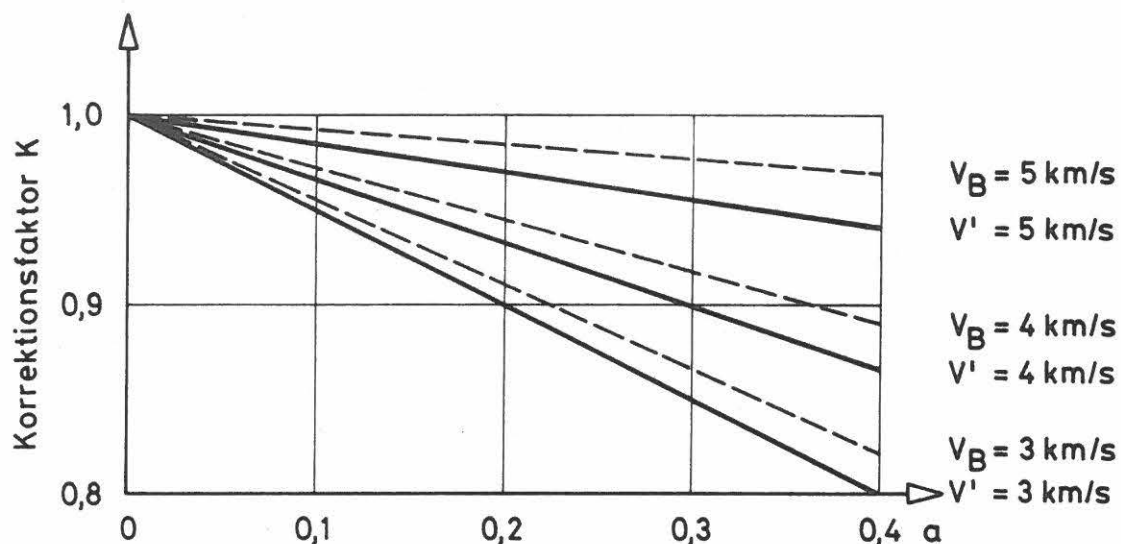
Figur 6. Måling med tværliggende armering.

Figur 6 viser situationen, når armeringen ligger på tværs af den retning ultralydmålingen foretages i. I dette tilfælde skal den direkte bestemte hastighed multipliceres med en faktor mindre end 1 for at få hastigheden i betonen. Denne faktor er givet i figur 7, hvor de to indgange er henholdsvis a = forholdet mellem vejlængde i stål $L_S = \sum L_{Si}$ og den totale længde L og enten den målte hastighed V' eller hastigheden V_B i betonen.

At figur 7 er rigtig ses af følgende: Kaldes lydshastigheden i betonen for V_B og i stål for V_S , vil den målte gennemløbstid T' være givet ved

$$T' = \frac{L_S}{V_S} + \frac{L - L_S}{V_B}$$

og den udregnede hastighed V' være



Figur 7. Korrektionsfaktor ved tværliggende armering.

$$V' = \frac{L}{T'} = \frac{L}{\frac{L_S}{V_S} + \frac{L - L_S}{V_B}} \quad (1)$$

Dette er kun rigtigt, hvis det forudsættes, at lyden løber igennem stålet som vist i figur 6. Korrektionsfaktoren i figur 7 er defineret som

$$K = \frac{V_B}{V'}$$

og ud fra (1) fås, idet $a = \frac{L_S}{L}$ indsættes, at

$$K = \frac{1 - a}{1 - a \cdot \frac{V'}{V_S}} \quad (2)$$

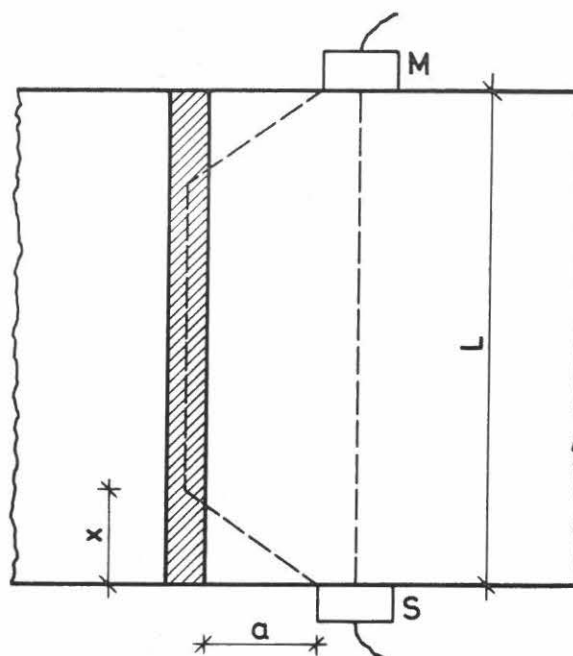
Som det ses, indgår V' i formlen (2). Har man på anden vis kendskab til V_B bliver

$$K = 1 - a \left(1 - \frac{V_B}{V_S}\right) \quad (3)$$

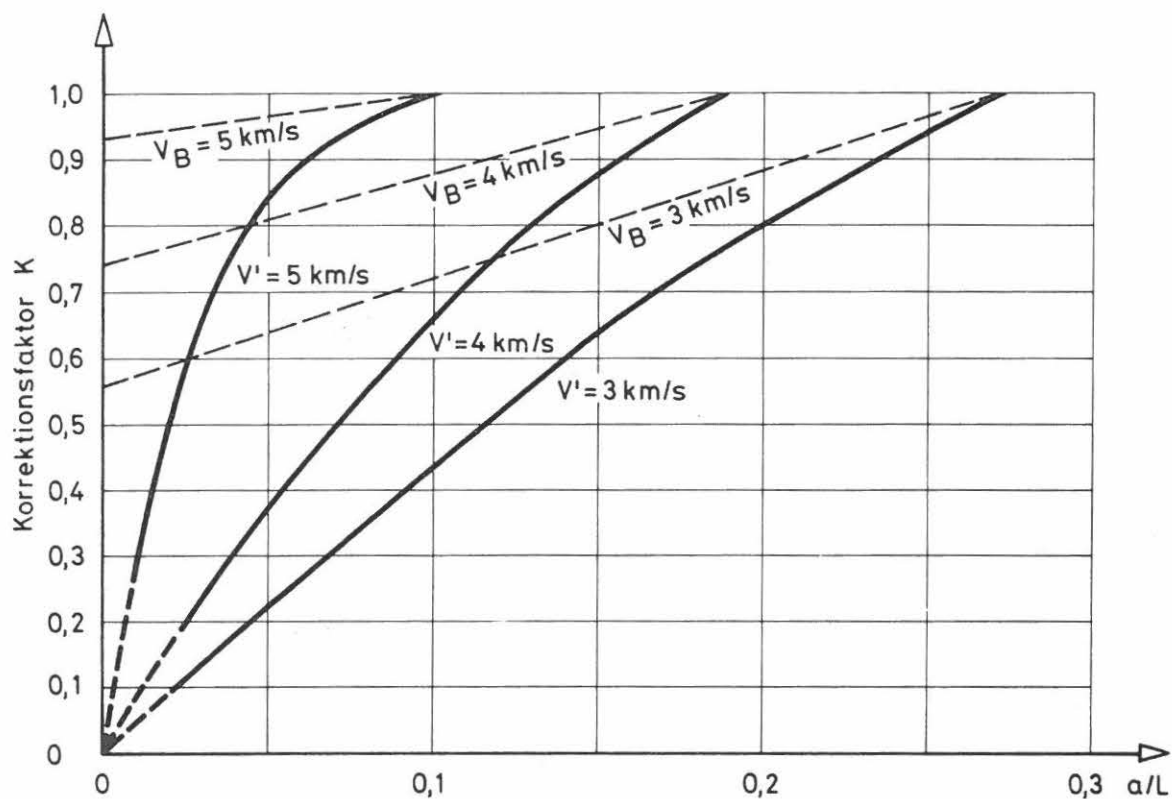
Kurver for konstante V' og V_B værdier er optegnet i figur 7.

Ligger armeringen derimod parallel med måleretningen, som vist på figur 8, vil lyden dels løbe i betonen, dels i jernet.

Figur 8. Måling med langsgående armering.



Figur 9 viser den korrektionsfaktor, den målte lydshastighed skal multipliceres med for at få hastigheden i betonen. Indgangene er forholdet a/L og den målte lydshastighed V' eller lydshastigheden i betonen V_B .



Figur 9. Korrektionsfaktor ved langsgående armering.

Betragtes figur 8, ses at gennemløbstiden T' er givet ved

$$T' = \frac{2\sqrt{a^2 + x^2}}{V_B} + \frac{L - 2x}{V_S}$$

Den tilsyneladende hastighed V' er givet ved

$$V' = \frac{L}{T'} = \frac{L}{\frac{2\sqrt{a^2 + x^2}}{V_B} + \frac{L - 2x}{V_S}}$$

og korrektionsfaktoren k er givet ved

$$\begin{aligned} k &= \frac{V_B}{V_1} = \frac{V_B}{L} \left(\frac{2\sqrt{a^2 + x^2}}{V_B} + \frac{L - 2x}{V_S} \right) \\ &= \frac{2}{L} \sqrt{a^2 + x^2} + \frac{V_B}{V_S} - \frac{2x}{L} \frac{V_B}{V_S} \end{aligned}$$

Afstanden x er givet ved, at T' er mindst mulig, d.v.s. at man kan finde denne minimumsværdi ved at differentiere T' med hensyn til x

$$\begin{aligned} \frac{dT'}{dx} &= \frac{2}{L} \frac{2x}{2\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{2}{L} \frac{V_B}{V_S} = 0 \text{ for} \\ x^2 &= \frac{a^2 \cdot V_B^2}{V_S^2 - V_B^2} \end{aligned}$$

og dermed $a^2 + x^2 = \frac{a^2 \cdot V_S^2}{V_S^2 - V_B^2}$

Minimumværdien for T' bliver da

$$T' = \frac{2a}{V_B} \sqrt{1 - \left(\frac{V_B}{V_S}\right)^2} + \frac{L}{V_S}$$

og k bliver da

$$k = \frac{2}{L} \cdot \frac{a \cdot V_S}{\sqrt{V_S^2 - V_B^2}} + \frac{V_B}{V_S} - \frac{2 \cdot V_B \cdot a \cdot V_B}{V_S \cdot L \cdot \sqrt{V_S^2 - V_B^2}}$$

eller $k = \frac{2a}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{V_B}{V_S}\right)^2} + \frac{V_B}{V_S}$ (4)

Indføres at $V_B = k \cdot V'$ fås

$$k = \frac{2a}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{kV'}{V_S}\right)^2} + \frac{kV'}{V_S}$$

$$\text{eller } k = \frac{V_S}{\sqrt{V'^2 + \left(\frac{L}{2a}\right)^2 (V_S - V')^2}} \quad (5)$$

Ligning (4) og (5) er afbildet i figur 9 for forskellige værdier for V_B og V' .

Hvis a bliver tilstrækkelig stor i forhold til L , løber lyden kun i betonen, d.v.s. stålets effekt forsvinder. Grænseværdier for $\frac{a}{L}$ kan beregnes således:

Gennemløbstiden er ifølge det foregående

$$T' = \frac{2a}{V_B} \sqrt{1 - \frac{V_B^2}{V_S^2}} + \frac{L}{V_S}$$

I grænsetilfældet er gennemløbstiden

$$T' = \frac{L}{V_B}$$

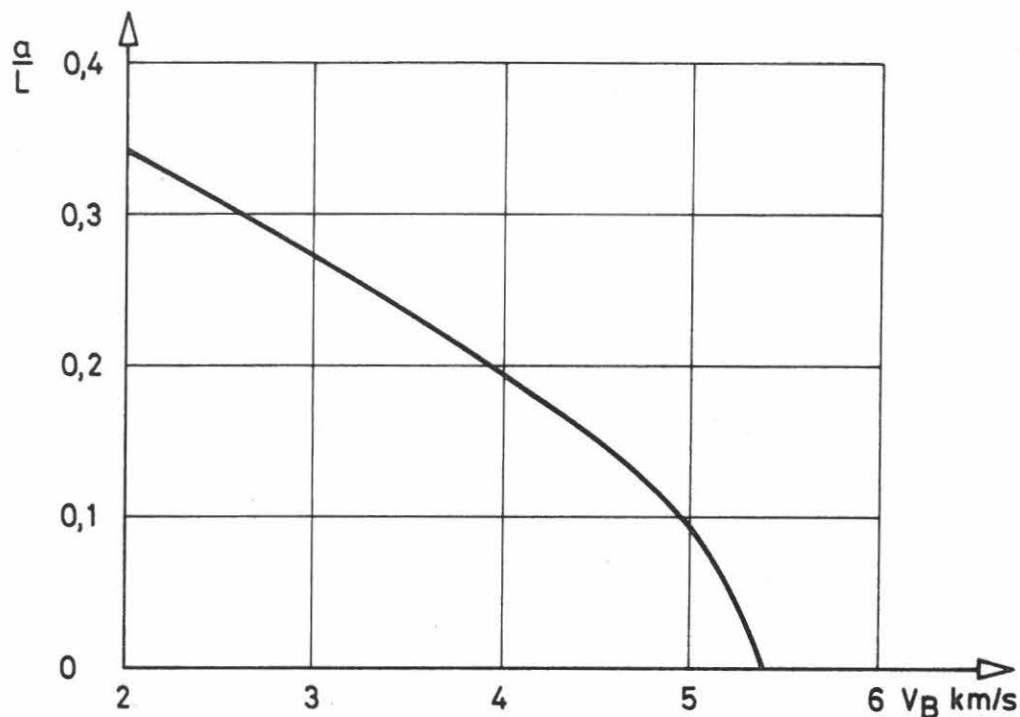
Sættes disse størrelser lig hinanden fås

$$\frac{2a}{V_B} \sqrt{1 - \frac{V_B^2}{V_S^2}} + \frac{L}{V_S} = \frac{L}{V_B}$$

$$\text{eller } \frac{2a}{V_B} \sqrt{1 - \frac{V_B^2}{V_S^2}} = L \left(\frac{1}{V_B} - \frac{1}{V_S} \right)$$

$$\text{d. v. s. } \frac{a}{L} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V_S - V_B}{V_S + V_B}} \quad (6)$$

For $V_S \approx 5,4$ km/s er denne ligning afbildet i figur 10.



Figur 10. Grænseværdi for $\frac{a}{L}$ ved langsgående armering.

Overfladelag

Ofte findes der et overfladelag, som ikke er så stærkt (homogent) som den underliggende beton. Med overflademethoden er det muligt at bestemme tykkelsen af et sådant lag. Figur 11 viser, hvordan man ved at fastholde senderen og flytte modtageren i bestemte trin kan optegne tids/afstandskurven. Til at begynde med løber lyden helt i den dårlige beton, men ved en bestemt afstand x_0 smutter lyden ned i det underliggende lag noget af vejen, hvilket viser sig som et knæk på kurven. Tykkelsen af det øverste lag er givet ved

$$t = \frac{x_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_B - V_b}{V_B + V_b}} \quad (7)$$

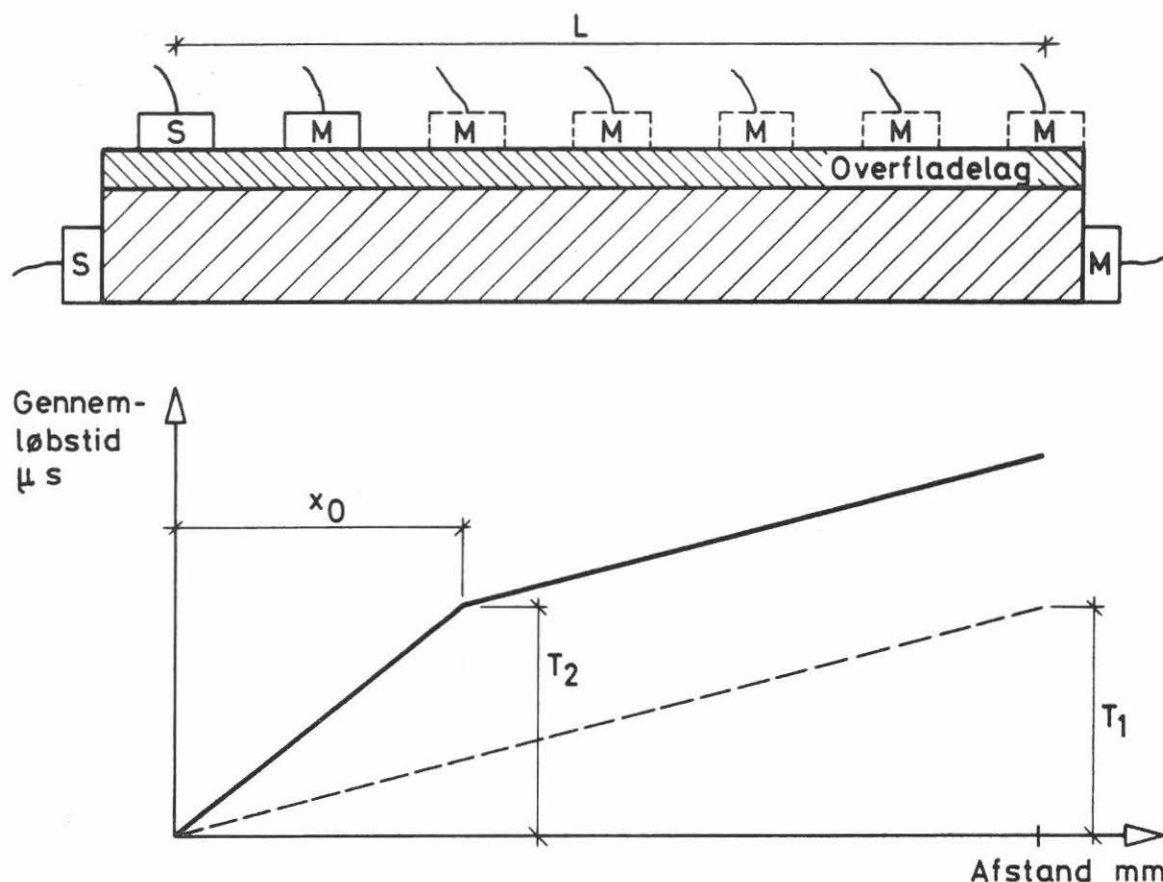
hvor V_B = lydhastigheden i den underste beton

V_b = lydhastigheden i den øverste beton

t = tykkelsen af det øverste lag

x_0 = afstand, hvor de to kurver skærer hinanden.

Udledningen af denne formel er helt analog med formel (6) for grænseværdier for $\frac{a}{L}$ ved langsgående armering.



Figur 11. Måling af overfladelag.

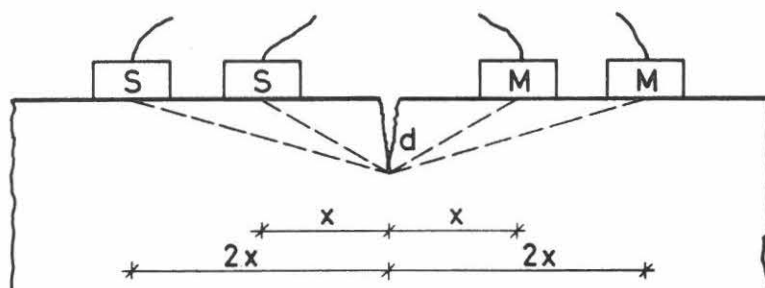
Det skal bemærkes, at kurvestykket efter x_0 ikke er helt retlinet, fordi der indgår både hastigheden i underbetonen og overladebetonen. En anvendelig værdi for V_B fås ved at parallelforskyde det flade kurvestykke, således at linien går igennem 0-punktet (vist som en punkteret linie). Ud fra figur 11 fås da, at

$$V_B = \frac{L}{T_1} \quad \text{og} \quad V_b = \frac{x_0}{T_2}$$

Hvis det er muligt, kan man bestemme V_B ved direkte måling som vist på figur 11.

Revner
.....

Revnedybder kan også bestemmes med overflademethoden. Figur 12 viser en situation med en revne i betonen.



Figur 12. Måling af revnedybde.

Placeres de to lydoveder henholdsvis i afstanden x og $2x$ fra revne, og er de to gennemløbstider T_1 og T_2 , vil hastigheden i betonen være givet ved

$$V_B = \frac{\sqrt{d^2 + x^2}}{T_1} = \frac{\sqrt{d^2 + (2x)^2}}{T_2}$$

d. v. s.

$$\underline{\underline{d = x \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}}}} \quad (8)$$

Kender man ikke revnens beliggenhed, kan man fastholde senderhovedet og flytte modtagerhovedet i bestemte afstande (sml. metoden til bestemmelse af overfladelag).

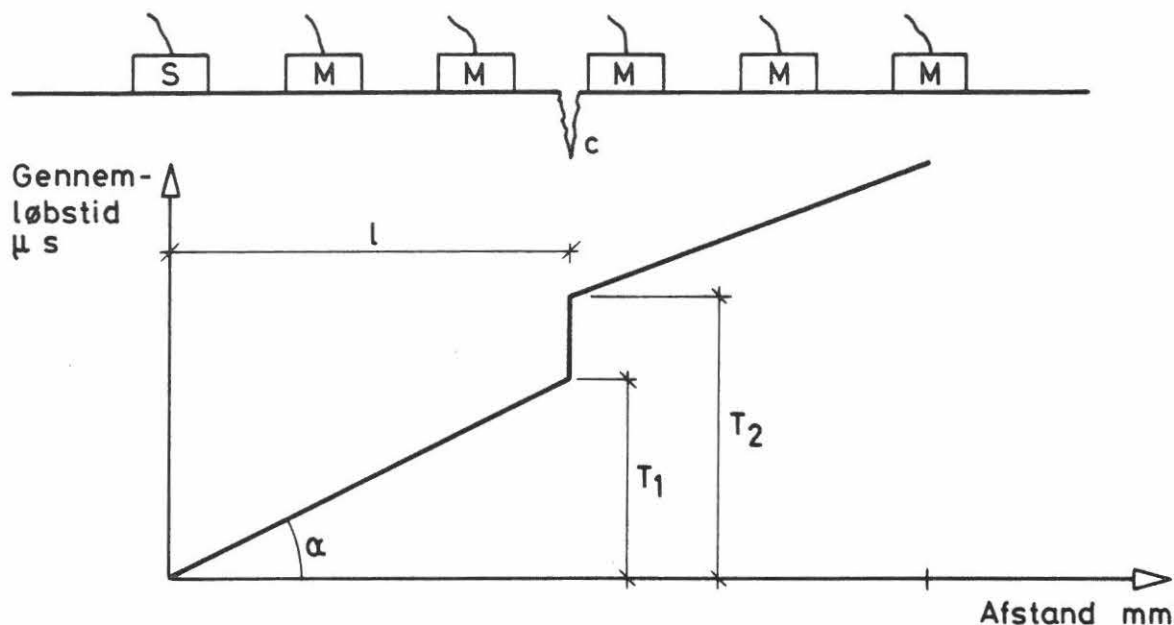
Til at begynde med løber lyden i overfladebetonen, men når modtageren er kommet over på den anden side af revnen bliver gennemløbstiden længere, fordi lyden løber ned omkring revnen. Er de to gennemløbstider før og efter revnen henholdsvis T_1 og T_2 , må det gælde, at

$$\frac{1}{T_1} = \frac{\sqrt{l^2 + c^2} + c}{T_2}$$

hvor l er afstanden fra senderhoved til revne, og c er revnedybde, se figur 13.

Her fås $1 \cdot \frac{T_2}{T_1} - c = \sqrt{l^2 + c^2}$

eller $\underline{\underline{c = \frac{1}{2} \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2} \right)}}$ (9)



Figur 13. Revnedybdebestemmelse.

I vejledninger ser man ofte følgende formel

$$c = \frac{T \cot \alpha}{2} \left(\frac{T \cot \alpha + 2l}{T \cot \alpha + l} \right)$$

som er fremkommet ved at sætte

$$T_2 = T_1 + T$$

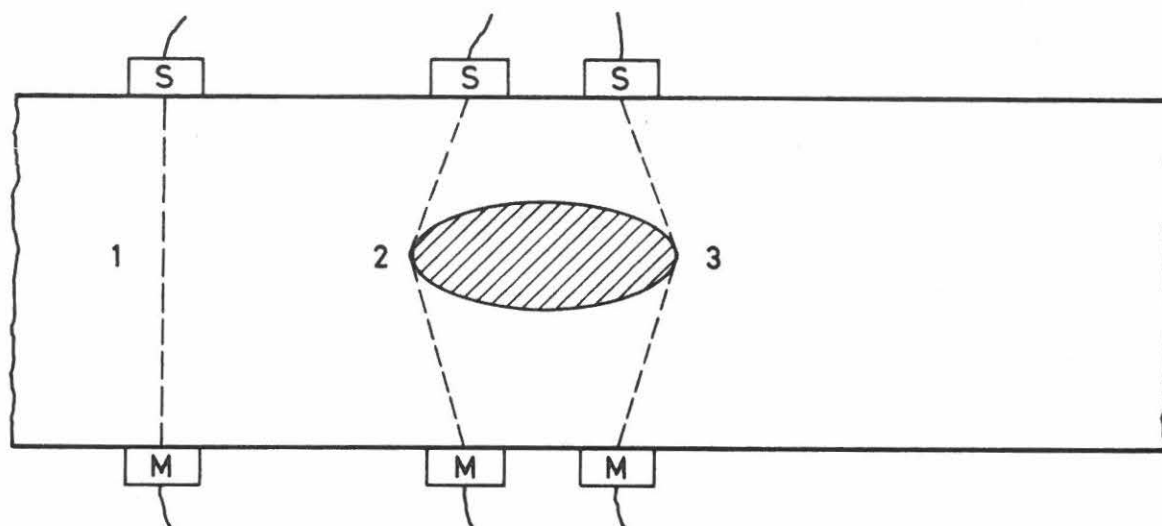
og $\cot \alpha = \frac{l}{T_1}$ i formel (9)

Forfatteren har udvirket, at denne formel (9) bliver indført i den nye udgave af manualen (31).

Fejl i beton

Ultralyd er velegnet til at finde områder i betonen, som er dårligt komprimeret. Ved undersøgelse af en konstruktion med bestemte prøvningsafstande kan man få optegnet niveaukurver, d.v.s. kurver med samme lydshastighed. Figur 14 viser et eksempel på, hvorledes man kan indkredse et hulrum i betonen.

Først bestemmes betonens lydshastighed ved at måle gennem tæt beton (1).



Figur 14. Hulrum i beton.

Ved at flytte sender og modtager mod højre, kan man opnå, at gennemløbstiden nu bliver større, fordi lyden smutter uden om forhindringen (2) og (3). Ved multiplikation af hastighed og gennemløbstid kan den aktuelle vejlængde bestemmes, og ved sammenligning med den målte afstand kan konturerne af hulheden optegnes. Af fejlkilder skal nævnes, at lyden godt i nogle tilfælde kan løbe igennem hulheden.

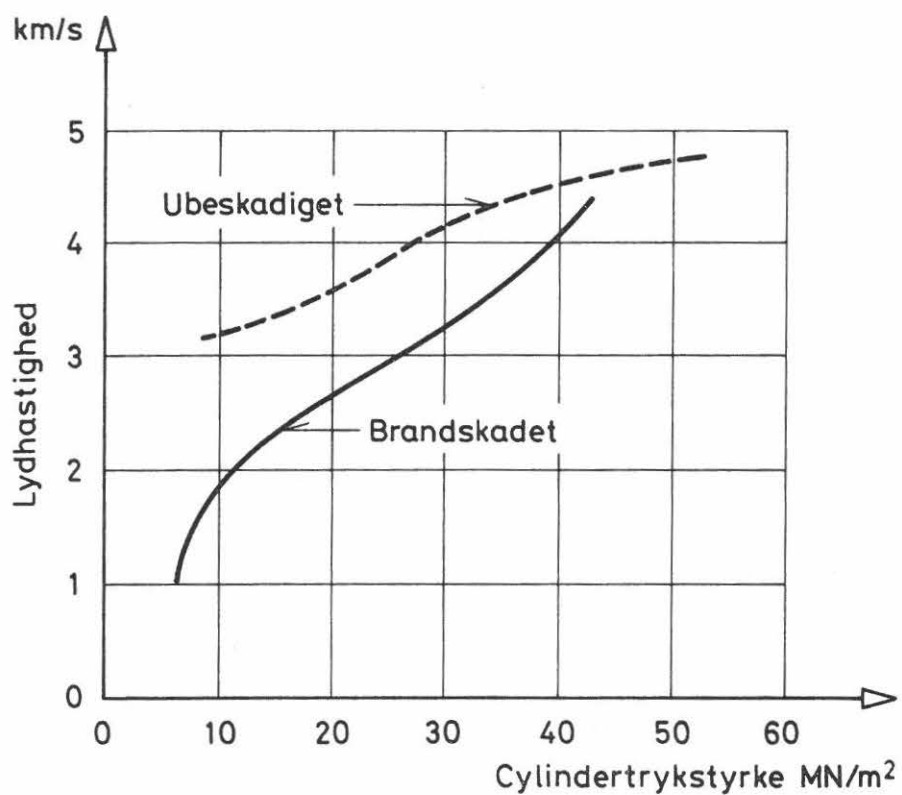
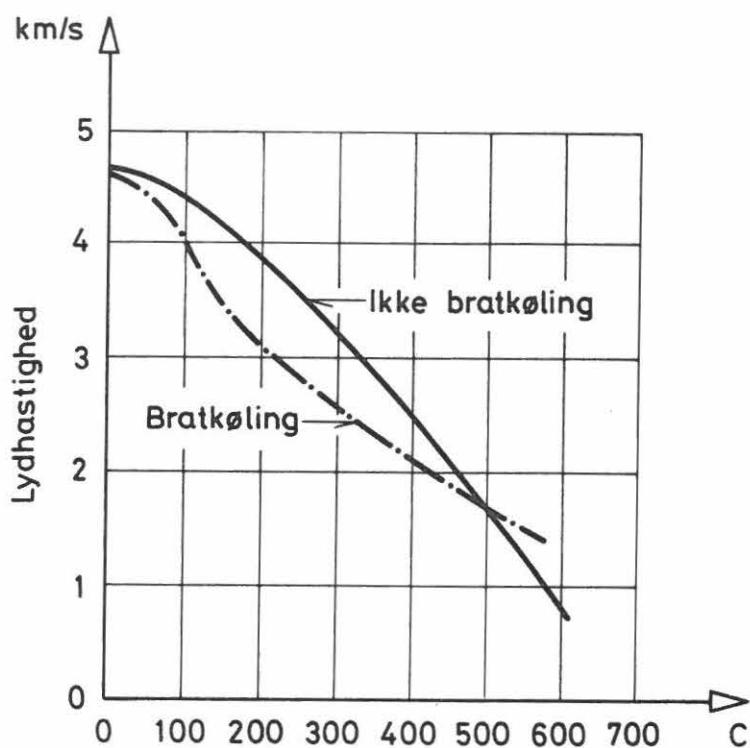
Holdbarhed

En vigtig anvendelse af ultralyd er undersøgelse af betons holdbarhed under påvirkning af klima m.m. Udsættes betonen for f. eks. frysning og optøning, havvandsangreb, brand eller lignende vil en nedbrydning af betonen betyde, at lydhastigheden formindskes d. v. s. gennemløbstiden forøges.

Figur 15 viser, hvorledes en brandskadet betons lydhastighed ændrer sig med den maksimale temperatur med og uden bratkøling. Figur 16 viser, hvorledes brandskadet betons lydhastighed afhænger af styrken i betonen.

Lydhastighedsmålingen er velegnet til at registrere ødelæggelser af betonen, når den udsættes for frysning og optøning. Det er bl. a. muligt at undersøge, hvornår de største skader sker på betonen.

Figur 15.
Brandskadede betons lydhastighed i afhængighed af max. temperatur.



Figur 16. Brandskadede betons lydhastighed i afhængighed af styrken.

Belastning

I litteraturen (8) (35) er beskrevet, hvorledes man kan foretage målinger på prøvelegemer under belastning. Man kan observere, at lyd hastigheden falder, efterhånden som belastningen stiger, og ved fremkomsten af revner kommer der karakteristiske knæk på kurven.

Elasticitetsmodul

Når en lydbølge går igennem beton, går den dels igennem cementpastaen, dels selve tilslaget. Betonens stivhed er sammensat af bidrag fra cementpastaen og tilslaget. Cementpastaen ændrer egenskaber med tiden, og dens stivhed er på et tidligt tidspunkt fortrinsvis bestemt af C/V-forholdet. Tilslagets stivhed antages at være konstant i tiden. Alt i alt må lyd hastigheden målt på et bestemt tidspunkt - foruden af cementtype og tilslagstype - afhænge af C/V-forholdet samt de relative mængder af betonens bestanddele. Hertil kommer den sædvanlige afhængighed af temperatur, fugt etc.

I det følgende betragtes betonen som et system bestående af

Cementpasta
Luft
Sand
Sten

Den målte lyd hastighed V_b gennem betonen vil være givet ved

$$\frac{1}{V_b} = \frac{\alpha}{V_{sa}} + \frac{\beta}{V_{st}} + \frac{\gamma}{V_{lu}} + \frac{1 - (\alpha + \beta + \gamma)}{V_p}$$

hvor α , β og γ er volumenandelene af sand, sten og luft.

V_{sa} , V_{st} , V_{lu} og V_p er lyd hastighederne i henholdsvis sand, sten, luft og pasta. Her er de tre første ofte kendte størrelser.

Ud fra denne ligning fås

$$V_p = \frac{[1 - (\alpha + \beta + \gamma)] \cdot V_b}{1 - \left(\frac{\alpha}{V_{sa}} + \frac{\beta}{V_{st}} + \frac{\gamma}{V_{lu}} \right) V_b} \quad (10)$$

Består betonen af

C kg cement
 W kg vand
 Sa kg sand
 St kg sten
 L liter luft

pr. volumenenhed bliver

$$\alpha = \frac{\frac{Sa}{\rho_{sa}}}{\frac{C}{\rho_c} + \frac{W}{\rho_w} + \frac{Sa}{\rho_{sa}} + \frac{St}{\rho_{st}} + L}$$

$$\beta = \frac{\frac{St}{\rho_{st}}}{\frac{C}{\rho_c} + \frac{W}{\rho_w} + \frac{Sa}{\rho_{sa}} + \frac{St}{\rho_{st}} + L}$$

$$\gamma = \frac{L}{\frac{C}{\rho_c} + \frac{W}{\rho_w} + \frac{Sa}{\rho_{sa}} + \frac{St}{\rho_{st}} + L}$$

Massefylderne for sand, ρ_{sa} og sten, ρ_{st} er givet, og massefylden af pastaen, ρ_p kan udregnes til

$$\rho_p = \frac{\rho_0 - (\alpha \rho_{sa} + \beta \rho_{st})}{1 - (\alpha + \beta + \gamma)} \quad (11)$$

hvor ρ_0 er betonens massefylde.

Forsøg (29) viser, at der er en god sammenhæng mellem det dynamiske E-modul E_d og stivhedsmodulet E_s defineret som

$$E_s = \rho \cdot V^2$$

hvor ρ er massefylden og
 V er lydhastigheden.

Sammenhængen er givet ved

$$E_d = 0,097 \cdot E_s^{1,2} \quad (E \text{ N/mm}^2)$$

Det betyder, at man med kendskab til ρ og V kan bestemme E_d for de enkelte komponenter i betonen, og betonens E-modul kan bestemmes af de sædvanlige formler

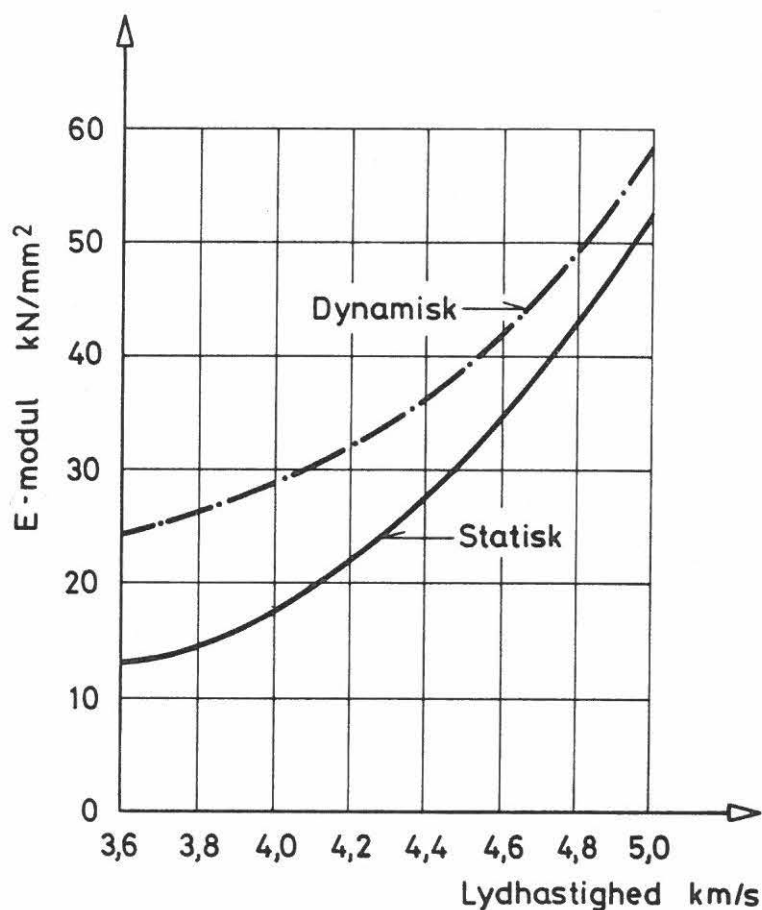
$$\frac{1}{E_B} = \frac{\alpha}{E_{sa}} + \frac{\beta}{E_{st}} + \frac{\gamma}{E_{luft}} + \frac{(1 - (\alpha + \beta + \gamma))}{E_p} \quad (12)$$

Figur 17 viser, hvorledes det dynamiske af det statiske E-modul varierer med lydhastigheden.

For de to kurver gælder følgende formler

Lydhastighed km/s	Statisk E-modul	Dynamisk E-modul
$V_b \leq 4,2$	$0,90 e^{0,76 v}$	$0,19 e^{1,13 v}$
$V_b > 4,2$	$5,17 e^{0,44 v}$	$1,30 e^{0,76 v}$

Figur 17. Dynamisk og statisk E-moduls afhængighed af lydhastigheden.



Måler man lydhastigheden i betonplader eller massiv beton, indgår som bekendt Poissons forhold i formlerne til beregning af E-modulet. Da dette forhold ofte ikke er kendt, anvendes lydhastigheden alene til beskrivelse af betonkvaliteten. Følgende vejledende grænser kan da opstilles for kvaliteten:

Lydhastighed km/s	Betonkvalitet	Styrke MN/m ²
> 4,3	Meget god	> 30
3,9 - 4,3	God	30
3,4 - 3,9	Mindre god	18
3,0 - 3,4	Dårlig	10
< 3,0	Meget dårlig	7

Styrke

Ultralydmålinger til bestemmelse af en betons styrke er ikke så simpel en sag. Mange forsøg omtalt i litteraturen bekræfter, at man kan udtrykke styrken som

$$\sigma = k v^n \quad \text{evt. } (k_1 v + k_2)v^n$$

eller
$$\sigma = k_3 e^{k_4 v}$$

hvor σ er styrken, f. eks. cylinderstyrken

k-erne er konstanter afhængig af betontype m.m.

v er lydhastigheden

n er eksponent.

Med kendskab til disse sammenhænge kan man ved undersøgelse af et bygværk, ofte ved hjælp af udborede cylindre eller prøvelegemer, der har været gemt, fastlægge konstantværdierne. Dette sker ved først at foretage en lydmåling på prøvelegemerne og dernæst trykprøve disse. Samhørende værdier mellem styrke og lydhastighed afbildes, og konstanterne bestemmes. Ved en inspektion af bygværket med ultralyd kan de udregnede hastigheder omsættes til styrke, og der kan optegnes kurver med samme styrke. Herved kan dårlige områder indkredses.

Făcăoaru (14) har udviklet en metode, hvorefter man kan beregne betonstyrken ud fra lydmålinger. Ud fra forsøg med betoner med forskellig sammensætning kan man fastlægge betonstyrken som

$$\sigma = K \cdot \sigma_1, \text{ hvor } K = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5$$

hvor σ_1 er styrken af en udgangsbeton

og k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 er korrektionsfaktorer for cementdosering, cementtype, d_{\max} , fillerindhold, tilslagstype.

Vælges udgangsbetonen med et cementindhold på 300 kg/m^3 almindelig portlandcement, 32 mm største stenstørrelse, 12% mindre end 1 mm og almindelige sø- og bakkematerialer bliver $K = 1$. Korrektionsfaktoren stiger med stigende cementindhold, mere hurtighærdende cement, faldende d_{\max} og stigende fillerindhold.

Brunarski (3) har lavet en ret elegant metode, hvor man i diagramform ud fra målte lyd hastigheder kan bestemme trykstyrke under hensyntagen til vand/cement-forhold, tilslagsmængde, arten af tilslag, kornkurvebeliggenhed, armeringsmængde i måleretningen, betonens alder, lagringsmåde samt prøvelegemetype.

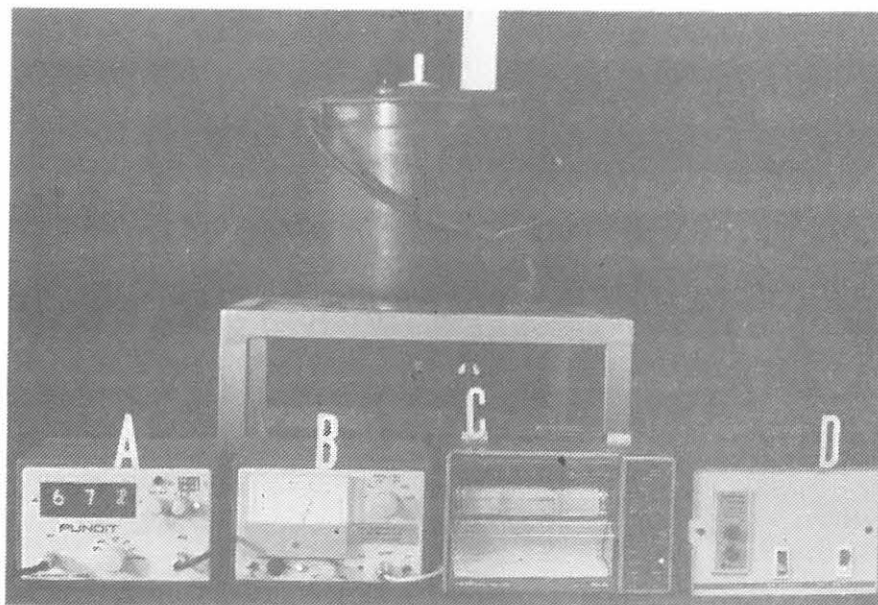
Frisk beton

En interessant anvendelse af ultralydmålinger er forhåndsbestemmelse af en betons trykstyrke. I litteraturen (12) er beskrevet, hvorledes man kan opnå gode relationer mellem trykstyrken og lyd hastigheden gennem betonen målt efter 24 timers lagring. Sammenhængen har formen

$$\log \sigma_c = k_1 \cdot v_{24} + k_2$$

Figur 18 viser et billede af den opstilling, som er anvendt til kontinueret lydmåling på frisk beton.

Selve PUNDIT'en (A) er forbundet med en analogenhed (B), hvis formål er at omsætte digitaludlæsningen til et elektrisk signal, som kan føres til en skriver (C). Hertil er anvendt en PHILIPS miniskriver PM 8110, som har en rimelig nøjagtighed og en tilstrækkelig langsom papirhastighed (2 cm/h og 8 cm/h).



Figur 18. Opstilling til lydmåling på frisk beton.

(A) og (B) styres af en enhed (D), som tænder og slukker for strømmen i på forhånd indstillelige tidsrum. Resultatet af lydmålingen kommer ud som et søjlediagram, og de aflæste tider omsættes til lydhastigheder, der kan afbildes som funktion af klokketiden.

Resultater af sådanne forsøg er omtalt senere.

UDTRÆKSMETODER

Princippet i disse metoder er, at man i betonen indstøber en bolt eller plade ved at fastgøre den med et afstandsstykke på indersiden af formen. Efter den fornødne lagring udtrækkes boltene (pladen) fra betonen, og den målte brudkraft er et udtryk for betonens styrke det pågældende sted. Det er muligt at korrelere udtrækskraften med styrken af normprøvelegemer eller udborede cylindre (25) (27) (36).

Hovedsigtet med disse metoder er at kunne måle betonens styrke i selve konstruktionen samt at kunne bestemme afformningstidspunkter. Dette sker ved at prøvebelaste indstøbte bolte med en kraft svarende til den styrke, som betonen skal have inden afformning. Hvis betonen ikke er tilstrækkelig stærk, vil boltene blive trukket ud af betonen.

I tidens løb er der blevet foreslået mange udformninger af denne metode. I det følgende skal der gøres nærmere rede for brugen af et dansk udtræksapparat kaldet LOK-TEST apparatet (25).

Lok-test apparat

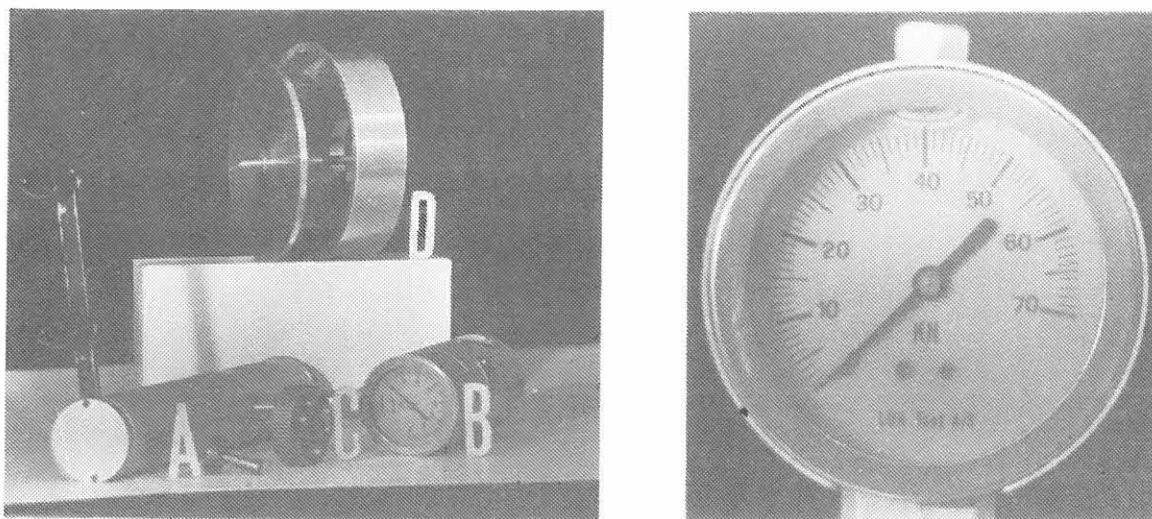
Figur 19 viser et sådant apparat.

Proceduren er den, at man indstøber bolte (A) i betonen ved at fastgøre disse på indersiden af forskallingen. Der findes forskellige fastgørelsesmåder til brug ved stålforme, træforme eller til overfladelag. Betonen udstøbes og lagres, og på det ønskede tidspunkt belastes boltene med en kraft vinkelret på formsiden. Denne kraft overføres fra det specielle udtræksapparat (B) via en kobling (C) til boltene og aflæses i kN (0 - 70 kN)

Omfattende forsøg har godtgjort, at der findes en lineær sammenhæng mellem bolteudtrækskraften L i kN og betonens cylindertrykstyrke σ_c i MN/m^2 . For Lok-test apparatet er opgivet, at

$$\underline{L = 0,8 \cdot \sigma_c + 5}$$

Det kan synes mærkeligt, at man ved at trække en bolt ud kan bestemme en betons trykstyrke. Der skal i den forbindelse henvises til en redegørelse (18), hvor man netop har undersøgt brudbetingelser-



Figur 19. LOK-TEST apparat.

ne i den aktuelle situation. Man kommer her frem til, at med de dimensioner, der er på modholdet, fremkommer der et trykbrud. Ønsker man et trækbrud, skal modholdet gøres større i diameter. På figur 19 viser D et sådant med diameter = 162 mm. Størrelsen er beregnet svarende til, at der kan ske trækbrud i betonen.

Anvendelse

Overalt hvor man har brug for at vide noget om styrken i konstruktionen, kan apparatet anvendes. Metoden må siges at være ikke-destruktiv, fordi der kun ved udtræk af bolten efterlades et mindre hul, som kan repareres. Ofte trækkes bolten slet ikke ud, f.eks. ved undersøgelse af afformningstidspunktet. Udtrækningsmetoden anvendes ofte til vejbelægninger, startbaner m.m.

Forsøg

Udtræksapparatet kan anvendes til flere forsøgstyper. Her skal nævnes:

1. Måling af styrke i betonkonstruktioner.

Det er velkendt, at betonen i en konstruktion ikke har samme styrke som de prøvelegemer, man normalt anvender til eftervisning af styrken. Det skyldes forskellige hærdningsbetingelser, geometriske forhold m.m.

Ved indstøbning af bolte i betonen kan man senere trække dem ud og ved sammenligning med f.eks. udborede cylindres styrke kan man finde styrkefordelingen i konstruktionen. Der henvises til (1), hvor omfattende forsøg er beskrevet.

2. Sekundære spændingers indflydelse på lok-styrken.

Formålet skulle være at undersøge, om lok-styrken ændres ved, at der påføres sekundære spændinger i prøvningszonen. Dette kan ske ved at påføre terninger en spænding svarende til f.eks. 2, 5, 10, 20, 50 og 85% af brudspændingen målt på tilsvarende cylindre. Efter belastningen udtrækkes en bolt, og en anden bolt udtrækkes efter aflastning af terningen.

Der igangsættes sådanne forsøg i løbet af efteråret.

3. Gentagne belastningers indflydelse på betons styrke.

Der kan argumenteres for, at en beton sjældent bliver belastet til mere end 85% af brudstyrken.

Dette kan undersøges ved at trække 2 indstøbte bolte ud af betonen og dernæst belaste 2 andre bolte med 85% af den målte belastning. Efter en time trækkes den ene bolt ud og den anden belastes yderligere 2 gange med 85% heraf, inden den trækkes helt ud. Brudlasterne sammenlignes.

Forsøg er gjort hermed, og resultatet fremgår af afsnittet "eksperimentelle undersøgelser".

4. Undersøgelse af muligheden for bestemmelse af betons trækstyrke.

Som anført kan man få et trækbrud frem ved at gøre modholdet større i diameter. Ved at sammenligne udtrækskraften med det store modhold med spaltetrækstyrken kan man måske finde en fornuftig relation.

Forsøg er gjort hermed, og resultatet fremgår af afsnittet "eksperimentelle undersøgelser".

EKSPERIMENTELLE UNDERSØGELSER

I laboratoriet er udført en række forsøg med det formål at få et indblik i de ikke-destruktive metoders egnethed til bestemmelse af betons styrke. Endvidere er enkelte emner som nævnt tidligere taget op til en mindre undersøgelse.

Til forsøgene er fremstillet beton af HPC, bakkesand og søsten ($d_{\max} = 16$ mm) med konstant sand/sten forhold samt tilstræbt konstant vandindhold i betonen. Forskellige styrkeniveauer er opnået ved ændring af cementmængden.

Der er udstøbt 15/30 cm cylindre og 20 cm terninger, som er normlagrede. I terningerne er indstøbt 2 testbolte, som kan trækkes ud henholdsvis med lille og stort modhold. På de lodrette terningsider er der anvendt Schmidt hammeren, og ultralydhastigheden er målt både på cylindre og terninger.

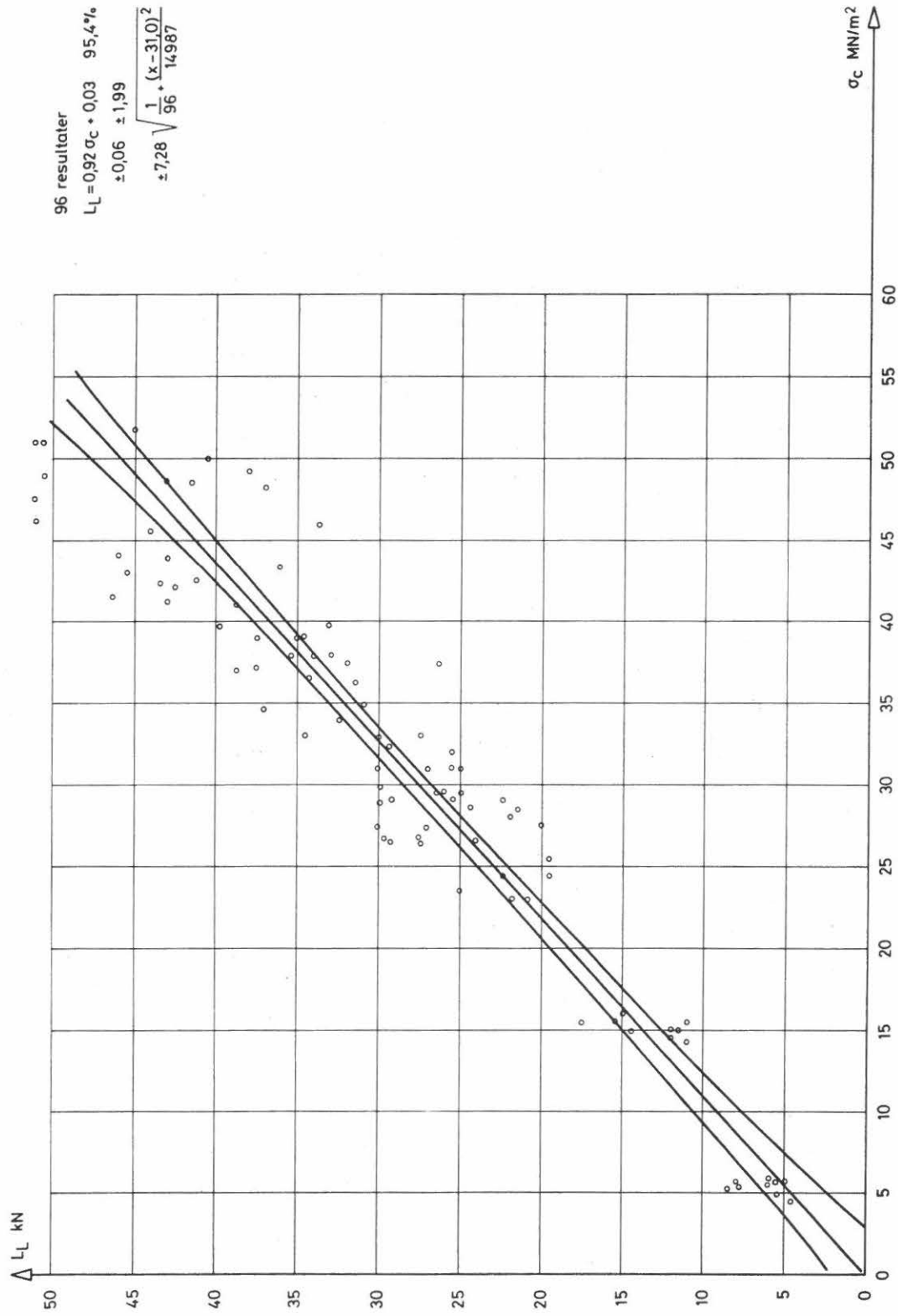
Der foreligger flere forsøgsserier, og samtlige resultater er tilgængelige, men indgår ikke i rapporten. I stedet er optegnet nogle af de interessante sammenhænge, som er konstateret, og der er foretaget statistiske beregninger på talmaterialet (EDB).

På de følgende figurer (20-27) ses resultaterne heraf, idet L_L og S_L er henholdsvis lok-test med lille og stort modhold, H er Schmidt-tallet, v er ultralydhastigheden og σ_c og σ_{sp} henholdsvis cylindertrykstyrken og spaltetrækstyrken.

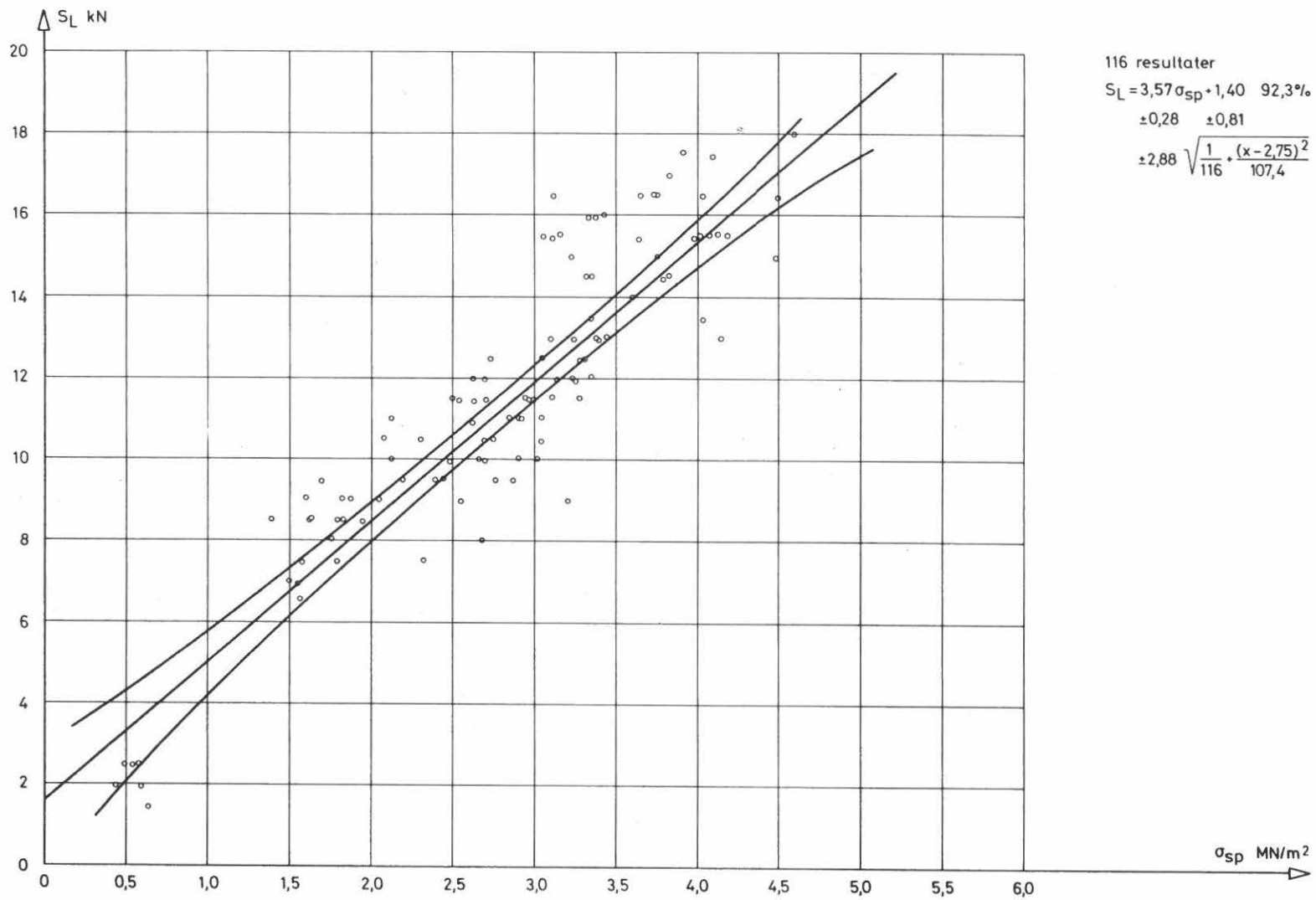
På figurerne er anført

- antal resultater
- regressionslinie
- regressionskoefficient
- konfidensintervaller for koefficienterne
- konfidensinterval for regressionslinien.

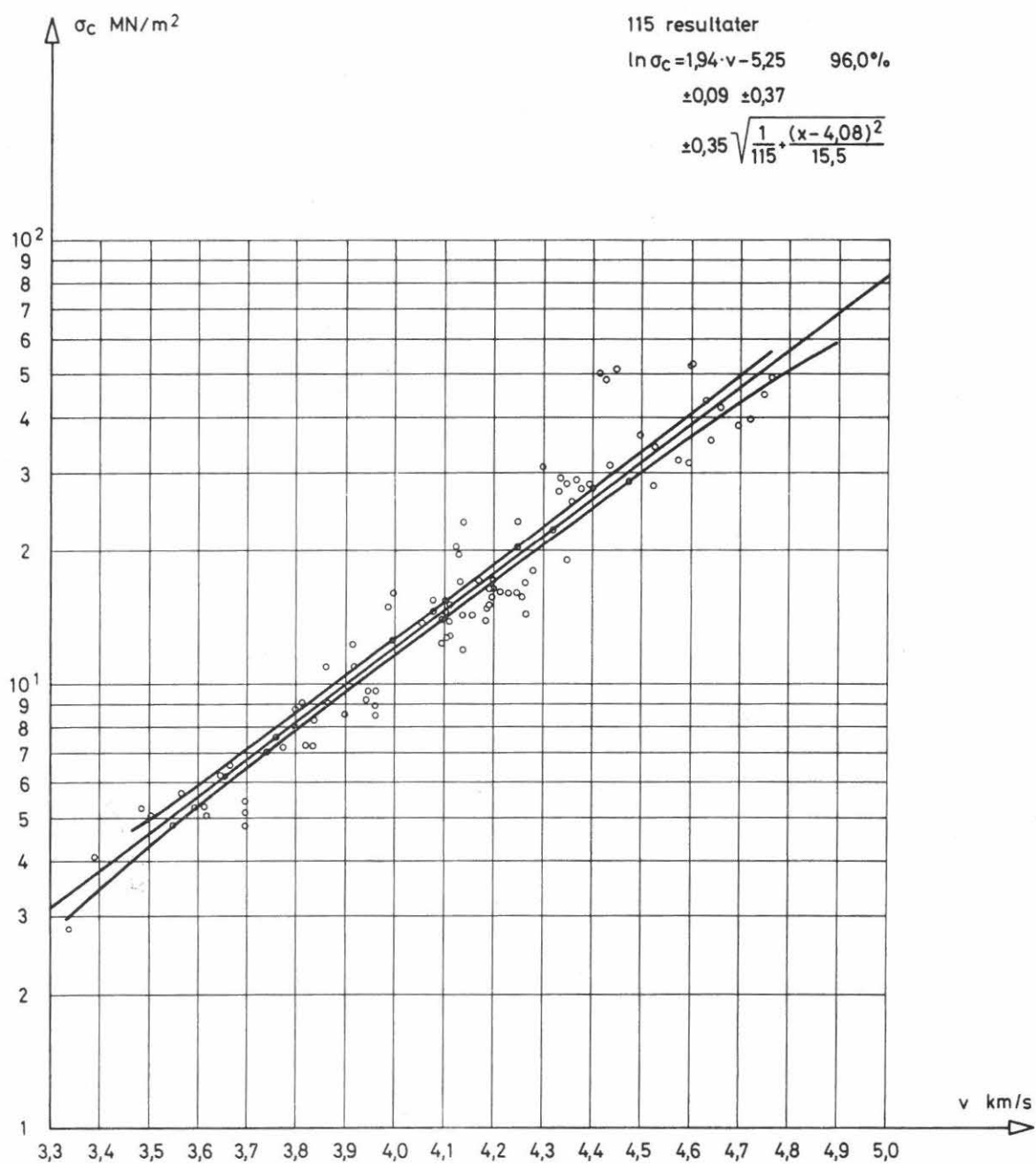
Som det ses af figurerne, er der en ganske god korrelation mellem de indgåede størrelser. Dog må det anføres, at korrelationen er dårligere for spaltetrækstyrke end for trykstyrke, hvilket man kan forvente, da spaltetrækstyrken normalt er dårligere bestemt end trykstyrken.



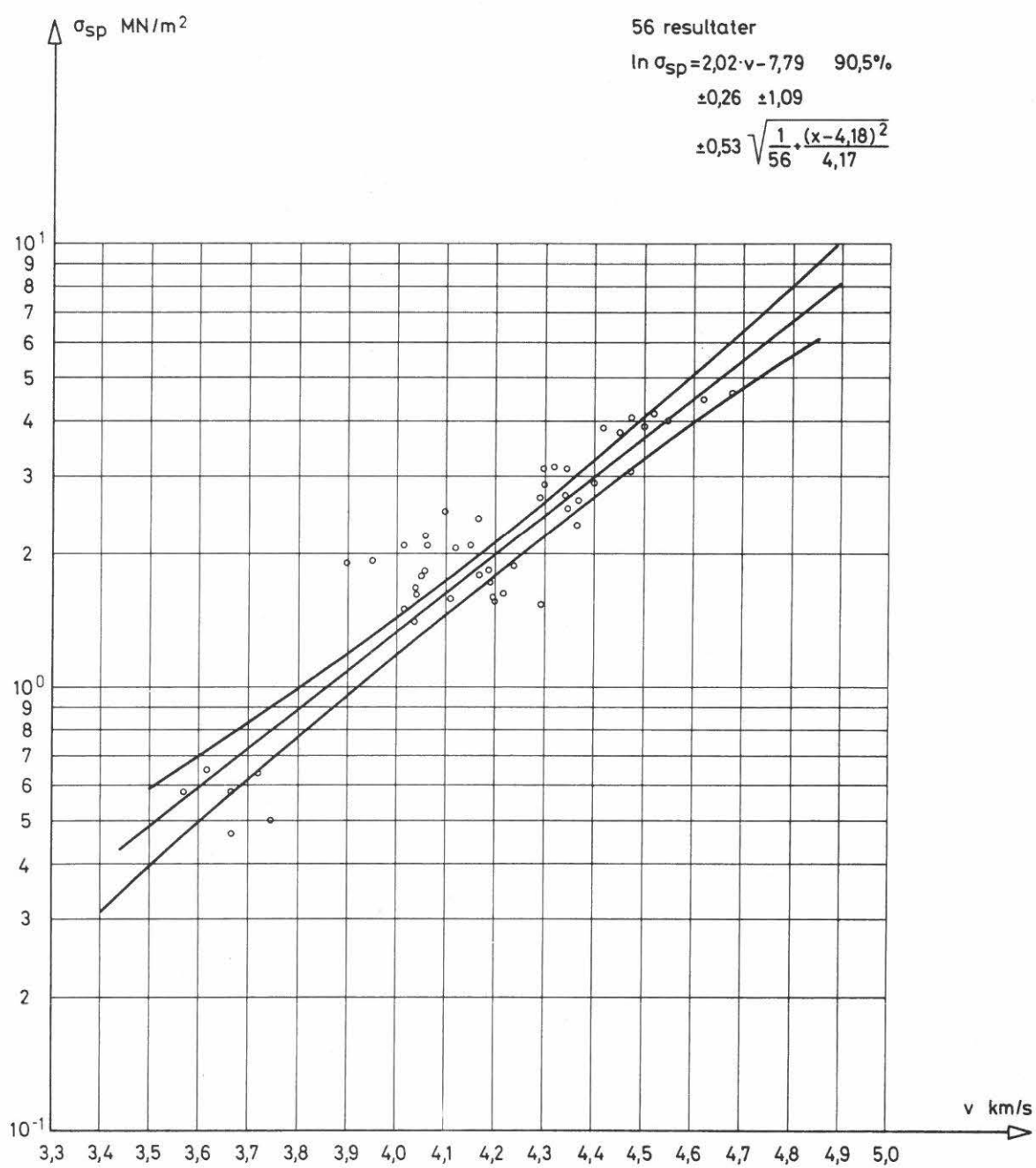
Figur 20. $L_L \sim \sigma_c$.



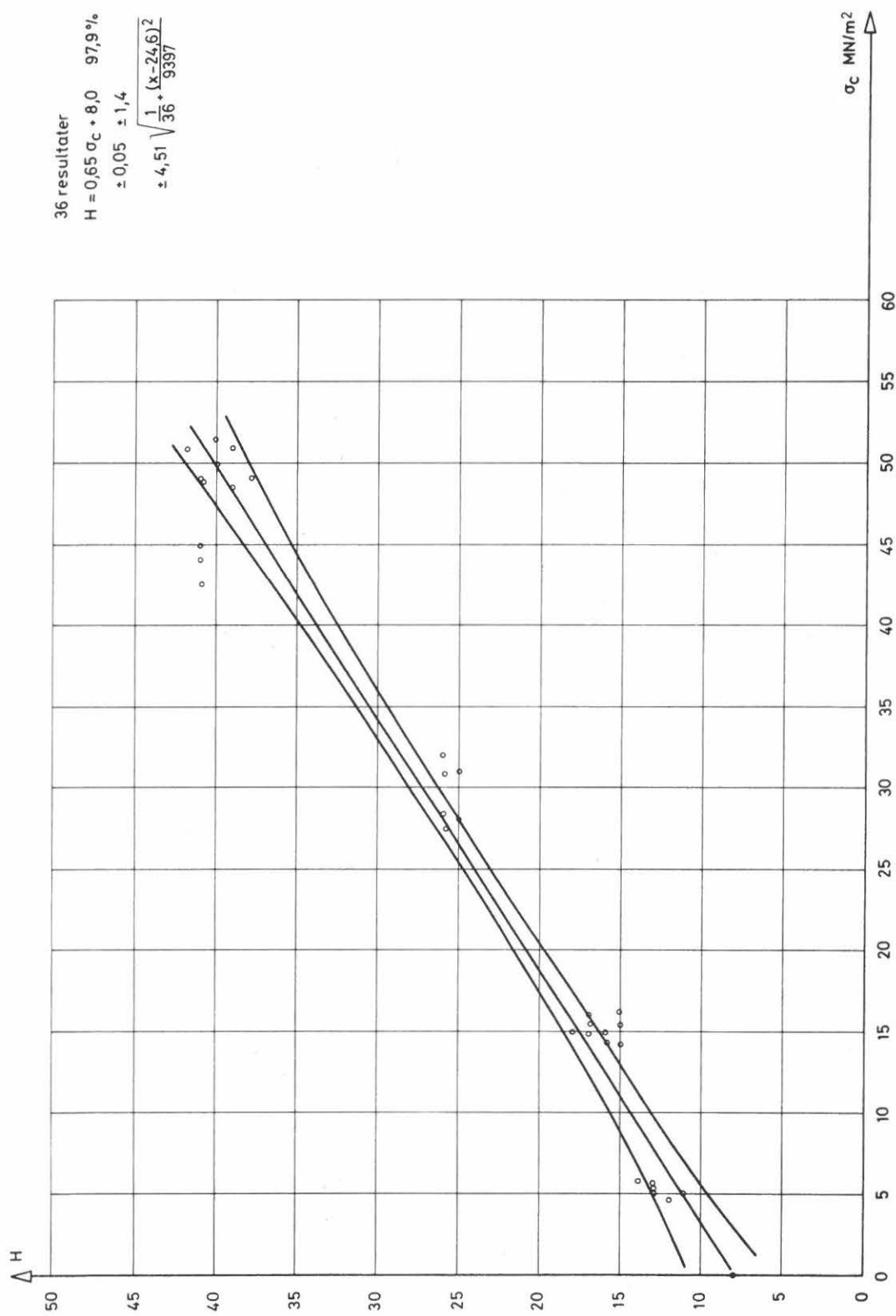
Figur 21. $S_L \sim \sigma_{sp}$



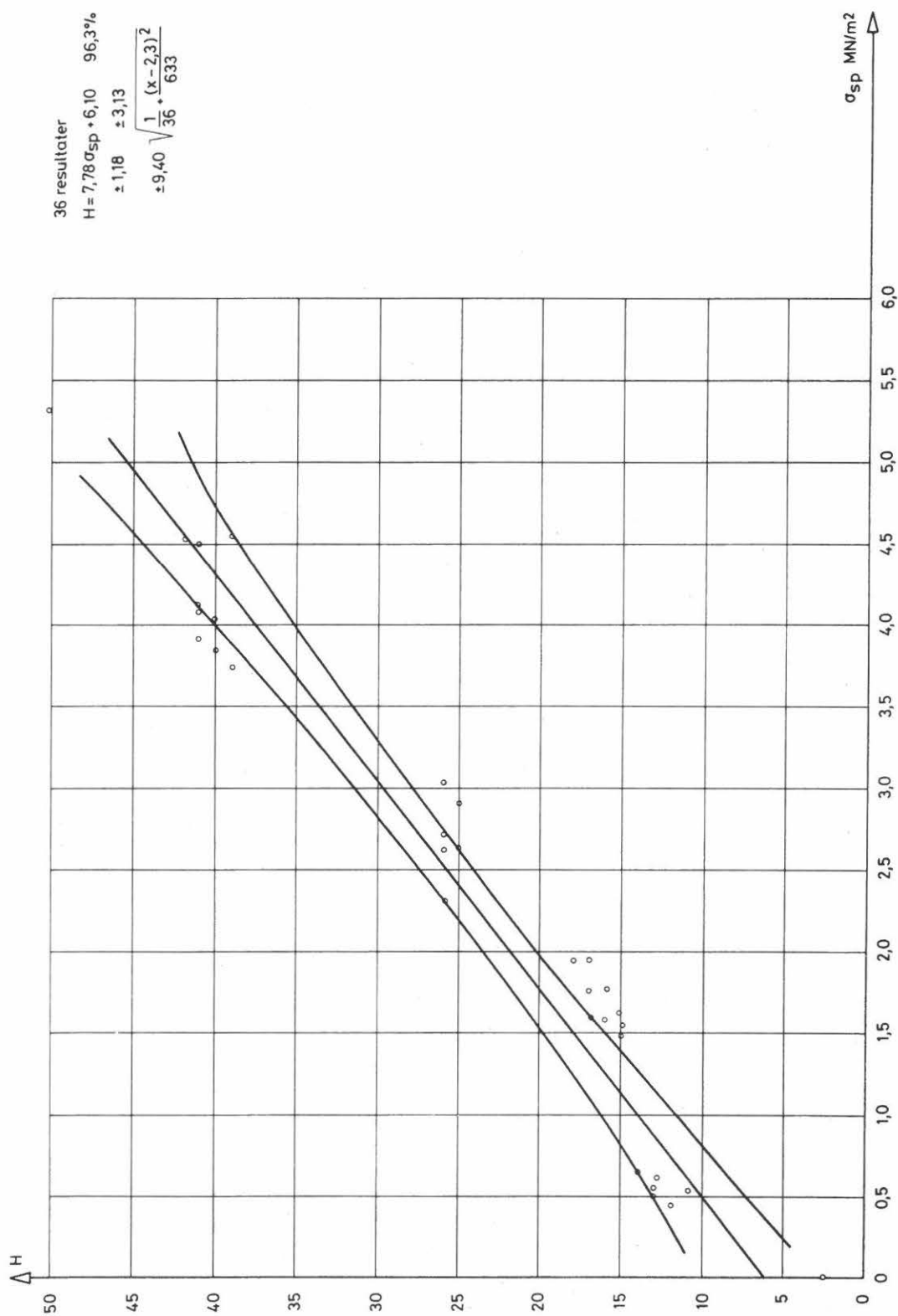
Figur 22. $\ln \sigma_c \sim v$.

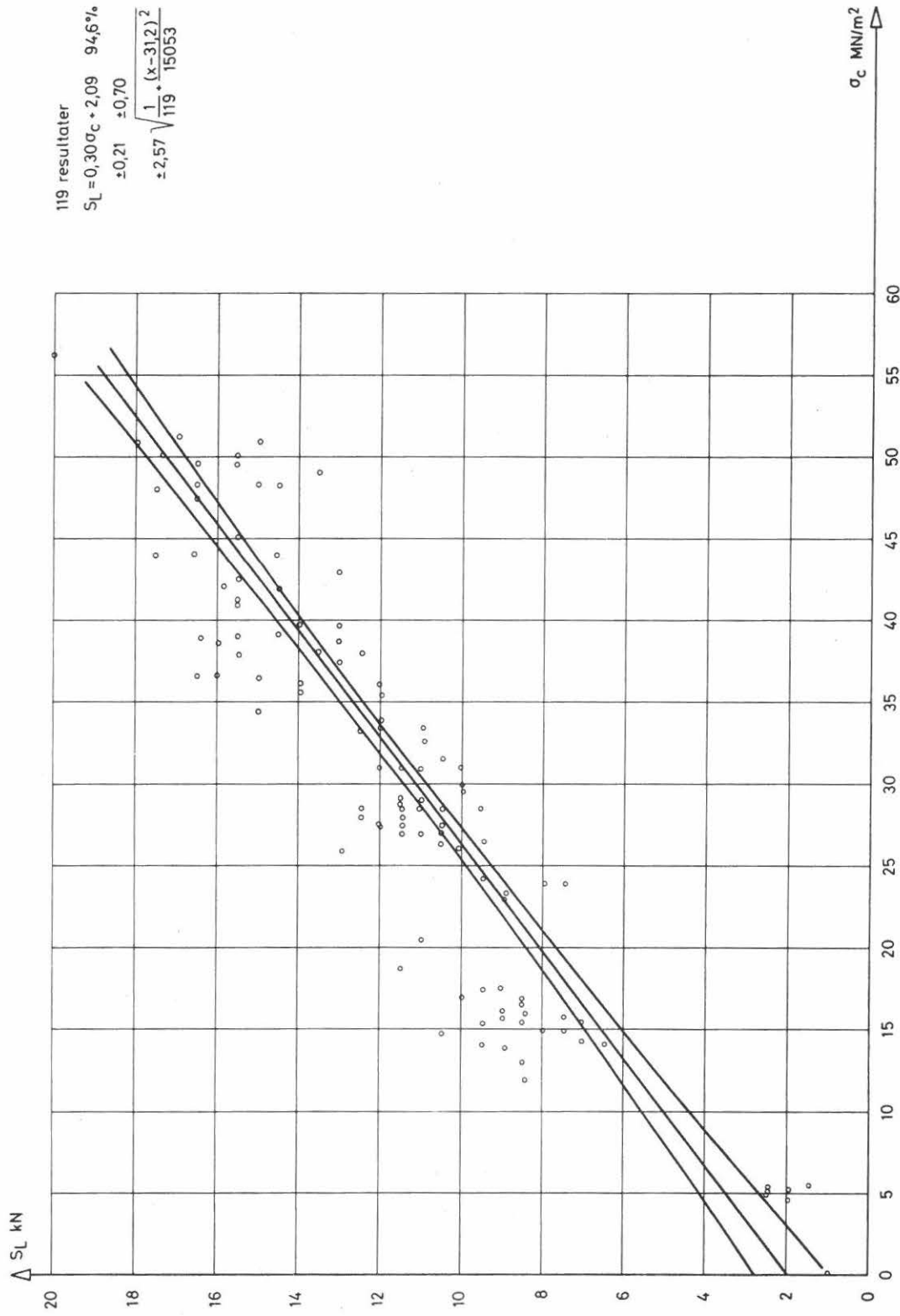


Figur 23. $\ln \sigma_{sp} \sim v$.

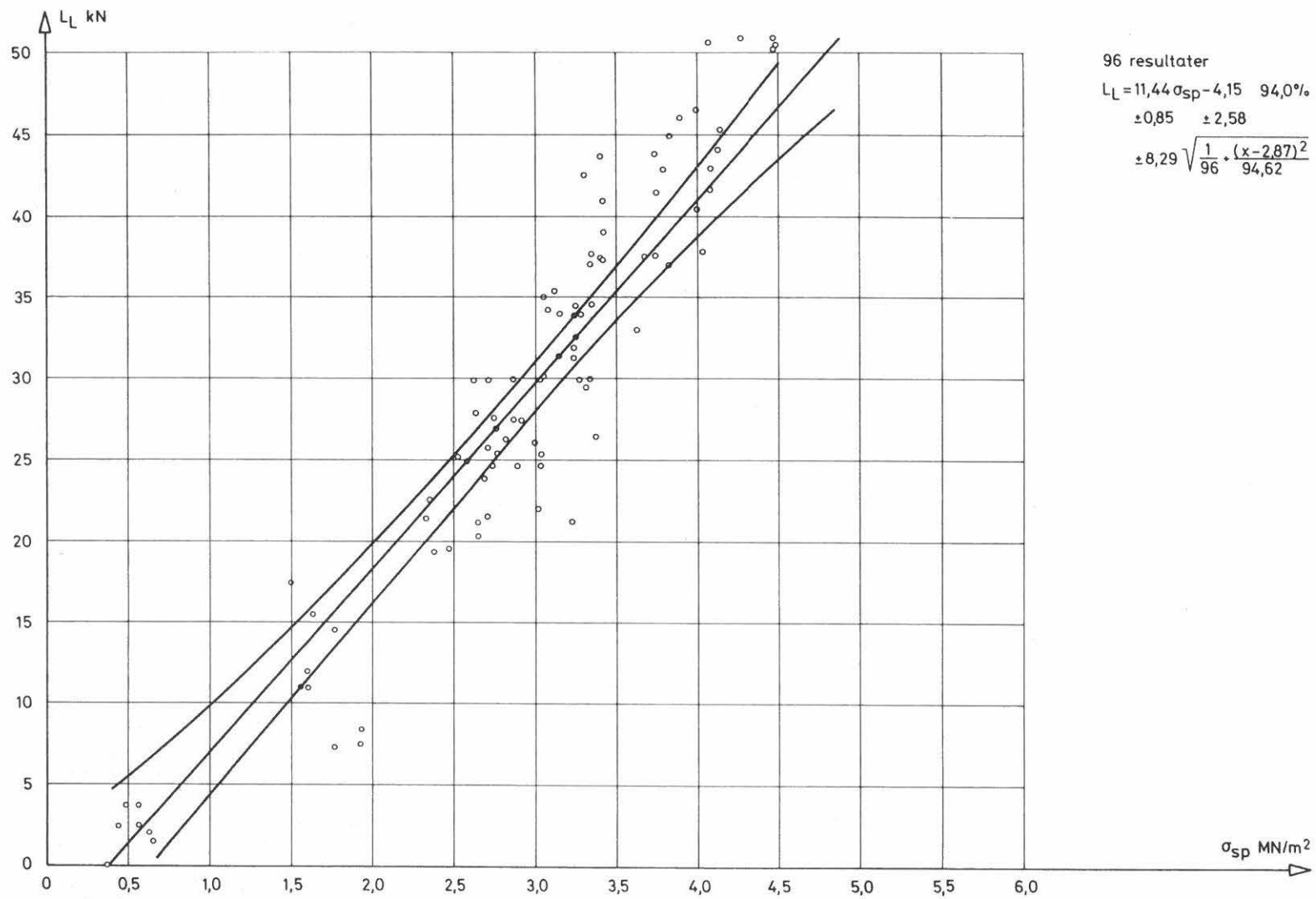


Figur 24. $H \sim \sigma_c$.

Figur 25. $H \sim \sigma_{sp}$.



Figur 26. $S_L \sim \sigma_c$.



Figur 27. $L_L \sim \sigma_{sp}$.

For at vurdere, hvorvidt man kan få en bedre bestemmelse af styrken ved at tage flere parametre med, er der foretaget nogle flere beregninger på resultaterne. Nedenfor er anført de fundne regressionsformler samt deres regressionskoefficient delt op i trykstyrke og spaltestyrke.

$$\begin{array}{r} \sigma_c \\ \sigma_c = 1,01 \cdot L_L^{1,02} \quad 97,0\% \\ \sigma_c = 1,93 \cdot S_L^{1,13} \quad 96,6\% \\ \sigma_c = 1,21 \cdot L_L^{0,56} \cdot S_L^{0,56} \quad 98,7\% \\ \sigma_c = 0,55 \cdot L_L + 1,44 \cdot S_L - 1,25 \quad 97,1\% \\ \sigma_c = 1,21 \cdot H + 9,36 \cdot v - 43,62 \quad 98,5\% \\ \sigma_c = 0,49 \cdot H + 1,11 \cdot S_L + 0,32 \cdot L_L + 1,90 \cdot v - 12,58 \quad \underline{99,2\%} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \sigma_{sp} \\ \sigma_{sp} = 0,15 \cdot L_L^{0,88} \quad 95,4\% \\ \sigma_{sp} = 0,26 \cdot S_L^{0,98} \quad 95,8\% \\ \sigma_{sp} = 0,18 \cdot L_L^{0,43} \cdot S_L^{0,54} \quad 97,5\% \\ \sigma_{sp} = 0,11 \cdot S_L + 0,05 \cdot L_L + 0,36 \quad 95,5\% \\ \sigma_{sp} = 0,08 \cdot H + 1,57 \cdot v - 6,16 \quad 98,5\% \\ \sigma_{sp} = 0,02 \cdot H + 0,06 \cdot S_L + 0,03 \cdot L_L + 1,07 \cdot v - 3,97 \quad \underline{99,0\%} \end{array}$$

Som det ses, kan korrelationskoefficienten forbedres lidt ved at tage flere variable ind i billedet, men i praksis er betydningen ikke så stor, hvilket ses af følgende:

Ud fra figurerne kan man for en given styrkeværdi bestemme den tilsvarende L_L , S_L , H og V værdi. Indsættes disse i de ovennævnte formler, kan styrken bestemmes, og nedenfor er anført de intervaller, hvori henholdsvis σ_c og σ_{sp} ligger. Det ses, at der kun er små udsving.

$$\begin{aligned}\sigma_c &= 19,7 - \underline{20,0} - 21,6 \text{ MN/m}^2 \\ \sigma_c &= 39,3 - \underline{40,0} - 40,6 \text{ MN/m}^2 \\ \sigma_{sp} &= 1,96 - \underline{2,00} - 2,14 \text{ MN/m}^2 \\ \sigma_{sp} &= 3,88 - \underline{4,00} - 4,09 \text{ MN/m}^2\end{aligned}$$

Ud fra de fundne resultater må konkluderes, at man kan få en rimelig god bestemmelse af tryk- og spaltetrækstyrken ved hjælp af ikke-destruktive metoder. I litteraturen (34) støder man på kombinationsmetoder (f. eks. H og v), og der er udarbejdet diagrammer til bestemmelse af styrken.

Som noget nyt skal her vises figur 28 og figur 29 til bestemmelse af tryk- og spaltetrækstyrken ud fra L_L og S_L målinger. Kurver for forskellige σ_c og σ_{sp} værdier er indtegnet. L_L og S_L er anført i kN, og den højeste målelige værdi er 70 kN. I intet tilfælde er målt en S_L værdi større end L_L , derfor er diagrammet afskåret med en ret linie $L_L = S_L$.

Gentagne belastninger

Som nævnt side 31 er det i laboratoriet undersøgt, om gentagne belastninger op til 85% af brudlasten influerer på lok-styrken. I tabel 2 er anført udtrækskraften i kN, idet 7 blandinger (1-7) er afprøvet til forskellige tidspunkter (1 d - 70 d).

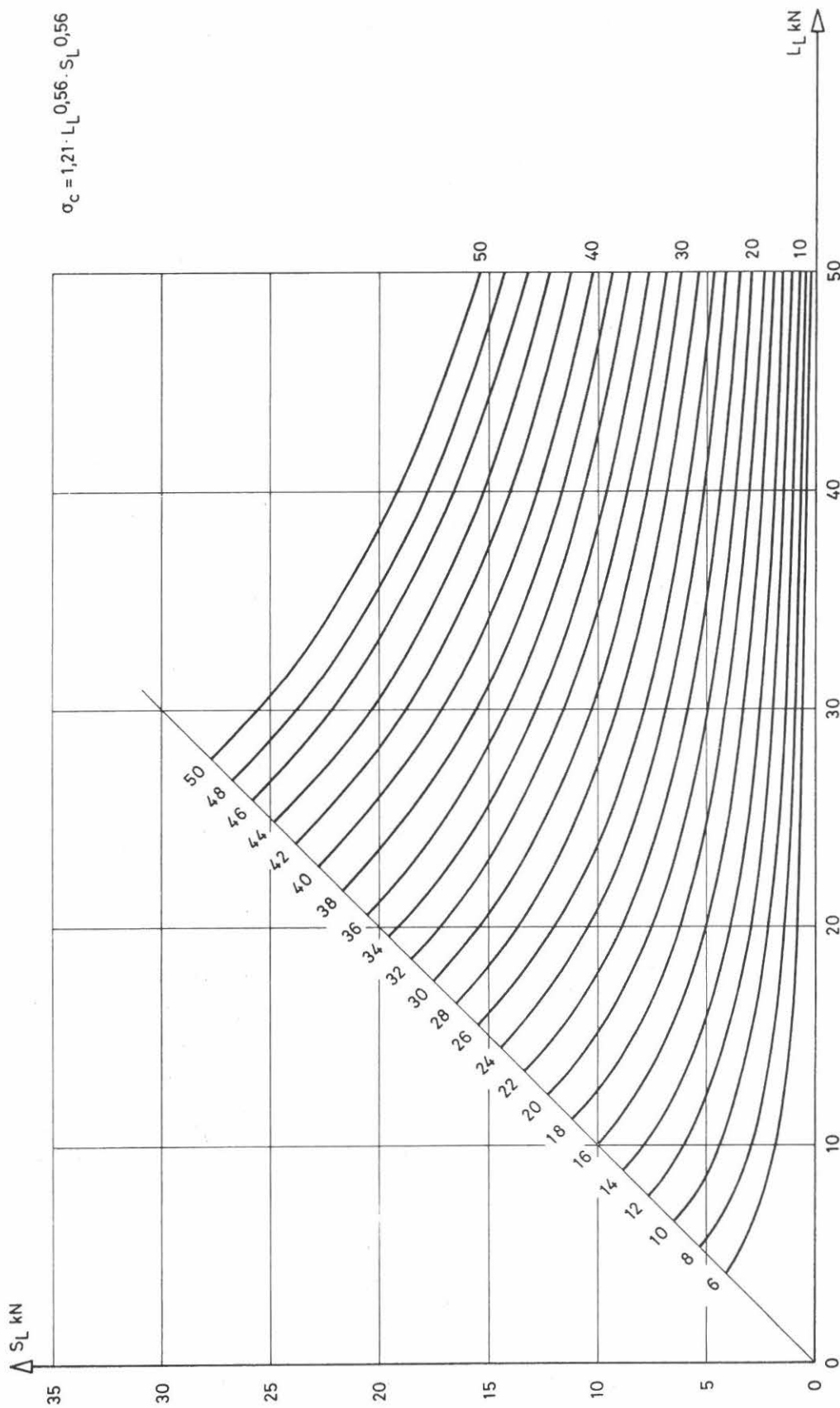
A og B står for de to først udtrukne bolte, C er belastet 1 gang og derefter trukket ud, og D er belastet 3 gange og derefter trukket ud.

Det må konkluderes, at belastning op til 85% af brudstyrken ikke påvirker lok-styrken væsentligt. σ_c er de målte cylindertrykstyrker og v er lyd hastigheder på samme tidspunkt.

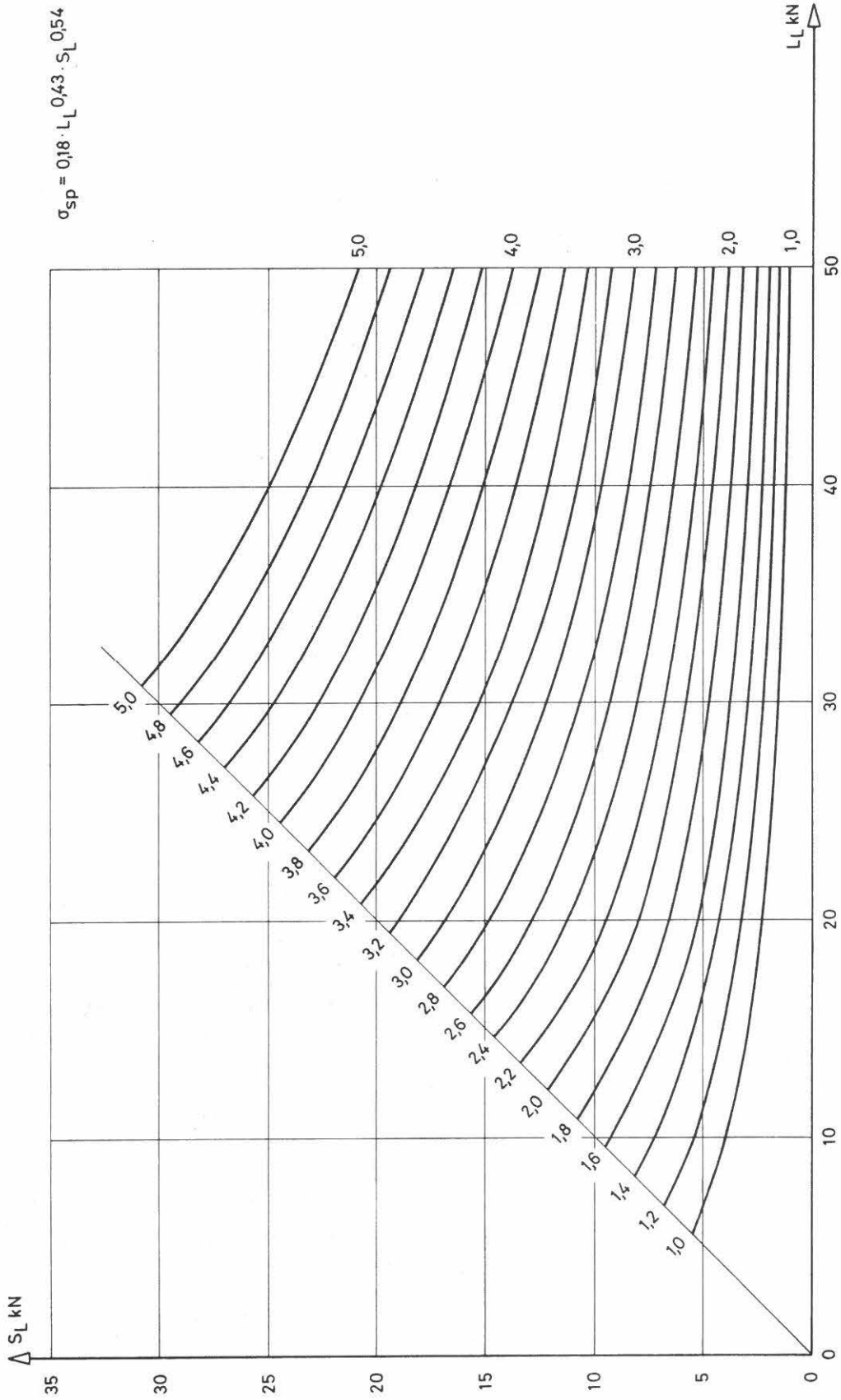
Ultralyd ~ tid

For beton med en alder fra 1-14 døgn (tabel 2) er undersøgt sammenhængen mellem lyd hastigheden v og tiden T. Ud fra de ret få resultater finder man, at hastigheden stiger eksponentielt med tiden, altså at

$$\ln v = k_1 \frac{1}{T} + k_2$$



Figur 28. $\sigma_c \sim L_L, S_L$



Figur 29. $\sigma_{sp} \sim L_L, S_L$

hvor k_1 er en negativ konstant (-0,12 til -0,33) og k_2 er en positiv konstant (1,44 til 1,48). Korrelationen er vældig god, bedre end 99%.

Blanding Nr.	Tid døgn	Bolt				σ_c MN/m ²	V km/s
		A	B	C	D		
1	1	5,5	3,5	4,3	6,0	5,0	3,60
	2	6,7	7,7	8,7	9,0	9,0	4,00
	4	13,5	12,5	12,7	13,0	13,5	4,15
	14	18,0	17,0	17,0	19,0	19,0	
2	2	7,2	6,5	7,8	6,9	2,9	3,09
	3	7,5	9,0	9,0	10,0	6,0	3,63
	14	14,5	17,2	16,0	13,6	8,5	3,80
	71	21,0	22,0	22,0	21,0	14,0	4,20
3	1					3,3	3,35
	2	8,0	7,5	6,0	11,0	7,1	3,76
	3	10,5	9,5	10,0	10,4	11,5	3,92
	14	20,0	19,5	18,5	20,0	17,6	4,14
	70	26,5	22,0	26,0	29,0		
4	1	17,5	14,0	9,0	15,5		
	4	26,0	28,5	34,5	30,9		
	7	29,5	32,5	28,5	28,5		
	14	32,0	36,0	32,5	35,0	36,0	4,60
	70	36,5	41,5	44,0	48,0		
5	2	6,0	6,8	7,9	6,9	7,2	3,80
	3	7,5	7,0	8,0	7,5	9,4	3,90
	7	11,0	11,5	12,0	12,0	14,4	4,15
	14	15,9	14,0	12,5	15,0	16,5	4,30
	60	18,0	20,0	19,0	21,5		
6	1	6,0	6,5	9,5	7,8	8,6	3,85
	2	9,5	11,0	10,0	10,0	13,2	4,10
	7	19,5	19,9	18,5	21,0	23,2	4,25
	14	21,2	25,0	23,5	22,5	27,8	4,30
	60	28,0	33,5	28,0	28,0		
7	1	17,0	17,2	18,0	18,0	20,2	4,20
	6	25,5	30,5	26,5	30,9		
	8	29,0	31,5	31,0	30,0		
	14	36,5	33,5	35,0	35,5	38,7	4,70

Tabel 2. Gentagne belastninger m.m.

Styrke ~ tid

På samme måde er undersøgt, hvordan styrken afhænger af tiden, og også her fås der gode korrelationer (bedre end 98%) med udtryk af formen

$$\ln \sigma_c = k_3 \cdot \frac{1}{T} + k_4$$

hvor k_3 er en negativ konstant (-1,24 til -1,98) og k_4 er en positiv konstant (2,71 til 3,33).

Ultralyd ~ styrke

Figur 30 viser 4 lyd hastighedskurver for forskellige c/v -forhold. De respektive 14 døgns styrker er anført på figuren og på baggrund af disse 4 resultater findes følgende sammenhæng mellem σ_c og v_{24} (lyd hastigheden efter 24 timer)

$$\sigma_c = 0,66 \cdot e^{0,96 \cdot v_{24}}$$

med en regressionskoefficient på 96%. Dette er et udmærket resultat, som kan forbedres yderligere ved flere forsøg.

Der er ikke her foretaget en nærmere undersøgelse af lyd hastigheds-kurven med henblik på bestemmelse af afbindingstid m.m.

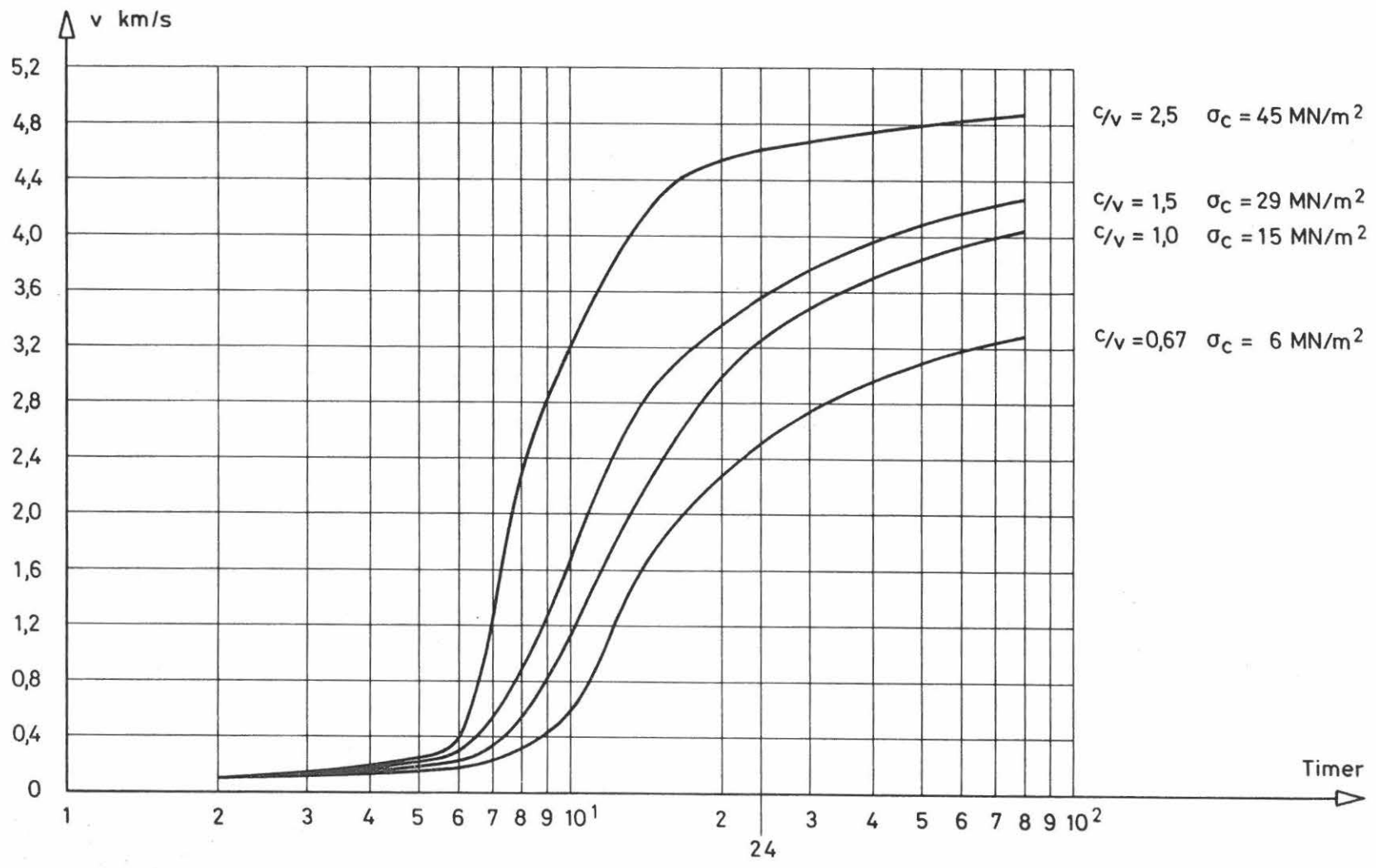
Det skal bemærkes, at forsøgene er udført i et lokale, hvor der ikke er gjort noget særligt for at holde temperaturen konstant.

$\sigma_c \sim \sigma_{sp}$

Ud fra 116 resultater er følgende sammenhæng fundet mellem σ_c og σ_{sp}

$$\sigma_{sp} = 0,154 \sigma_c^{0,85}$$

med en korrelationskoefficient på 98%, hvilket er i god overensstemmelse med oplysningerne i (2).



Figur 30. $v \sim \ln t$.

For det logaritmerede udtryk er konfidensgrænserne for koefficienterne og linien

$$0,85 \pm 0,04$$

$$- 1,87 \pm 0,05$$

og

$$\pm 0,20 \sqrt{\frac{1}{116} + \frac{(x - 3,33)^2}{37}}$$

Alment om metoderne

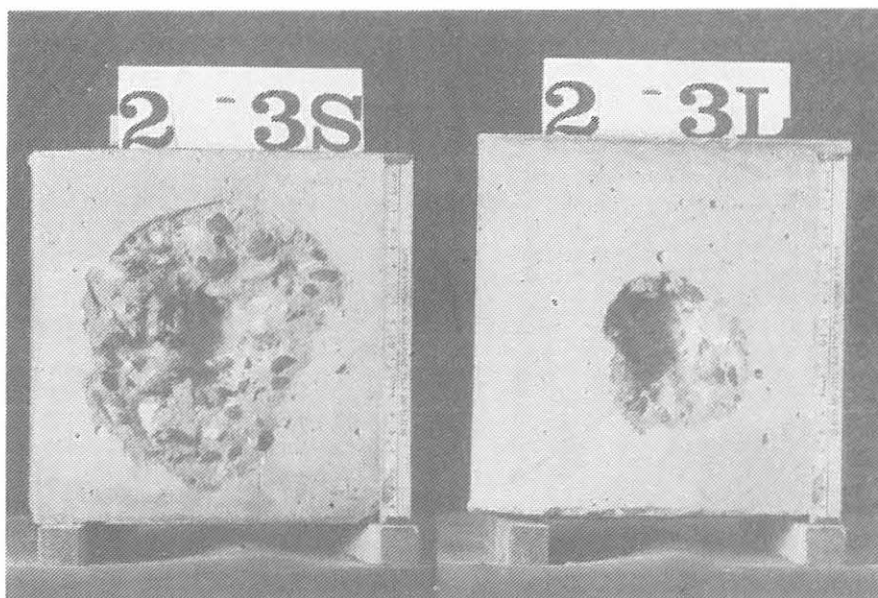
Ved gennemførelsen af de omtalte eksperimenter har det været hensigten bl. a. at indøve brugen af apparaturet. Generelt må man sige, at brugen af de forskellige instrumenter er ret simpel, og der kræves kun en mindre instruktion for at kunne arbejde med dem.

Ultralyd anvendes som bekendt til meget forskelligt. Metaller er i mange år blevet undersøgt med ultralyd, hvor frekvenserne tælles i megahertz mod kilohertz til beton. Til fejlfinding i beton anvendes ultralyd mere og mere, og der kan her henvises til (17).

Forsøg i laboratoriet viser, at revnedybder kan bestemmes $\pm 0,5$ cm, og at hulrumsudstrækning også kan bestemmes med denne nøjagtighed. Ved bestemmelse af porøse overfladelags tykkelse kan bestemmelsen af x_0 være vanskelig, hvis forskellen i betonstyrkerne ikke er ret stor. Armeringens indflydelse er også bekræftet ved forsøg, selv om de opstillede kurver ikke er verificeret i detaljer.

Brugen af lok-test apparatet er ikke særlig vanskelig, det kan dog være lidt tidrøvende, når udtrukne bolte skal fjernes fra prøvelegemerne. Overfladerne, man trækker boltene ud fra, skal være helt plane, hvilket kan være et problem ved det store modhold. Brudformerne bliver pæneste med det lille modhold. Figur 31 viser et billede af brudformerne med det lille og det store modhold. Andre billeder af brudformer haves som dokumentation.

Andre brudformer vil givet opstå, hvis lok-test prøvning med stort modhold skete på vægge m.m., hvor der ikke var så stor mulighed for fri ekspansion under prøvningen.



Figur 31. Brudformer ved lok-test prøvning.

ANDRE METODER

I det følgende skal omtales en række metoder, som bliver anvendt i større og mindre omfang rundt omkring, men som ikke vil blive behandlet yderligere hverken teoretisk eller eksperimentelt. Der henvises til litteraturen.

Overfladehårdhedsmetoden (27)

Med en pistol (Williams) eller hammer (Franck, Einbech) presses en kugle ind på betonoverfladen med en bestemt energi, og der dannes et aftryk af kuglen. Diameteren af dette aftryk tages som et udtryk for betonens overfladeegenskaber, idet en større diameter betyder en svagere beton. Ved empiriske relationer mellem diameter og styrke kan denne bestemmes $\pm 30\%$.

Indtrængningsmetoder (27)

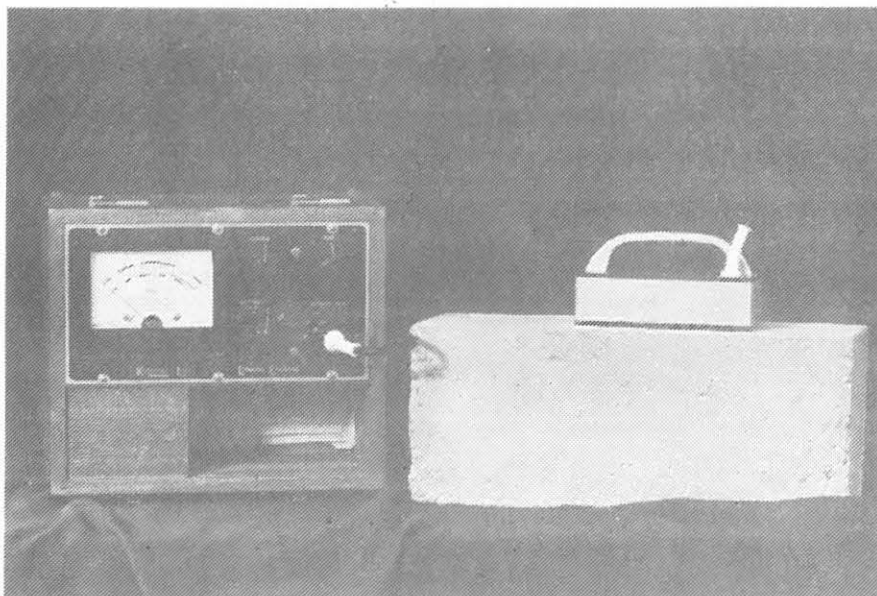
Med en pistol (Windsor) skydes et projektil ind i betonen med en bestemt energi, og projektilets dybde tages som et udtryk for betonens indtrængningsmodstand. Større dybde betyder svagere beton, og der kan også her opstilles empiriske relationer mellem dybde og styrke. Inden for denne gruppe kan nævnes Simbihammer og Spit-metoden, hvorved der bores et hul i betonen med en bestemt energi, og borehullets dybde bestemmes.

Radioaktive metoder (34)

Inden for denne gruppe findes en række metoder, som inkluderer brugen af røntgenstråler og gammastråler til måling af betonens ensartethed, armeringsbeliggenhed og tykkelse. Til måling af fugtighed og cementindhold i beton anvendes neutroner i stort omfang. Udstyret til disse metoder er ofte kompliceret, og der kræves specielle sikkerhedsforanstaltninger.

Magnetiske metoder (27)

Grundlaget for disse metoder er det forhold, at tilstedeværelsen af armering i beton vil ændre et elektromagnetisk felt. Dette anvendes i et Covermeter, som med rimelig nøjagtighed tillader bestemmelse



Figur 32. Covermeter.

af diameter, retning og beliggenhed af armering i almindelig jernbeton. Figur 32 viser et sådant covermeter.

Elektriske metoder (27)

Til bestemmelse af fugtindhold i beton anvendes mere og mere dielektriske metoder, og modstandsmålinger anvendes til bestemmelse af fugtindrængning i beton samt til måling af betonlags tykkelse.

Mikrobølgeabsorptionsteknik (27)

Mikrobølger har en bølgelængde mellem 0,3 og 300 mm, og disse bølger kan anvendes til bestemmelse af fugtindhold i beton, idet bølgerne dæmpes meget kraftigt i et vandholdigt materiale. Nøjagtigheden er dog ikke særlig stor for beton p.g.a. ujævn fugtfordeling, men for materialer med mere jævn fordeling kan en bestemmelse med en lille usikkerhed foretages.

Akustisk emissionsteknik (27)

Denne teknik bygger på det forhold, at der dannes spændingsbølger

når et prøvelegeme belastes, således at der dannes revner i betonen. Disse bølger kan optages via en transducer til et bånd eller en skriver. Teknikken bruges til studiet af revnedannelser i beton og anvendes også i forbindelse med studiet af udmattelsesrevner i metaller, læksøgning m.m.

KONKLUSION

Som hovedkonklusioner kan følgende anføres:

Ud fra målinger af samhørende værdier mellem cylindertrykstyrke, spaltetrækstyrke, ultralydhastighed, hammertal samt udtrækskraft med lille og stort modhold er der opstillet en række regressions-sammenhænge mellem de indgåede parametre, se figur 20-27. Korrelationerne er gode, bedst for trykstyrke.

Som noget nyt præsenteres figur 28, der viser regressionssammenhængen mellem betonens trykstyrke/trækstyrke og udtrækskraften med både det lille og store modhold. Normalt anvendes ultralydhastighed og hammertallet som indgangsparametre (33). Andre sammenhænge med flere parametre er anført på side 41.

Trykstyrken og ultralydhastigheden kan antages at falde eksponentielt med den reciprokke tid.

Spaltetrækstyrken ser ud til at være proportional med trykstyrken i potensen 0,85.

Trykstyrken kan antages at variere eksponentielt med ultralydhastigheden efter 24 timers lagring.

Gentagen belastning af udtræksbolte op til 85% af brudkraften synes ikke at influere på lokstyrken.

Det skal anføres, at der er udviklet en ny formel til bestemmelse af revnedybder i beton ved hjælp af ultralyd. Formlen lyder

$$c = \frac{1}{2} \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2} \right) \quad (\text{side 19})$$

og den vil træde i stedet for cot-formlen i de nye udgaver af manualen (32) efter anvisning af forfatteren.

SLUTNING

Ikke-destruktiv prøvning af beton er et stort område, og langt fra alle aspekter er behandlet her. Der har gennem tiderne været udviklet og foreslået mange metoder til dette formål, se (36), og som en af de nyeste skal nævnes den norske TNS-tester (19), hvor man måler en "knækstyrke", og samtidig får man et lille prøvelegeme, der kan arbejdes med. Forfatteren har ingen erfaring med denne tester.

I betonverdenen har der altid været det store problem: hvordan er styrkerne i bygværket, og hvordan skal man måle disse? Det vil være lykkeligt, hvis ikke-destruktive metoder kan blive accepteret på samme måde, som de destruktive er det i dag. I mange tilfælde er f.eks. ultralyd den eneste mulighed til undersøgelse af et bygværk for revner, skader etc.

I rapporten er nævnt en delopgave, som vil blive gjort færdig, ydermere vil ultralydudstyret blive inddraget i mit fremtidige studium af frisk betons egenskaber.

I denne rapport er kun prøvning af beton omtalt. Det skal bemærkes, at også til prøvning af træ har ultralyd vist sig velegnet, og der kan her henvises til (34).

LITTERATUR

1. Bellander, Ulf: Hållfasthet i färdig konstruktion.
 - Del 1. CBI forskning 13:76: Förstörande metoder. Rimliga kravnivåer.
 - Del 2. CBI forskning 2:77: Oförstörande metoder. Litteraturstudie.
 - Del 3. CBI forskning 3:77: Oförstörande metoder. Laboratorie- och fältförsök.
2. Bonzel, J.: Über die Spaltzugfestigkeit des Betons.
Betontechnische Berichte 1964, p. 59-96.
3. Brunarski, L.: Gleichzeitige Anwendung verschiedener zerstörungsfreien Prüfmethode zur Gütekontrolle des Betons.
Wiss.Z. H.f.B. Leipzig 9 (1963): 12, p. 191-192.
4. B.S. 4408: Non-destructive methods of test for concrete (5 dele).
5. Davis, S. G.: Further investigations into the strength of concrete in structures.
Technical report no. 42514, April 1976. Cement and Concrete Association, England.
6. Davis, S. G. and S. J. Martin: The quality of concrete and its variations in structures.
Technical report no. 42487, November 1973. Cement and Concrete Association, England.
7. Drysdale, R. G.: Variation of concrete strength in existing buildings.
Magazine of Concrete Research 25 (1973): 85, p. 201-207.
8. Eisenmann, K.: Untersuchung der Rissebildung des Betons mit Ultraschall.
Beton- und Stahlbetonbau 46 (1951): 1, p. 19-20.
9. Eisenmann, K. und G. Steinkamp: Messung der Tiefen und Weiten von Betonwunden mittels Ultraschall.
Beton- und Stahlbetonbau 49 (1954): 2, p. 36-38.
10. Elvery, R. H.: Non-destructive testing of concrete and its relationship to specifications.
Concrete 5 (1971): 5, p. 137-141.
11. Elvery, R. H.: Estimating strength of concrete in structures.
Concrete 7 (1973): 11, p. 49-51.
12. Elvery, R. H. and L. A. M. Ibrahim: Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages.
Magazine of Concrete Research 28 (1976): 97, p. 181-190.

13. Facaoaru, I.: Contribution a l'etude de la relation entre la resistance du beton a la compression et la vitesse de propagation longitudinale des ultra-sons.
Bulletin RILEM 12 (1961): 9, p. 125-154.
14. Facaoaru, I. & Gh. Stamate: Kombinierte zerstörungsfreie Prüfmethoden für Beton in Rumänien.
Tagungsbericht. Zeitschrift für Prüfung der Beton. Leipzig 1969, p. 25-34.
15. Genzel, J.: Einfluss der Stahlbewehrung und der Feuchtigkeit auf die Geschwindigkeit von Ultraschallimpulsen in Beton.
Bauzeitung (1965): 9, p. 464-466.
16. Highway Research Board No. 378.
National Academy of Science, Washington 1972.
17. Hjort-Jensen, J.: Metoder til bestemmelse af betonkvalitet med ultralyd.
Publikation nr. 75.03, Svejsecentralen, København 1975.
18. Jensen, B. C. og M. W. Bræstrup: Lok-tests determine the compressive strength of concrete.
Nordisk Betong (1976): 2, p. 9-11.
19. Johansen, R.: En praktisk prøvningsmetode for in situ bestemmelse av byggverksfasthet.
Nordisk Betong (1977): 4, p. 13-17.
20. Jones, R.: The non-destructive testing of concrete.
Magazine of Concrete Research (1949): June, p. 67-78.
21. Jones, R.: The ultrasonic testing of concrete.
Ultrasonics (1963): April-June, p. 78-82.
22. Jones, R. and I. Facaoaru: Recommendations for testing concrete by the ultrasonic method.
Magazine of Concrete Research 2 (1969): 10, p. 275-284 and RILEM Recommendation NDT 1 (1972).
23. Kaplan, M. F.: Compressive strength and ultrasonic pulse velocity relationships for concrete in columns.
Journal of the American Concrete Institute 29 (1958): p. 675-688.
24. Kaplan, M. F.: Ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity, Poisson's ratio and the strength of concrete made with thirteen different coarse aggregates.
Bulletin RILEM 10 (1959): 1, p. 58-73.
25. Kierkegaard-Hansen, P.: Lok-strength.
Nordisk Betong (1975): 3, p. 19-28.
26. Macleod, G.: An assessment of two non-destructive techniques as a means of examining the quality and variability of concrete in structures.
Technical Report no. 42454, July 1971, Cement and Concrete Association, England.

27. Malhotra, V. M.: Testing hardened concrete: Non-destructive methods.
ACI Monograph no. 9, 1976.
28. Müller, E. A. W.: Handbuch der zerstörungsfreien Materialprüfung (5 Vol.), 1959.
29. Nwokoye, D. N.: Prediction and assessment of concrete properties from pulse-velocity tests.
Magazine of Concrete Research 25 (1973): 82, p. 39-46.
30. Pohl, E.: Zerstörungsfreie Prüfmethode für Beton.
Leipzig 1966.
31. Popovics, S.: Relations between various strengths of concrete.
Highway Research Board Record (1967): 210, p. 67-94.
32. PUNDIT: Manual til ultralydapparatet.
33. Skramtaev, B. G. and M. Yu. Leshchinsky: Complex methods of non-destructive tests of concrete in constructions and structural works.
Bulletin RILEM 17 (1966): 30, p. 99-105.
34. Symposium on non-destructive testing of concrete and timber (flere indlæg).
The institution of Civil Engineers, London 1970.
35. Testing concrete by an ultrasonic pulse technique.
Road Research technical paper no. 34.
Road Research Laboratory HMSO, London 1955.
36. Testing in situ of concrete structures, International Symposium on, September 1977, Budapest.
37. Wheen, R. J.: Non-destructive testing of concrete.
Building Science 9 (1977), p. 157-166.
38. Wiebenga, J. G.: A comparison between various combined non-destructive testing methods to derive the compressive strength of concrete.
TNO-report no. BI-68-61, August 1968, Delft.
39. van der Winden, N. G. B. & A. W. Brant: Ultrasonic testing for fresh mixes.
Concrete 11 (1977): 12, p. 25-28.
40. Zerstörungsfreie Prüfung von Beton in der Baupraxis.
Wissenschaftliche Zeitschrift. Tagungsbericht.
Hochschule für Bauwesen, Leipzig 1966.

