

IBC MEDEDELINGEN

ORGAAN VAN HET

INSTITUUT T.N.O. VOOR BOUWMATERIALEN EN -CONSTRUCTIES

VOORTZETTING VAN DE W.G.S.-MEDEDELINGEN

Redacteur: Ir. A. L. Bouma — Postbus 49, Delft

JAARGANG 5

NO. 1

JANUARI 1957

CONTROLE VAN DE KWALITEIT VAN BETON DOOR MIDDEL VAN AKOESTISCH ONDERZOEK

In dit artikel wordt een tussentijds overzicht gegeven van de resultaten van het speurwerk dat in de afgelopen drie jaren is verricht op het gebied van het akoestisch onderzoek van beton.

In paragraaf 1 worden de meetmethoden en formules gegeven betreffende resonantiefrequenties, voortplantingssnelheden en dynamische elasticiteitsmodulus. Paragraaf 2 geeft een korte beschrijving van de drie apparaten die worden gebruikt voor precisiemetingen van resonantiefrequenties en voortplantingssnelheden (d.m.v. mechanische en ultrasonische impulsen). In paragraaf 3 wordt de waarde van de voortplantingssnelheid en de dynamische elasticiteitsmodulus als criterium voor de kwaliteit besproken. In de laatste drie paragrafen worden tenslotte de voornaamste resultaten vermeld, die tot nu toe met de drie apparaten werden verkregen.

Inleiding

Bij het beoordelen van cement en beton ten behoeve van constructies, treedt het onderzoek naar de sterkte veelal op de voorgrond. In vele gevallen is het onmogelijk om de sterkte van beton aan de constructie zelf te bepalen, daar hierdoor beschadiging van de constructie optreedt. Men baseert zich daarom op sterktecijfers van separaat gemaakte proefstukken (meestal betonkubi). Het zou van groot belang zijn als men de sterkte direct, op niet-destructieve wijze, aan de constructie kon bepalen. Niet alleen wordt door een dergelijke beproevingsmethode de constructie of het proefstuk niet beschadigd – waardoor het ook mogelijk is het verloop van bepaalde processen in het te onderzoeken object te volgen als functie van de tijd – maar bovendien zijn deze niet-destructieve metingen sneller en meestal economischer uit te voeren. Tevens kan gemakkelijk de variatie in de gelijkmatigheid worden nagegaan.

Het ligt dan ook voor de hand dat na de gunstige ervaringen, welke men met niet-destructief onderzoek bij metalen heeft opgedaan – röntgen-onderzoek en akoestisch onderzoek – ook bij het bouwmaterialen-onderzoek gezocht is naar de mogelijke toepassing van niet-destructieve methoden. Voor beton heeft onderzoek door middel van röntgenstralen weinig zin, daar men betreffende kwaliteit en sterkte langs deze weg geen gegevens krijgt (alleen grote inwendige holten, eventuele scheuren en duidelijke gebreken in de aanhechting tussen beton en staal zouden zijn waar te nemen). Het is dus niet te verwonderen dat in eerste instantie de akoestische meetmethoden nader werden onderzocht. Onderzoekingen hebben n.l. aangetoond, dat er een correlatie bestaat tussen de mechanische eigenschappen van beton en zijn elasticiteitsmodulus. De laatste grootheid bepaalt in hoofdzaak de voortplantingssnelheid van het geluid, waarvoor de theoretische behandeling en de ervoor geldende formules door LAPLACE, RALEIGH en LOVE werden gegeven. In de formules komen, behalve de elasticiteitsmodulus, de specifieke massa en de contractiecoëfficiënt van Poisson van de stof voor. Aangezien de voortplantingssnelheid van een geluidsgolf in beton nauwkeurig kan worden bepaald evenals de resonantiefrequentie van proefstukken, welke frequentie door de vorm van het proefstuk, de afmetingen en de elasticiteitsmodulus wordt beïnvloed, biedt de methode van het akoestisch onderzoek een uitgebreid veld van toepassingen.

Metingen van de voortplantingssnelheid kunnen worden verricht aan constructies om de gelijkmatigheid van de kwaliteit te controleren. Direct uit de voortplantingssnelheid of via berekening van de dynamische elasticiteitsmodulus kan men weer met behulp van empirische formules hieruit met redelijke nauwkeurigheid de sterkte bepalen. Met de resonantiemethode, die voor laboratoriumwerk zeer geschikt is, kan direct uit de metingen de coëfficiënt van Poisson, de dynamische elasticiteitsmodulus en de voortplantingssnelheid van het geluid worden berekend. Het verloop van deze grootheden met de tijd en veranderingen daarin als gevolg van chemische of mechanische beschadiging (b.v. vorst), temperatuurswisselingen en vochtgehalte kunnen op deze wijze snel, eenvoudig en goedkoop worden bestudeerd. De laatste methode opent eveneens de mogelijkheid van een akoestische cementkeuring.

Het doel van dit artikel is een overzicht te geven van de voornaamste resultaten van het akoestisch onderzoek, die bij het Instituut werden verkregen gedurende drie jaren speurwerk.

1 PRINCIPE VAN DE MEETMETHODEN

De meetmethoden kunnen worden onderscheiden in twee groepen, te weten: de methode waarbij de resonantiefrequenties worden gemeten en de methode, waarbij de voortplantingssnelheid wordt bepaald.

1.1 Methode van de resonantiefrequentie

Indien een proefstuk b.v. in de vorm van een langwerpig prisma, in zijn lengterichting wordt aangestoten, ontstaat hierin een lopende golf. Deze golf zal echter snel uitsterven ten gevolge van de demping van het materiaal. Blijft men nu het proefstuk regelmatig aanstoten, met een frequentie gelijk aan één van de eigen frequenties van het proefstuk, dan ontstaat een stationaire toestand en dempt de trilling van het proefstuk niet uit (vergelijk een schommel welke steeds in zijn hoogste punt een duw naar beneden krijgt). De eigenfrequentie van het proefstuk (aantal trillingen per seconde) wordt bepaald door de elasticiteitsmodulus van het materiaal, de afmetingen en zijn volumegewicht. Uit de eigenfrequenties van het proefstuk (de resonantiefrequenties) kan dus de elasticiteitsmodulus worden berekend. Stoot men het proefstuk nu aan met een regelbare bekende frequentie, dan zal het maximum in de amplitude van het proefstuk het criterium zijn waarbij de aanstootfrequentie gelijk is aan de eigenfrequentie. Het proefstuk heeft meerdere eigenfrequenties en deze kunnen, al naar de wijze waarop het proefstuk in trilling wordt gebracht, worden onderscheiden in:

1.1.1 Longitudinale resonantiefrequentie (zie fig. 1)

De trilling van het proefstuk geschiedt in de richting van de lengteas; de frequentie wordt bepaald door de afmetingen van het proefstuk, zijn volumegewicht en zijn elasticiteitsmodulus.

De eenvoudigste wijze waarop het proefstuk kan trillen, treedt op bij de frequentie, die men aanduidt als de grondtoon. Hierbij blijft het midden van het proefstuk in rust, terwijl de deeltjes aan weerszijden van deze knoop P zich bewegen, met naar de uiteinden toenemende amplitude, afwisselend van de knoop af en naar de knoop toe. Bij de eerste boventoon zijn twee knopen P_1 en P_2 aanwezig (op $\frac{1}{4}l$ en $\frac{3}{4}l$ van een einde van het proefstuk gerekend, als $l =$ lengte proefstuk). Bij de tweede boventoon zijn 3 knopen aanwezig (op $\frac{1}{6}l$, $\frac{1}{2}l$ en $\frac{5}{6}l$ van het einde gerekend). Voor de longitudinale resonantiefrequenties geldt, dat de frequenties der boventonen een geheel aantal malen die van de grondfrequentie zijn.

Het verband tussen de elasticiteitsmodulus en de resonantiefrequentie, dat mede

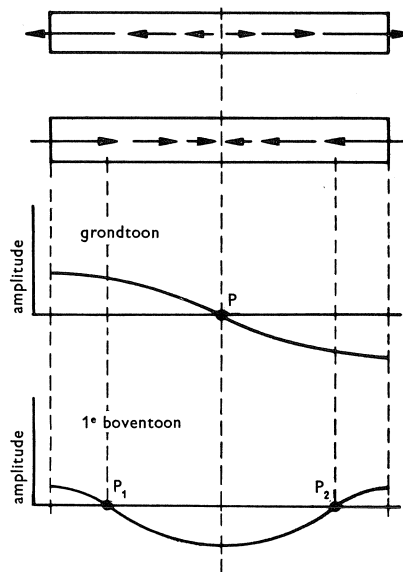


Fig. 1.
Longitudinale resonantiefrequenties.

wordt bepaald door de afmetingen van het proefstuk, het volumegewicht en de coëfficiënt van Poisson luidt:

$$E_d = 4 f_i^2 \cdot l^2 \cdot \frac{\gamma}{g} \left(1 + \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{\mu^2 i^2}{l^2} \right)$$

De correctieterm $\frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{\mu^2 i^2}{l^2}$ is voor de gevallen dat de lengte van het proefstuk groter is dan tweemaal de dwarsafmeting te verwaarlozen. Is deze verhouding lengte: dwarsafmeting gelijk aan twee, dan is de correctie 0,5 %. Voor metingen aan proefstukken waarbij deze verhouding groter is dan twee, geldt dan $E_d = C \cdot f_i^2 \cdot G$, waarin $C = \frac{4 l}{b h g}$.

Met behulp van de formule $V_L = 2 f_i \cdot l$ kan uit de resonantiefrequentie eveneens de voortplantingssnelheid van geluid in beton (V_L) worden berekend.

1.1.2 Transversale (of buiging-) resonantiefrequentie (zie fig. 2)

De trilling van het proefstuk geschiedt hierbij loodrecht op de lengteas van het proefstuk. Bij de grondtoon zijn twee knopen aanwezig op 0,224 l en 0,776 l van een einde van het proefstuk gerekend. Bij de eerste boventoon zijn

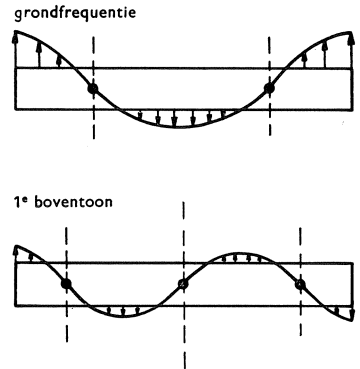


Fig. 2. Transversale resonantiefrequenties.

Notaties

| | | | |
|----------|---|---------------|--|
| E_d | dynamische elasticiteitsmodulus in kg/cm^2 . Voor nader begrip hiervan zie pag. 8. | σ_{bt} | buigtreksterkte in kg/cm^2 |
| E_{st} | statische elasticiteitsmodulus in kg/cm^2 | σ_d | druksterkte in kg/cm^2 |
| G_d | dynamische glijdingsmodulus in kg/cm^2 | σ_k | kubusdruksterkte in kg/cm^2 |
| b | dwarsafmeting van het prisma in cm | σ_t | zuivere treksterkte in kg/cm^2 |
| h | dwarsafmeting van het prisma in cm | V_L | longitudinale voortplantingssnelheid van geluid in beton in cm/sec |
| l | lengte proefstuk in cm | V_{L_1} | longitudinale voortplantingssnelheid als beide dwarsafmetingen klein zijn t.o.v. de golflengte |
| G | gewicht in kg | V_{L_2} | longitudinale voortplantingssnelheid als één dwarsafmeting klein is t.o.v. de golflengte |
| γ | volumegewicht in kg/cm^3 | V_{L_3} | longitudinale voortplantingssnelheid als de dwarsafmetingen groot zijn t.o.v. de golflengte |
| g | versnelling zwaartekracht in cm/sec^2 | V_t | transversale voortplantingssnelheid in cm/sec |
| i | $\sqrt{\frac{I}{F}}$ traagheidsstraal in cm | V_r | voortplantingssnelheid van Raleighgolven in cm/sec |
| I | traagheidsmoment in cm^4 | T | factor afhankelijk van i/l , μ en de verhouding van de schuifspanning over de doorsnede |
| F | doorsnede in cm^2 | | |
| μ | coëfficiënt van Poisson | | |
| f_i | longitudinale resonantiefrequentie in herz = 1/sec | | |
| f_b | transversale resonantiefrequentie in herz = 1/sec | | |
| f_t | torsie-resonantiefrequentie in herz = 1/sec | | |

3 knopen aanwezig op $0,14 l$, $0,5 l$ en $0,86 l$ van een einde van het proefstuk gerekend. De verhouding tussen de boventonen en de grondtoon is afhankelijk van de waarde van i/l en wordt in fig. 3 grafisch weergegeven.

Het verband tussen de elasticiteitsmodulus en de resonantiefrequentie, dat mede afhankelijk is van de afmetingen van het proefstuk, het gewicht en de coëfficiënt van Poisson, wordt voor de grondtoon gegeven door:

$$E_d = C \cdot G \cdot f_b^2 \text{ waarin } C = \frac{4\pi^2 l^3}{4,730 g I} \cdot T$$

Hierin is T een factor die afhankelijk is van i/l , μ en de verhouding van de schuifspanning over de doorsnede. De factor T wordt in fig. 4 grafisch voor enige waarden van μ weergegeven als functie van de factor i/l .

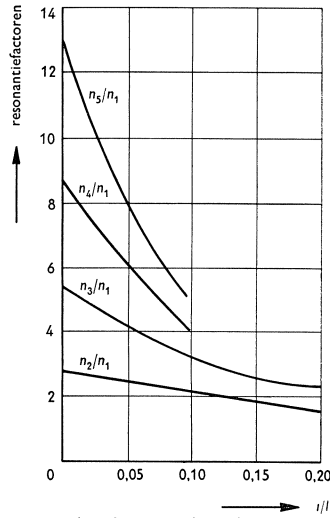


Fig. 3. Verhouding grondtoon/boventonen voor de transversale resonantiefrequenties.

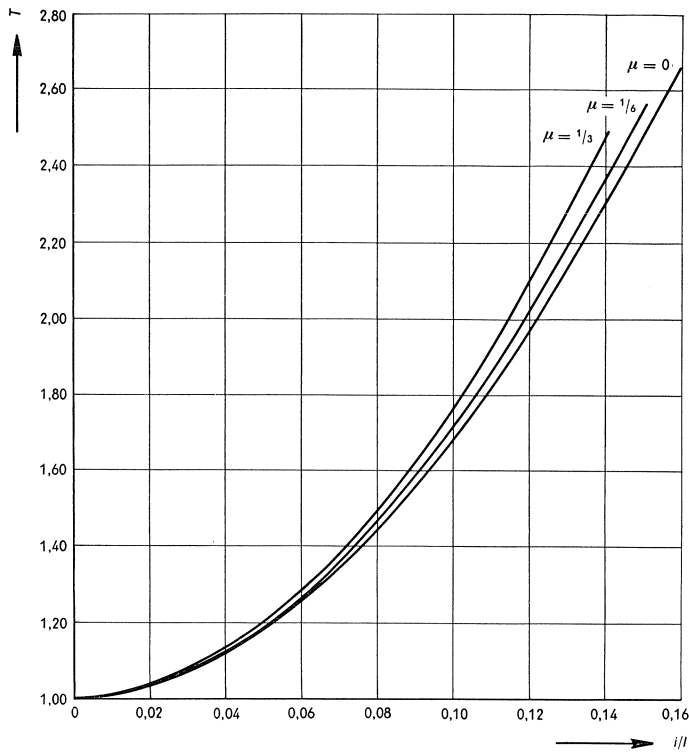


Fig. 4. Verband tussen T en i/l .

1.1.3 Torsie-resonantiefrequentie (zie fig. 5)

De trilling van het proefstuk geschiedt om de lengteas van het proefstuk. De ligging van de knopen bij grondtoon en boventonen is gelijk aan die voor de longitudinale resonantiefrequenties. Eveneens geldt, dat de frequenties der boventonen een geheel aantal malen die van de grondfrequentie bedraagt.

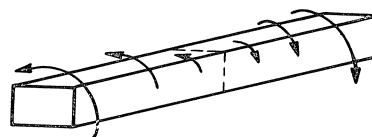


Fig. 5. Torsieresonantiefrequentie; grondtoon.

Het verband tussen de glijdingsmodulus en de resonantiefrequentie, dat mede afhankelijk is van de afmetingen van het proefstuk en van het gewicht wordt bepaald door: $G_a = C \cdot G \cdot f_t^2$ waarin $C = \frac{4lR}{g\bar{F}}$.

Hierin is R voor een ronde doorsnede = 1, voor een vierkante doorsnede = 1,183; voor een rechthoekige doorsnede met zijden a en b ($a < b$) is

$$R = \frac{a/b + b/a}{4a/b - 2,52 (a/b)^2 + 0,21 (a/b)^6}$$

Het verband tussen de dynamische glijdingsmodulus (G_a) en de dynamische elasticiteitsmodulus (E_a) wordt tenslotte gegeven door $G_a = \frac{E_a}{2(1 + \mu)}$.

Combinatie van de formules voor de longitudinale- en de transversale (buigings)frequenties geeft $\frac{f_l}{f_b} = 0,1405 \frac{l}{i} \sqrt{T}$ (resonantie in de grondtoon), terwijl combinatie van longitudinale- en torsie-resonantiegrondfrequenties als resultaat geeft $\frac{f_l}{f_t} = \sqrt{2(1 + \mu)R}$ of $\mu = \left(\frac{f_l}{f_t}\right)^2 \cdot \frac{1}{2R} - 1$.

De in de praktijk meest bruikbare methode voor het bepalen van de coëfficiënt van Poisson bestaat uit het vergelijken van longitudinale- en torsie-resonantiefrequenties.

1.2 Methode van de voortplantingssnelheid

De meetmethode bestaat uit het bepalen van de voortplantingssnelheid van geluidsimpulsen in beton. Deze impulsen kunnen zich op drie manieren (zie fig. 6) voortplanten:

1.2.1 Voortplantingssnelheid van de longitudinale golf

De trillingsrichting van de deeltjes (zie fig. 6-1) valt samen met de richting waarin de golf zich voortplant. De dwarsafmetingen hebben grote invloed op de grootte

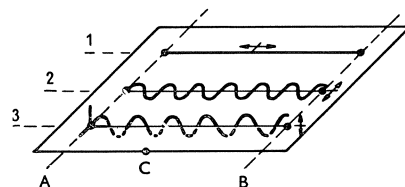


Fig. 6 Voortplanting van trillingen in beton.

van de longitudinale voortplantingssnelheid. Zijn de dwarsafmetingen groot ten opzichte van de toegepaste golflengte dan is de voortplantingssnelheid:

$$V_{L_3} = \sqrt{\frac{E_a \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

Is slechts één dwarsafmeting klein ten opzichte van de golflengte en de andere groot, dan geldt:

$$V_{L_2} = \sqrt{\frac{E_a \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{1}{1 - \mu^2}}$$

Zijn beide dwarsafmetingen klein ten opzichte van de golflengte dan bedraagt

$$V_{L_1} = \sqrt{\frac{E_a \cdot g}{\gamma}}$$

1.2.2 Voortplantingssnelheid van de transversale golf

De trillingsrichting (zie fig. 6-2) staat loodrecht op de richting waarin de golf zich voortplant. De transversale golf plant zich voort met een snelheid

$$V_t = \sqrt{\frac{G_a \cdot g}{\gamma}}. \text{ Daar } G_a = \frac{E_a}{2(1 + \mu)}, \text{ kan dus ook worden}$$

geschreven
$$V_t = \sqrt{\frac{E_a \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)}}$$

Combinatie van de formules voor V_L en die voor V_t geeft:

$$\left(\frac{V_t}{V_{L_3}}\right)^2 = \frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}; \left(\frac{V_t}{V_{L_2}}\right)^2 = \frac{(1 - \mu)}{2}; \left(\frac{V_t}{V_{L_1}}\right)^2 = \frac{1}{2(1 + \mu)}$$

De coëfficiënt van Poisson μ is dus te berekenen, indien de longitudinale en de transversale voortplantingssnelheid van hetzelfde proefstuk worden gemeten.

1.2.3 Oppervlaktegolven van Raleigh

De oppervlaktegolven kunnen optreden bij het grensvlak tussen twee media, de beweging der deeltjes neemt zeer snel af bij toenemende diepte in het materiaal. De trillingsrichting (zie fig. 6-3) staat loodrecht op de richting waarin de golf zich voortplant en loodrecht op het grensvlak van het materiaal met het omringende medium.

De voortplantingssnelheid van deze Raleighgolven in een plat vlak kan worden berekend uit de vergelijking:

$$A^3 - \frac{4}{1 + \mu} A^2 + \frac{2(2 - \mu)}{(1 - \mu)(1 + \mu)^2} A - \frac{1}{(1 - \mu)(1 + \mu)^2} = 0$$

waarin
$$A = \frac{V_r^2}{\frac{E_a \cdot g}{\gamma}}$$

Tot nu toe is van deze golven voor akoestisch onderzoek nog zeer weinig gebruik gemaakt. De laatste tijd wordt hiermee echter geëxperimenteerd, speciaal voor het onderzoek van platen en wegdekken.

Door combinatie van de formules voor V_L en die voor V_r kan eveneens de coëfficiënt van Poisson μ worden berekend.

1.3 Verband tussen statische en dynamische elasticiteitsmodulus

Het is dus mogelijk, hetzij met behulp van de methode van de resonantiefrequenties, hetzij met de methode van de voortplantingssnelheid te komen tot waarden voor resp. E_a en V_L . Bij de resonantiemethode (waar de resonantiefrequenties afhankelijk zijn van de afmetingen van het proefstuk) dient de E_a te worden gekoppeld aan de betonkwaliteit; bij de voortplantingssnelheid kan zowel de voortplantingssnelheid als de hieruit berekende E_a met de betonkwaliteit worden gecorreleerd. Van belang is nu in de eerste plaats te weten in hoeverre de dynamische (E_a) en de statische (E_{st}) elasticiteitsmodulus onderling verschillen dan wel overeenstemmen en wat onder de E_a moet worden verstaan. Onder de elasticiteitsmodulus van een materiaal bij een lijnspanningstoestand wordt verstaan het differentiaalquotient $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ bij een bepaalde spanning, waarin σ de spanning van het materiaal voorstelt en ε de daarbij optredende specifieke vormverandering. De elasticiteitsmodulus is afhankelijk van het materiaal zelf, van de grootte der belasting, van de snelheid waarmee de belasting wordt aangebracht en van de omstandigheden waarin het materiaal zich tijdens de proef bevindt (temperatuur en vochtigheid van het proefstuk en de omgeving waarin de proef wordt verricht). Bij een statische bepaling van de elasticiteitsmodulus (E_{st}) vindt men, in verband met de kromming van het σ - ε -diagram, die het gevolg is van het feit, dat de lengteverandering de wet van Hooke niet volgt, een E_{st} die lager is dan de $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ bij de laagste belastingstoestand.

Wordt nu uitgegaan van een voorbelast materiaal en wordt dit onderworpen aan een periodieke belastingswisseling met amplitude σ_m , dan blijkt dat in het σ - ε -diagram een hysteresislus (ABCD) wordt beschreven (zie fig. 7). Neemt de frequentie van de belastingswisseling toe, dan blijkt het parallelogram ABCD te worden samengedrukt naar de zijde AB en in het limietgeval wordt de elasticiteitsmodulus dus gegeven door de helling van de lijn AB. Geconstateerd werd dat AB evenwijdig loopt aan $OP = E_0 =$ raaklijn in O aan de σ - ε -curve; men meet dus de elasticiteitsmodulus voor een $\sigma = 0$, met andere woorden: de E_a is de elasticiteitsmodulus bij een spanning = 0. Dit is ook als volgt te zien: bij snelle belastingswisselingen met kleine amplitude treedt praktisch noch kruip noch plastische deformatie op en heeft men alleen te maken met de elastische eigenschappen van het materiaal.

Door bij de statische bepaling van de E , de belastingssnelheid steeds op te voeren toonde GLANVILLE¹⁾ in 1930 reeds aan, dat voor een momentane belasting de σ - ϵ -kromme voor niet te grote belastingen overgaat in een rechte lijn en dat daarbij de E_{st} gelijk is geworden aan de E_0 en dan onafhankelijk

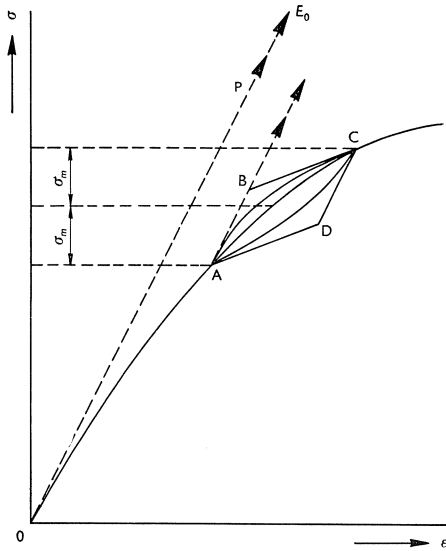


Fig. 7. Verband tussen de statische en de dynamische elasticiteitsmodulus.

is van de belasting. Dat de $E_d (= E_0 = E_{st}$ bij $\sigma = 0$) onafhankelijk is van de belasting werd proefondervindelijk aangetoond door op betonbalken $15 \times 15 \times 220$ cm proefbelastingen uit te voeren en gelijktijdig de resonantiefrequenties en de voortplantingssnelheid te bepalen (zie verder onder § 6).

Dat de E_d gelijk is aan de E_0 bij statische bepaling (raaklijn σ - ϵ -diagram) werd eveneens proefondervindelijk nagegaan voor de materialen staal en beton. Bij staal bleek de E_d tot max. 3 % te verschillen van de E_0 , voor beton werd een maximale afwijking geconstateerd van 14,5 %, terwijl in 90 % der onderzochte gevallen het verschil niet groter bleek te zijn dan 8 %. Wel is het opvallend, dat in alle gevallen van afwijking tussen E_d en E_0 steeds de grootste waarden werden gevonden voor E_d .

Uit deze onderzoeken bleek tevens de formule van LE CAMUS²⁾:

$$E_{\sigma} = E_0 \left(1 - 0,15 \frac{\sigma - 40}{100} \right) \quad (E_{st}, E_0 \text{ en } \sigma \text{ in kg/cm}^2)$$

tamelijk goed op te gaan. Aangezien $E_{\sigma} = E_{st}$ bij een spanning σ en $E_0 = E_d$ kan men eveneens schrijven:

$$E_{st} = E_d \left(1 - 0,15 \frac{\sigma - 40}{100} \right) \quad (E_{st}, E_d \text{ en } \sigma \text{ in kg/cm}^2)$$

welke dus geldt voor $\sigma > 40$ kg/cm². Tot een spanning van $\sigma = 40$ kg/cm² kan worden aangenomen $E_{st} = E_d$ (in 90 % der onderzochte gevallen was hierbij de E_d tot max. 8 % groter dan de E_{st}).

¹⁾ GLANVILLE, Creep or flow of concrete under load. Building Research Technical Paper. nr. 12. 1930,

²⁾ Le Camus, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. 1947, nr.32.

2 APPARATUUR

Achtereenvolgens worden behandeld de apparatuur voor het bepalen van de resonantiefrequenties en die voor het meten van de voortplantingssnelheid.

2.1 Apparatuur voor het bepalen van de resonantiefrequentie van proefstukken (resonantieapparaat)

Het prisma wordt voorzien van een dun ijzeren plaatje P (zie fig. 8) en op een stuk schuimrubber gelegd. Een toongenerator Tg geeft een wisselspanning met regelbare frequentie (3000–15 000 Hz), welke nauwkeurig op een schaalverdeling kan worden afgelezen. De wisselspanning van de toongenerator wordt via een versterker V_1 toegevoerd aan een spoel M, bevestigd op een staafmagneet. Deze spoel geeft een wisselend magnetisch veld, dat het ijzeren plaatje P op het proefstuk beurtelings aantrekt en afstoot. Is de frequentie van de toongenerator gelijk aan één van de resonantiefrequenties van het proefstuk, dan zal de amplitude van de trilling in het proefstuk snel toenemen. Een opnemer K, op een einde van het proefstuk geplaatst, geeft dan een grotere wisselspanning af, die na versterking V_2 een uitslag op een meetinstrument W geeft. Wordt de toongenerator door het gehele frequentiebereik gedraaid, dan zal het meetinstrument bij de resonantiefrequenties van het proefstuk een maximum uitslag geven. Voor het meten van longitudinale en transversale resonantiefrequenties is het plaatje P op het einde van het proefstuk geplaatst, voor het meten van de torsie-resonantiefrequenties is het plaatje op een zijvlak geplakt, daarbij rakend aan het bovenvlak en het eindvlak van het proefstuk.

Teneinde na te gaan of een bepaalde resonantiefrequentie de grondtoon dan wel een boventoon is, kan de opnemer langs het proefstuk worden verplaatst en de ligging van minimale en maximale meteruitslag (resp. knopen en buiken) worden vastgesteld. Zo zal b.v. (zie onder § 1) voor de longitudinale en de torsiegrondfrequentie de trillingsamplitude in het midden van het proefstuk minimum zijn en aan de beide uiteinden maximum.

Tenslotte is voor het ijken van de toongenerator nog een kristalgestuurde oscillator IJ aanwezig, welke een wisselspanning met een constante frequentie

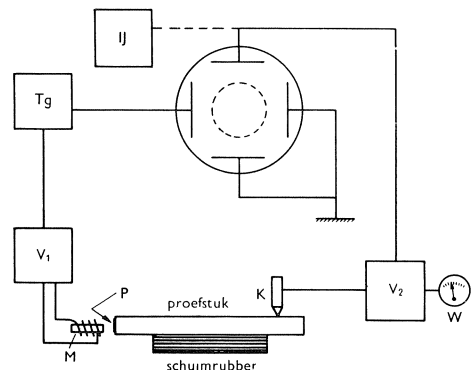


Fig. 8.
Schema van het resonantie-apparaat.

van 50 000 Hz afgeeft. Hiermee is het mogelijk bepaalde frequenties van de toongenerator te ijken op deze frequentie van 50 000 Hz.

Teneinde de nauwkeurigheid te kennen van de uiteindelijk berekende E_a werd nagegaan de invloed van:

a. Oplegging.

Hierbij werd het proefstuk met lengte l achtereenvolgens opgelegd op schuimrubber over de gehele lengte (l), symmetrisch opgelegd op schuimrubber van de lengte $1/2 l$, $1/4 l$ en $1/8 l$, aan de einden opgelegd op omgekeerde hoekstalen, op $0,224 l$ van de einden opgelegd op omgekeerde hoekstalen, op $0,25 l$ van de einden opgelegd op omgekeerde hoekstalen, op $0,5 l$ opgelegd op een omgekeerd hoekstaal en tenslotte in het midden ingeklemd. Bij de oplegging op schuimrubber bleek de lengte der oplegging nagenoeg geen invloed te hebben. Bij starre ondersteuning dient deze in de knooppunten plaats te vinden. De eenvoudigste oplegging is dus die op schuimrubber, welke methode dan ook als standaarduitvoering geldt.

b. Spleetwijdte tussen proefstuk en aanstootelement.

Deze invloed bleek praktisch nihil te zijn.

c. Stand van de magnetische aanstoter ten opzichte van het op het proefstuk geplakte ijzeren plaatje.

Ook deze invloed bleek nagenoeg nihil te zijn.

d. Druk van de opnemer.

De invloed hiervan kan eveneens worden verwaarloosd.

Uit achtereenvolgende metingen met en zonder tussentijdse ijking, waarbij de opnemer op verschillende afstanden van het eind van het proefstuk werd geplaatst volgens de lengteas en volgens een lijn loodrecht op de lengteas en uit metingen op de verschillende vlakken van prisma's, bleek tenslotte de mogelijke spreiding in de waarden van f_v , f_b en f_t steeds kleiner te zijn dan $\pm 0,20$ %. Bij berekening van de E_a uit de f_t zal dan de mogelijke spreiding in de $E_a \pm 1$ % bedragen, bij berekening van de E_a uit de f_b zal deze $\pm 2,5$ % bedragen. De mogelijke spreiding in de G_a (berekend uit f_t) zal ± 1 % zijn. Hieruit blijkt dus, dat het aan te bevelen is de E_a te berekenen uit de f_v . De mogelijke spreiding welke tenslotte in de berekende coëfficiënt van Poisson (uit f_t en f_v) zal komen, bedraagt $\pm 3,5$ %.

De werkwijze met het resonantieapparaat werd naar aanleiding van het voorgaande als volgt gestandaardiseerd:

De prisma's (met lengte $\geq 2 \times$ breedteafmeting) worden op schuimrubber opgelegd; de spleetwijdte tussen het ijzeren plaatje op het proefstuk en de aanstoter wordt aangehouden op ca. 1 mm, waarbij het hart van de aanstoter in het verlengde van de lengteas van het proefstuk ligt. De opnemer wordt op ca. 0–3 mm van het andere eind van het proefstuk geplaatst zodanig, dat de naald zich, in bovenaanzicht gezien, ongeveer op het midden van de breedte van het proefstuk bevindt.

2.2 Apparatuur voor het meten van de voortplantingssnelheid in beton

Hiervoor staan twee apparaten ter beschikking:

2.2.1 Apparaat voor het meten van de voortplantingssnelheid van trillingen met mechanische impuls (langsmeetapparaat met mechanische impuls)

Door middel van een hamertje wordt een trilling in het te onderzoeken materiaal gezonden (zie fig. 9). Deze mechanische impuls wordt tevens omgezet in een elektrische impuls door middel van een op de hamer bevestigde elektrische opnemer K_1 . Na versterking V_1 start de op deze wijze opgewekte trilling

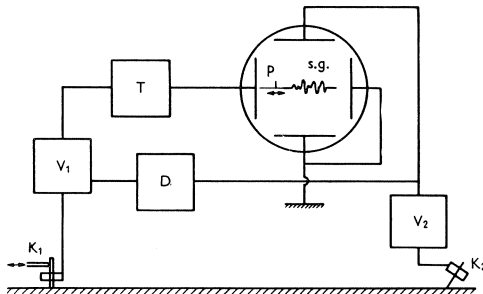


Fig. 9. Schema van het langsmeetapparaat met mechanische impuls.

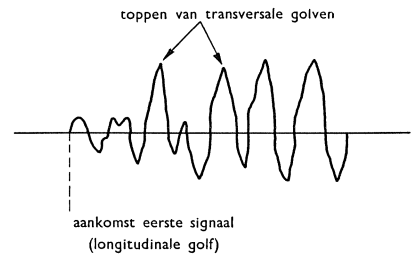


Fig. 10. Beeld s.g. op het scherm van de kathodestraal-oscillograaf.

een tijdbasischakeling T. Deze tijdbasis geeft op het scherm van een kathodestraalbuis een tijdlijn met een lengte van ca. 1000 μsec . Het startsignaal van het hamertje wordt tevens toegevoerd aan een zgn. „time-delay” (D). Deze geeft een signaal dat een bepaald met een potentiometer te regelen tijdsverschil geeft met de ingaande impuls. Dit tijdsverschil is te variëren van 0 tot 1000 μsec en af te lezen op een schaalverdeling. De impuls uit dit „time-delay” wordt op het scherm van de kathodestraalbuis zichtbaar als een verticaal streepje p. Een opnemer K_2 neemt de trilling welke door het materiaal is gelopen weer op en brengt dit signaal na versterking V_2 op het scherm van de kathodestraalbuis (s.g.). Men leest nu de verschuiving van het streepje p af die nodig is om dit samen te laten vallen met de beginpunten van de golfseries, welke op het scherm van de kathodestraalbuis zichtbaar zijn (zie fig. 10). Hier zijn achtereenvolgens zichtbaar de golven van de longitudinale en transversale trillingen. De Raleighgolven zijn nauwelijks te onderkennen. Nu wordt de opnemer K_2 over een bekende afstand verplaatst in de slagrichting van het hamertje, opnieuw de tijdimpuls op de groepsgolven ingesteld en weer afgelezen. Het verschil der twee tijden is nu nodig geweest voor het afleggen van de mechanische impulsen over de verplaatste afstand van de opnemer. De methode berust dan op het meten van verschillen, wat wordt gedaan door

op een uitgezette lijn de opnemer op bepaalde onderling gelijke afstanden (l_1 t/m l_n) te plaatsen en steeds de bijbehorende tijden (t_1 t/m t_n) af te lezen (zie fig. 11). Grafisch uitgezet geeft de helling van de door de punten getrokken rechte lijn de voortplantingssnelheden V_L en V_t . Hoe groter de meetlengte, des te nauwkeuriger de meting wordt. De lijnen (zie fig. 11) gaan niet door de oorsprong en dit geeft ook de reden aan waarom hier verschillen worden gemeten; er treedt in de hamer en in de apparatuur een kleine constante tijdsvertraging op, welke er de oorzaak van is, dat het apparaat uitsluitend geschikt is om langs het materiaal door middel van het meten van verschillen de longitudinale en transversale voortplantingssnelheden te bepalen.

Zou men door het beton heen willen meten, dan dient het punt waar de lijn de tijdas snijdt bekend te zijn (t_0). Dit punt zou tevoren moeten worden bepaald uit metingen aan materiaal waarvan de voortplantingssnelheid bekend is. Inderdaad is dit gebeurd en het is op deze wijze gelukt door het beton heen te meten. Hierbij traden echter moeilijkheden van andere aard op; het zou echter in dit verband te ver voeren hier nader op in te gaan. Verwacht mag worden dat het echter eerlang wel mogelijk zal zijn met dit apparaat niet alleen langs het beton, doch ook er doorheen te meten, in dat geval echter uitsluitend voor afstanden groter dan ca. 50 cm. Het apparaat is op twee manieren geijkt, direct en indirect. Bij de laatste methode wordt gebruik gemaakt van een stalen staaf, waarvan de resonantiefrequentie wordt gemeten en waaruit de V_L dus berekend kan worden ($V_L = 2 f_l \cdot l$). Vergelijking van de op deze wijze gevonden voortplantingssnelheid met de direct gemeten voortplantingssnelheid door het langsmmeetapparaat geeft de ijking van de apparatuur. De ijkfactor voor het aantal μsec per schaaldeel bleek 1,46 ($\mu\text{sec/schaaldeel}$) te bedragen. Voor de directe methode werd gebruik gemaakt van een toongenerator, welke een wisselspanning van 10,444 Hz kan leveren. Met deze wisselspanning werd de tijdbasis van het apparaat gesynchroniseerd. Hetzelfde signaal werd ook op de verticale afbuigplaten van de kathodestraalbuis gebracht. Hierdoor ontstond een stilstaand beeld van een sinusvormige figuur, waarvan de toppen een onderlinge afstand van $1/10,444 = 95,75 \mu\text{sec}$ hadden. De afstand der toppen werd ook gemeten met behulp van de tijdschaal der apparatuur. Het

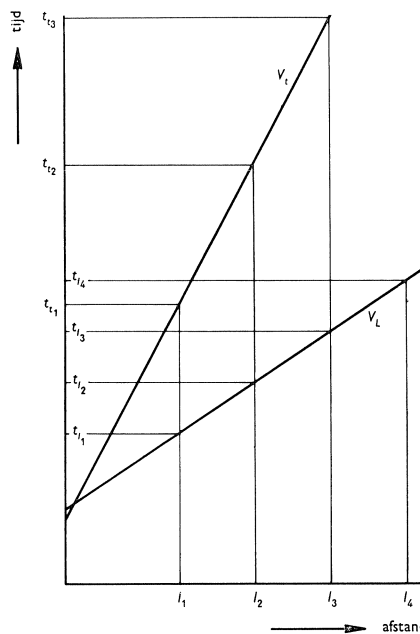


Fig. 11. Bepaling van de longitudinale en transversale voortplantingssnelheid.

resultaat was dat de ijkfactor thans $1,47 \mu\text{sec/schaaldeel}$ bedroeg. Aangezien de directe methode de nauwkeurigste is, werd de tijdschaal met behulp van de laatste waarde in μsec geijkt.

Teneinde de nauwkeurigheid van de metingen en de reproduceerbaarheid hiervan vast te stellen werd een balk $8 \times 8 \times 200 \text{ cm}$ viermaal achtereenvolgens doorgemeten volgens dezelfde lijn waarbij steeds om de 10 cm een waarneming werd verricht. Bij de vijfde meting werd elk punt viermaal gemeten. De resultaten werden zowel grafisch (door op het oog door de punten een lijn te trekken) als analytisch (door de lijn te berekenen) nagegaan. Figuur 12 geeft de resultaten. De analytische berekening geschiedde volgens de methode van de kleinste kwadraten. Tabel 1 geeft de vergelijkende waarden.

Tabel 1 Vergelijking van analytisch en grafisch berekende V_L .

| longitudinale voortplantingssnelheid | meting nr. | | | | |
|---|------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| analytisch berekende V_L | 3971 | 3908 | 3916 | 3912 | 3885 |
| grafisch berekende V_L | 3990 | 3945 | 3905 | 3925 | 3860 |
| verschil in % t.o.v. de analytisch berekende waarde | 0,53 | 0,94 | 0,28 | 0,33 | 0,64 |

Het blijkt dat het niet nodig is de bewerkelijke methode der kleinste vierkanten toe te passen daar het verschil ten opzichte van de V_L , welke uit de

Fig. 12. Bepaling van de longitudinale voortplantingssnelheid V_L .

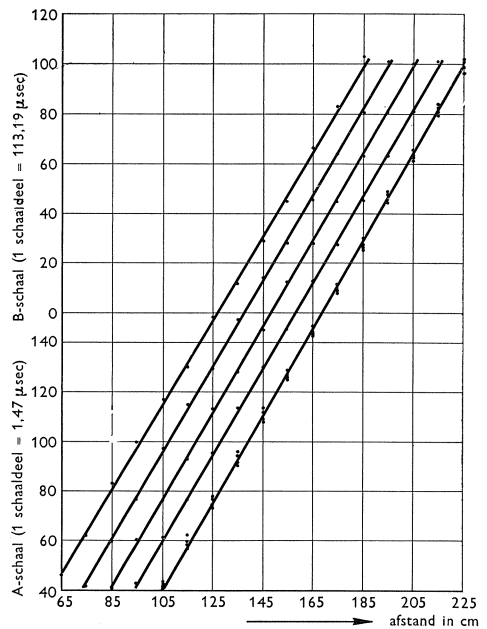
$$V_{L_1} = \frac{185 - 65}{[(152 + 99) - 47] 1,47} = 0,3990 \text{ cm}/\mu\text{sec} = 3990 \text{ m/sec}$$

$$V_{L_2} = \frac{120}{[(152 + 99) - 44] 1,47} = 0,3945 \text{ cm}/\mu\text{sec} = 3945 \text{ m/sec}$$

$$V_{L_3} = \frac{120}{[(152 + 99) - 42] 1,47} = 0,3905 \text{ cm}/\mu\text{sec} = 3905 \text{ m/sec}$$

$$V_{L_4} = \frac{120}{[(152 + 99) - 43] 1,47} = 0,3925 \text{ cm}/\mu\text{sec} = 3925 \text{ m/sec}$$

$$V_{L_5} = \frac{120}{[(152 + 99) - 40] 1,47} = 0,3860 \text{ cm}/\mu\text{sec} = 3860 \text{ m/sec}$$



helling van de op het oog door de waarnemingspunten getrokken lijn werd bepaald, zeer gering is. Eveneens is het niet nodig per waarnemingspunt meer dan één waarneming te verrichten.

Uit deze en vele andere metingen kon tenslotte worden vastgesteld dat de onnauwkeurigheid in de tijdmeting en in de meting van de afstand resulteerde in een onnauwkeurigheid van de V_L en V_t van ten hoogste 1,0 % resp. 0,5 % bij kleine afstanden; voor grotere afstanden is de nauwkeurigheid nog groter. Voor de berekende waarde van de E_d (met dwarsafmetingen klein resp. groot ten opzichte van de golflengte) wordt de onnauwkeurigheid ten hoogste 3 % resp. 6 %.

De waarde van μ , berekend uit de V_L en de V_t heeft al naar de dwarsafmetingen van het te onderzoeken project klein dan wel groot zijn ten opzichte van de toegepaste golflengte (deze bedraagt ca. 35 à 45 cm), een onnauwkeurigheid van ten hoogste 3 % resp. 6 %. Dit alles geldt dus voor afstanden tot ca. 50 cm. Waar in de praktijk tot max. ca. 2,50 m wordt gemeten, wordt de onnauwkeurigheid tot ca. de helft gereduceerd (max. ca. 3 %) hetgeen aanvaardbaar is. Zou men grotere nauwkeurigheid wensen, dan dient men de metingen per punt in b.v. viervoud te verrichten. In dit laatste geval wordt de onnauwkeurigheid in de V_L en V_t ten hoogste 0,2 resp. 0,1 % en die in de E_d max. 2,5 %.

2.2.2 Apparaat voor het meten van de voortplantingssnelheid van trillingen met ultrasonische impuls (ultrasonisch doormoetapparaat)

Fig. 13 geeft het principe-schema van het apparaat. Een generator G geeft 50 maal per sec een elektrische impuls, welke wordt toegevoegd aan een zgn. „time-delay” D_1 . Deze schakeling geeft een elektrische impuls die met de ingaande impuls een tijdsverschil geeft, welk met behulp van een potentiometer nog kan worden gevarieerd. De uitgaande impuls wordt vervolgens versterkt en via een zender Z, toegevoerd aan een zendkristal K_1 , dat hierdoor een mechanische trilling met frequentie van ca. 200 000 Hz geeft. De impuls van de generator G wordt eveneens toegevoerd aan een tweede „time-delay” D_2 , welke een tijdbasischakeling T start die op het schema van de kathodestraalbuis een tijdlijn te zien geeft, die met instelbare snelheid van links naar rechts loopt. Op deze tijdbasis wordt door middel van een oscillator O, eveneens gestart door de generator-impuls, een tijdschaal aangebracht welke bestaat uit een aantal verticale streepjes met onderlinge afstand van 10 μ sec. Het door het ontvangkristal K_2 opgenomen signaal wordt na versterking V

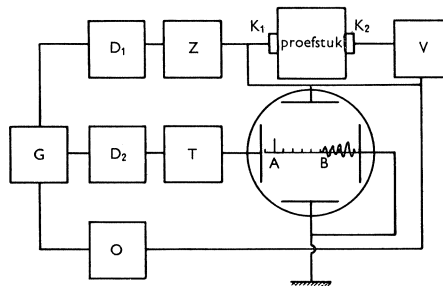


Fig. 13. Schema van het ultrasonisch doormoetapparaat.

aan de platen der kathodestraalbuis toegevoerd, waar dan een golfreintje op de tijdbasis te zien komt. De geijkte potentiometer van de tijdvertraging der zender wordt nu op nul ingesteld en met een tweede regelknop het beeld der zendimpuls op het scherm precies op een streep van de schaalverdeling gebracht. Daarna worden zend- en ontvangkristal tegen het proefstuk gebracht (voor goede overdracht worden deze ingesmeerd met een mengsel van kaolien en glycerine). Men telt nu het aantal hele schaaldelen tussen zendimpuls en het ontvangen signaal (n schaaldelen). Vervolgens wordt met de geijkte potentiometer de zendimpuls zover verschoven tot het beginpunt van het ontvangen signaal samenvalt met een streep van de schaalverdeling. Men leest nu op de potentiometerschaal een tijd t af, waardoor de totale looptijd van de impuls door het materiaal $(10n + t)$ μsec is geworden.

Met het apparaat kan uitsluitend door het beton heen worden gemeten en wel van een minimale dikte van ca. 1 cm tot maximaal ca. 150 cm.

De nauwkeurigheid van meten hangt in hoofdzaak af van de nauwkeurigheid waarmee de afstand van doormeten kan worden gemeten en neemt dus toe bij grotere afstand. De max. mogelijke fout in de tijdmeting kan bedragen $\left(0,001 + \frac{0,2 \times 100}{t}\right)$ % waarin t de tijd gemeten in μsec voorstelt. Zo zal voor het doormeten van een kubus ($20 \times 20 \times 20$ cm) de mogelijke fout in de tijdmeting ca. 0,4 % bedragen, de fout in de lengtemeting ca. 0,5 % zodat de mogelijke fout in de gevonden voortplantingssnelheid in dit geval ca. 1 % zal bedragen. Voor grotere afstanden is deze fout dus weer geringer.

Daar met het apparaat uitsluitend de longitudinale voortplantingssnelheid kan worden bepaald en de golflengte ca. 2 à 3 cm bedraagt, zullen dus praktisch steeds de dwarsafmetingen van het te meten object groot zijn ten opzichte van de golflengte (V_{L_3}). Dit betekent dat om de E_a te berekenen men de μ dient te kennen. Dit zal dus of met het langsmmeetapparaat moeten gebeuren dan wel dat een waarde voor μ moet worden aangenomen. Hierdoor zal de mogelijke fout in de berekende E_a -waarde max. ca. 10 % kunnen bedragen.

2.3 Vergelijkende metingen met resonantieapparaat, langsmmeetapparaat met mechanische impuls en ultrasonisch doormmeetapparaat

Aangezien met de drie besproken apparaten de voortplantingssnelheid kan worden bepaald, werd voor de materialen staal, mortel en beton nagegaan in hoeverre bij metingen met de drie apparaten aan eenzelfde proefstuk gelijke waarden van de longitudinale voortplantingssnelheid werden gevonden.

Met behulp van het resonantieapparaat werd uit f_l en f_t de μ berekend en uit f_t de V_{L_1} gevonden.

Met behulp van het langsmmeetapparaat werd uit V_{L_1} en V_t de μ berekend en met het ultrasonisch doormmeetapparaat werd V_{L_3} gevonden.

Met behulp van de μ -waarden konden de gevonden waarden voor V_{L_1} (resonantieapparaat en langsmmeetapparaat) worden omgerekend tot V_{L_3} -waarden.

Tabel 2 geeft de resultaten voor de drie materialen. Het blijkt dat de meetresultaten zeer goed overeenkomen. Voor staal bedraagt de maximale onderlinge afwijking ca. 0,5 %, voor mortel (microbeton) ca. 1 % en voor beton ca. 2 %.

Tabel 2 Vergelijking van metingen met drie akoestische apparaten (gemiddelde waarden uit alle metingen)

| | materiaal | | | | | |
|---|----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| | staal (V_L in m/sec) | | mortel (V_L in m/sec) | | beton (V_L in m/sec) | |
| | V_{L_1} | V_{L_3} | V_{L_1} | V_{L_3} | V_{L_1} | V_{L_3} |
| resonantie-apparaat | 5193 | 5945 | 4280 | 4625 | 3790 | 4000 |
| langsmmeetapparaat | 5205 | 5950 | — | — | 3805 | 4020 |
| doormmeetapparaat | — | 5965 | — | 4662 | — | 4076 |
| max. verschil tussen V_{L_3} berekend en gemeten in % | 0,3 | | 0,8 | | 1,9 | |
| aantal metingen | 24 | | 21 | | 14 | |

Men kan de apparaten dus zeer goed voor bepaalde metingen op elkaar aan laten sluiten en b.v. de coëfficiënt van Poisson, met één apparaat bepaald, toepassen op berekeningen met de meetresultaten van een ander apparaat (uiteraard van hetzelfde proefstuk verkregen).

3 MOGELIJKHEDEN VOOR DE CONTROLE VAN DE BETONKWALITEIT

Allereerst dient hiervoor nader op het begrip betonkwaliteit te worden ingegaan. De kwaliteit vertoont nl. twee facetten, een absolute waarde welke men door middel van cijfers tracht vast te leggen en een grotere of kleinere gelijkmatigheid van deze absolute waarde, dus de variatie welke in de gevonden cijfers optreedt indien het cijfer van de absolute waarde $n \times$ wordt bepaald. Er wordt wel eens over het hoofd gezien, dat het laatstgenoemde facet van de kwaliteit veelal belangrijker is dan het eerstgenoemde. Indien b.v. voor een betonconstructie een eis van 200 kg/cm² druksterkte is gesteld, dan is het beter als de gemiddelde sterkte 240 kg/cm² bedraagt met een spreiding van ± 50 kg/cm², dan wanneer de gemiddelde sterkte 260 kg/cm² bedraagt met een spreiding van ± 100 kg/cm². Hoe gelijkmatiger de kwaliteit des te beter dit is voor de constructie. Deze grotere of kleinere gelijkmatigheid is het gevolg van onvolkomenheden in het materiaal en van onvolkomenheden in de outillage en de methodiek waarmee het materiaal is verwerkt.

Men heeft b.v. (zie fig. 14) twee verschillende toeslaggraderingen A en B (als gevolg van de aanwezigheid van één soort grind en twee soorten zand) en men zet de bijbehorende sterkten K_A en K_B (als ordinaten) uit als functie van de mogelijke fout in de dosering van de hoeveelheid zand (± 5 , ± 10 % etc.). Beschouwt men nu de met deze fouten overeenkomende sterkten, dan blijkt direct dat, indien men op het bouwwerk het personeel, de outillage en de methode heeft, waardoor ervoor gezorgd kan worden, dat de fout in de hoeveelheid zand altijd kleiner is dan 5 %, gradering A beter is dan gradering B. Zou de mogelijke fout in de hoeveelheid zand echter groter zijn dan 10 of 15 %, dan is het beter gebruik te maken van gradering B. Gradering A is gevoeliger voor sterktevariaties dan gradering B.

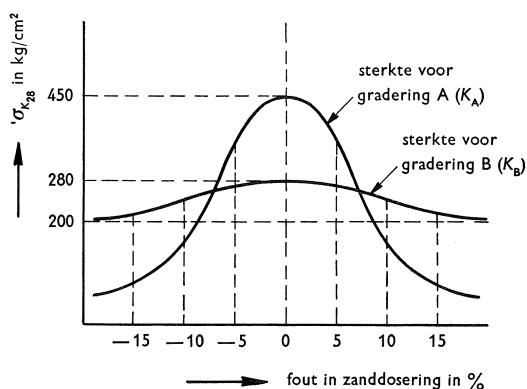


Fig. 14. Vergelijking van twee zandsorten.

Meestentijds neemt men als criterium voor de betonkwaliteit de druksterkte. Het kan echter voorkomen, dat beton met hoge druksterkte een lage treksterkte heeft; dat het beton een grote doorlaatbaarheid kan hebben ondanks goede mechanische kwaliteit; voorts kan het beton al of niet bestand zijn tegen vorstinwerking en eventuele scheuren onder de invloed van de krimp. Men zou dus afhankelijk van de eisen, welke aan een constructie worden gesteld, ook de criteria voor de betonkwaliteit moeten kiezen en hiervoor zowel de absolute waarde als de spreiding daarin moeten vaststellen.

Waar nu bij de akoestische meetmethoden waarden worden gevonden voor de voortplantingssnelheid (langsmeetapparaat met mechanische impuls, ultrasonische doormeetapparaat) en/of de dynamische elasticiteitsmodulus (resonantieapparaat), dient te worden nagegaan in hoeverre deze een beoordeling van de kwaliteit van beton kunnen geven, hetzij als zelfstandige graadmeter hetzij in correlatie met de sterkte, waterdoorlaatbaarheid, vorstbestendigheid, etc. (welke dus momenteel vertrouwde criteria voor de kwaliteit zijn). Zo heeft men in de Verenigde Staten een kwaliteitsindex voor de voortplantingssnelheid gevonden, welke luidt:

- $V_L > 4560$ m/sec beton van zeer goede kwaliteit
- 3660–4560 m/sec beton van redelijke tot goede kwaliteit
- 3050–3660 m/sec beton van vrij slechte tot redelijke kwaliteit
- 2130–3050 m/sec beton van over 't algemeen slechte kwaliteit
- < 2130 m/sec beton van zeer slechte kwaliteit

De methode om door middel van correlatiecijfers van V_L (eventueel via E_d) over te gaan op een meer bekende kwaliteitsaanduiding als de sterkte is in de

onderstaande formules uitgewerkt.

$$E_d = \frac{C}{1-\mu} \sqrt[3]{\sigma_k} \quad \text{waarin } \sigma_k = \text{kubusdruksterkte in kg/cm}^2$$

$$\mu = \text{coëfficiënt van Poisson}$$

$$C = \text{ca. } 40\,000 \text{ in } (\text{kg/cm}^2)^{2/3}$$

$$E_d = C \sqrt{\sigma_t} \quad \text{waarin } \sigma_t = \text{treksterkte in kg/cm}^2$$

$$C = \text{ca. } 70\,000 \text{ in } (\text{kg/cm}^2)^{1/2}$$

$$\sigma_{bt} = 2,05 + 5,4 E_d + 0,48 E_d^2$$

waarin σ_{bt} = buigtreksterkte in kg/cm²
 E_d = dynamische elasticiteitsmodulus in 10⁵ kg/cm²

Het is gebleken dat een direct verband tussen V_L en de sterkte een ingewikkelde mathematische vorm krijgt, welke eenvoudiger grafisch kan worden weergegeven. De afwijking waarmee men op deze wijze de absolute waarde van de sterkte bepaalt, hangt af in hoeverre men de betonsamenstelling en meetcondities (vochtige, droge beton) kent. Deze hebben nl. hun invloed op de constanten en men dient dus aan de hand van proefstukken van dezelfde samenstelling eerst de constante C te bepalen. Men kan zeggen dat bij een behoorlijke bepaling van tevoren van C de mogelijke fout in absolute waarde van de sterkte $\pm 10\%$ zal bedragen. Indien over de betonsamenstelling weinig of niets bekend is, zal de mogelijke spreiding ca. 35% kunnen bedragen.

Wat betreft de spreiding in de absolute waarde van de kwaliteitsaanduiding geeft de akoestische meetmethode een uitstekend middel om deze vast te stellen. De invloed van ongelijke verdichting, aanwezigheid van grindnesten en eventueel ook scheuren, volgen direct uit de metingen. Indien het oppervlaktescheuren betreft en deze niet met water gevuld zijn, kan ook de diepte der scheuren (vanaf minimaal ca. 1,5 cm) worden berekend.

Daar een en ander niet-destructief verloopt, kan het geheel als functie van de tijd worden bepaald. Eventuele invloed van verschijnselen die zich voordoen in het tijdsverloop waarover wordt gemeten, blijken steeds uit de metingen, zoals de invloed van de verhardingstijd, de aantasting door corrosieve omgeving, vorst, plaatselijke zware belastingen, welke op den duur scheuren geven.

Het is duidelijk dat een en ander aanleiding heeft gegeven tot zeer uitvoerige proefnemingen, welke nog steeds voortduren. Deze proeven zijn en worden verricht met de drie hiervoor beschreven apparaten. Achtereenvolgens zal nu het onderzoek hiermee (voor zover gereed) worden besproken.

Aangezien het resonantieapparaat zeer geschikt is voor laboratoriummetingen op proefstukken van beperkte afmetingen (max. 30 × 30 × 250 cm) en het tevens gewenst was de invloed van de variabelen na te gaan voor zo homogeen mogelijke beton werd met dit apparaat onderzoek verricht op proefstukken 4 × 4 × 16 cm van microbeton. Waar niet anders vermeld

is de samenstelling: 1 cement: 3 zand (gew. delen) met 11 gew. % water, terwijl de korrelverdeling van het zand bestaat uit:

1 gew. dl. 2,8–5,6 mm
1 gew. dl. 1,4–2,8 mm
1 gew. dl. < 1,4 mm te weten

$$\left\{ \begin{array}{l} 5-10 \% \quad 0,300-0,60 \text{ mm} \\ 80-90 \% \quad 0,150-0,300 \text{ mm} \\ 5-10 \% \quad 0,075-0,150 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Met het langsmmeetapparaat met mechanische impuls werd in eerste instantie nagegaan wat de invloedssfeer van het apparaat was; vervolgens in hoeverre het mogelijk was scheuren op te sporen en eventueel de diepte hiervan na te gaan; eventuele invloed van de wapening en tenslotte metingen over de homogeniteit van betonconstructies.

Met het ultrasonisch doormeetapparaat wordt voor betonproefstukken de verdere correlatie nagegaan tussen $V_L(E_a)$ en de bekende kwaliteitsaanduidingen, waarvan in de eerste plaats de sterkte.

4 ONDERZOEK MET HET RESONANTIEAPPARAAT

In eerste instantie werden, uitgaande van een groot homogeen cementmonster portlandcement A, 100 microbetonproefstukken $4 \times 4 \times 16$ cm vervaardigd, teneinde na te gaan in hoeverre de correlatie tussen sterkte en E_a aan spreiding onderhevig was bij deze gunstige omstandigheden. Daartoe werd bij 28 dagen ouderdom (verharding steeds onder water) zowel de buigtreksterkte, de druksterkte (op de twee overblijvende helften van de buigproef) als de E_a bepaald. Nagegaan werd de eenvoudigste uit de literatuur reeds bekende formule van het verband tussen E_a en sterkte nl. $E_a = C_a / \sigma_a$ en $E_a = C_{bt} / \sigma_{bt}$. Het bleek dat de spreiding in de constanten C_a en C_{bt} zodanig is, dat uit de bepaling van de E_a na 28 dagen over n proefstukken, de waarde σ_a resp. σ_{bt} met 95 % zekerheid niet meer zal afwijken dan $\frac{8,9}{\sqrt{n}}$ % resp. $\frac{13,2}{\sqrt{n}}$ %.

Dit betekent, dat, bij aanwezigheid van 3 proefstukken voor een serie zoals gebruikelijk is, de praktisch mogelijke fout t.o.v. de uit de E_a berekende druksterkte $\pm 5,1$ % en t.o.v. de buigtreksterkte $\pm 7,6$ % zal bedragen voor dit microbeton. Tevens bleek statistisch, dat deze spreiding voor 70 % wordt bepaald door de spreiding in de sterktebepaling.

Vervolgens werden op 6 verschillende dagen 6 series microbetonproefstukken (elk van 36 stuks) vervaardigd, waarvan drie series met portlandcement klasse A en drie series met portlandcement klasse B. Op regelmatige tijdstippen werd de E_a bepaald, terwijl tevens bij regelmatig toenemende ouderdom steeds vier proefstukken op sterkte werden beproefd. De verharding had plaats onder water (19 °C). De figuren 15 en 16 geven de resultaten als verband tussen de sterkte en de E_a .

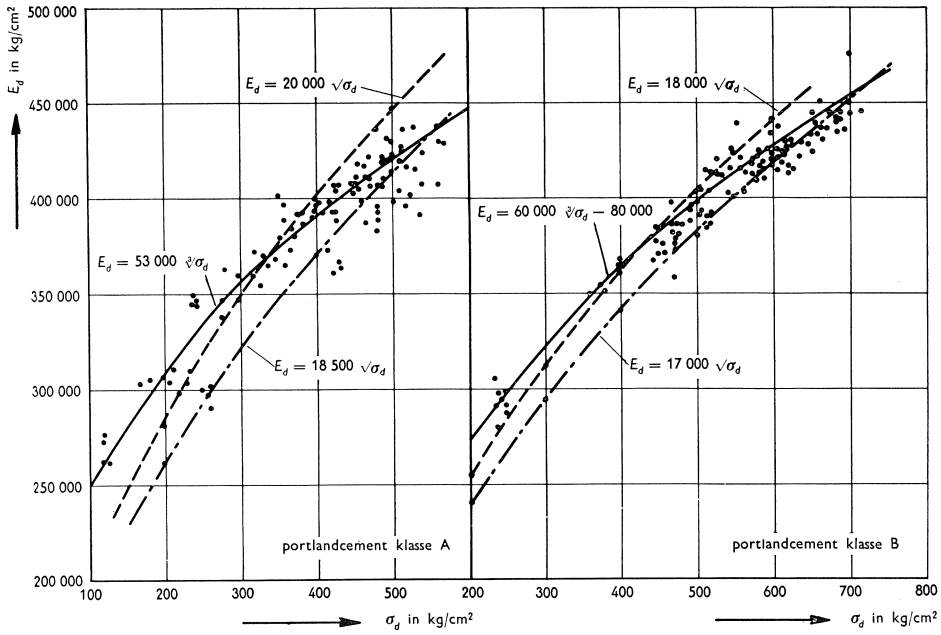


Fig. 15. Verband tussen σ_d en E_d voor portlandcement A (linker figuur) en portlandcement B (rechter figuur).

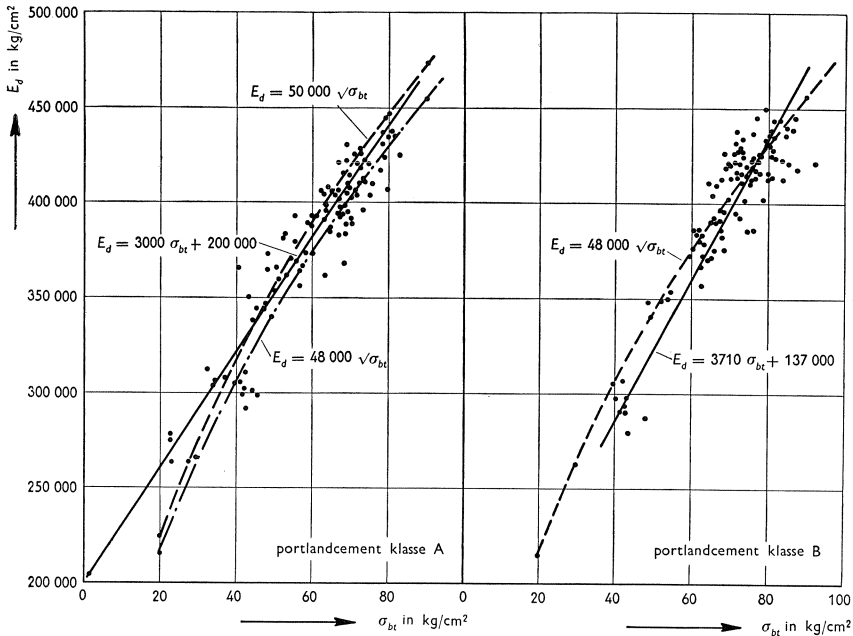


Fig. 16. Verband tussen σ_{bt} en E_d voor portlandcement A (linker figuur) en portlandcement B (rechter figuur).

Het bleek dat de correlatie tussen druksterkte en E_a het beste werd weergegeven door de formule:

$$E_a = 53\,000 \sqrt[3]{\sigma_a} \quad (\text{voor portlandcement A})$$

$$E_a = 60\,000 \sqrt[3]{\sigma_a} - 80\,000 \quad (\text{voor portlandcement B})$$

Voor de correlatie tussen buigtreksterkte en E_a werd gevonden:

$$E_a = 3000 \sigma_{bt} + 200\,000 \quad (\text{voor portlandcement A})$$

$$E_a = 3710 \sigma_{bt} + 137\,000 \quad (\text{voor portlandcement B})$$

De mogelijke fout welke men maakt in de berekening van de sterkte door middel van de gevonden formules, blijkt met 99 % zekerheid niet meer te bedragen dan:

$$\pm 10 \% \quad \text{voor het verband } E_a - \sigma_a \text{ voor portlandcement A}$$

$$\pm 8 \% \quad \text{voor het verband } E_a - \sigma_a \text{ voor portlandcement B}$$

$$\pm 14 \% \quad \text{voor het verband } E_a - \sigma_{bt} \text{ voor portlandcement A}$$

$$\pm 12,5 \% \quad \text{voor het verband } E_a - \sigma_{bt} \text{ voor portlandcement B}$$

Het blijkt dus, dat inderdaad sprake is van een correlatie tussen de E_a en de sterkte en dat van genoemde microbetonproefstukken het mogelijk is met redelijke zekerheid uit de niet-destructieve E_a -bepaling te komen tot de druk- en buigtreksterkte.

Dit opent dan ook de mogelijkheid van akoestische cementkeuring. Daartoe worden van de ter keuring aangeboden cementmonsters naast de proefstukken, welke nodig zijn voor de keuring volgens N 493, prisma's microbeton $4 \times 4 \times 16$ cm vervaardigd. Van deze proefstukken wordt het verband tussen E_a en de tijd bepaald en de druk- en buigsterkte vastgesteld bij 3, 7 en 28 dagen ouderdom (als gemiddelde van 3 proefstukken). De verharding vindt steeds onder water plaats. Uit het verloop van de E_a in de tijd, waarvoor de metingen tot 200 dagen ouderdom zijn voortgezet, bleek weer, dat door grafisch uitzetten van de E_a op lineaire schaal t.o.v. de tijd op logaritmische schaal voor alle onderzochte cementsoorten voor bepaalde tijdsgebieden een rechtlijnig verloop werd gevonden. Voor een deel der cementsoorten wordt in dit rechtlijnig verlopen van E_a t.o.v. de tijd een knik gevonden bij een ouderdom van 7 tot 10 dagen, voor een ander deel is over het gehele tijdsgebied het verband rechtlijnig.

Aangezien dus steeds de E_a als functie van de tijd (logaritmisch uitgezet) rechtlijnig verloopt van 3–7 dagen en van 10–200 dagen, kan uit een E_a -bepaling op 2 tijdstippen b.v. na 10 en 14 dagen, de E_a na 28 dagen worden berekend, eveneens uit de E_a na 3 en 5 dagen die na 7 dagen. Op deze wijze kan uit vier waarnemingen ook de druk- en buigsterkte worden berekend bij 3, 7 en 28 dagen ouderdom van de microbetonproefstukken. Het gaat er nu om in hoeverre de sterkte, bepaald aan microbetonproefstukken, zich verhoudt tot de sterkte bepaald volgens normblad N 493 en in hoeverre de eisen in dit normblad gesteld, moeten luiden voor de „plastische mortel”-methode (= „microbeton”-methode). Het is duidelijk dat hier zeer veel cijfermateriaal voor nodig is. De verwachting mag echter worden uitgesproken, dat het

te zijner tijd mogelijk zal zijn de cementkeuring op niet-destructieve wijze uit te voeren. Per keuring zijn dus slechts drie proefstukken nodig, waarvan de E_a na 3, 5, 10 en 14 dagen moet worden berekend. Het is duidelijk dat dit een grote vereenvoudiging van de bestaande keuringsmethode zou betekenen (waarbij 15 kubi $7,1 \times 7,1 \times 7,1$ cm en 30 trekproefstukjes in de vorm van een acht worden vervaardigd).

Teneinde na te gaan in hoeverre van een correlatie tussen de E_a en de sterkte kan worden gesproken, indien de samenstelling van het microbeton wordt gewijzigd, werd onderzoek verricht met de volgende microbetonsamenstellingen, zowel met portlandcement A als met portlandcement B:

- a 1 cement : 3 zand (vol.dln) of 1 cement : 4,28 zand (gew.dln)
dus ca. 400 kg cement/m³
- b 1 cement : 4 zand (vol.dln) of 1 cement : 5,70 zand (gew.dln)
dus ca. 310 kg cement/m³
- c 1 cement : 5 zand (vol.dln) of 1 cement : 7,12 zand (gew.dln)
dus ca. 250 kg cement/m³

De w.c.-factor werd als volgt gevarieerd:

- a. w.c.-factor: 0,45 (getrild), 0,55 (gestampt) en 0,65 (licht gepord)
- b. w.c.-factor: 0,60 (getrild), 0,70 (gestampt) en 0,80 (licht gepord)
- c. w.c.-factor: 0,80 (getrild), 0,90 (gestampt) en 1,00 (licht gepord)

Deze w.c.-factoren zijn zodanig gekozen, dat kolomsgewijs in bovenstaand staatje steeds dezelfde consistentie aanwezig was en dus ook dezelfde methode van verdichten werd toegepast. De E_a werd bij oplopende ouderdom bepaald en de sterkte uitsluitend bij 7 en 28 dagen ouderdom. De verharding der proefstukken had steeds plaats onder water (19 °C).

Hiernaast werd nog een serie proefstukken vervaardigd, waarbij de verharding plaats vond bij 65 % R.V. en 19 °C. Deze serie bestond uit:

1 cement : 3 zand (vol.dln), w.c.-factor 0,54 (stampen)

1 cement : 4 zand (vol.dln), w.c.-factor 0,72 (stampen)

1 cement : 5 zand (vol.dln), w.c.-factor 0,88 (stampen)

waarbij de proefstukken dus dezelfde consistentie hadden.

Daar het op eenvoudige wijze mogelijk is uit de E_a de V_L te berekenen, werd, teneinde betere aansluiting te verkrijgen voor het onderzoek met het ultrasonisch doormeetapparaat, naast een vergelijking tussen sterkte en E_a ook die tussen sterkte en V_L nagegaan.

In de figuren 17 t/m 20 is dit verband vastgelegd voor de cementsoort portlandcement A en in de figuren 21 t/m 24 voor de series vervaardigd met portlandcement B. Hieruit blijkt duidelijk, dat per cement:toeslag-verhouding de invloed van ouderdom en w.c.-factor voert tot een zeer goede correlatie tussen de sterkte (hetzij druk-, hetzij buigtreksterkte) en de E_a of V_L .

Hoofdzakelijk is dus van belang de verhouding cement:toeslag voor de correlatie tussen de sterkte en de akoestisch bepaalde waarden E_a en/of V_L . Het zal dus nodig zijn voor de verschillende cement:toeslag-verhoudingen

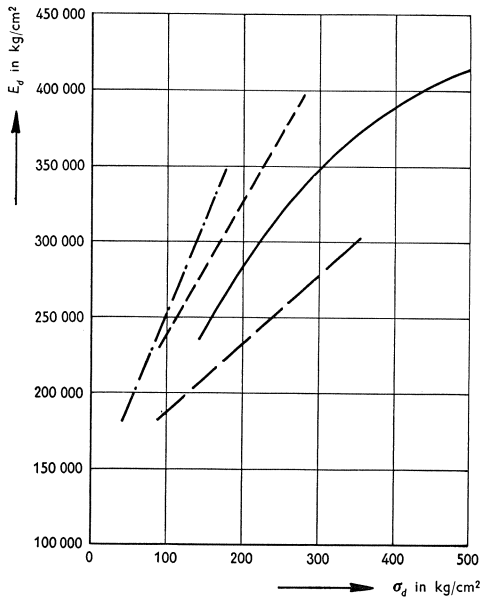


Fig. 17. Invloed van het cementgehalte op het verband tussen E_d en σ_d voor portlandcement A (legenda onderaan p. 25).

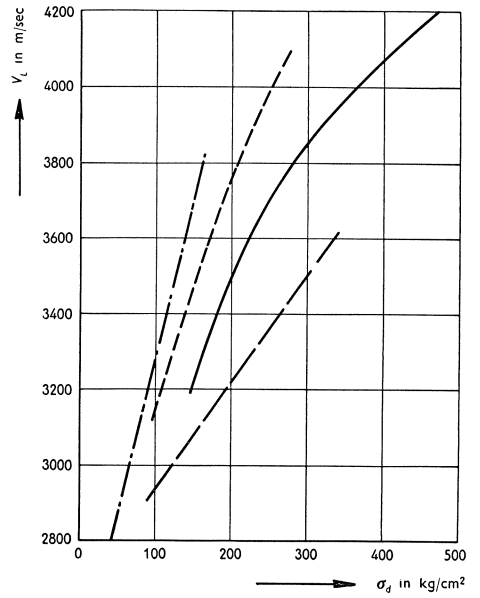


Fig. 18. Invloed van het cementgehalte op het verband tussen V_L en σ_d voor portlandcement A (legenda onderaan p. 25).

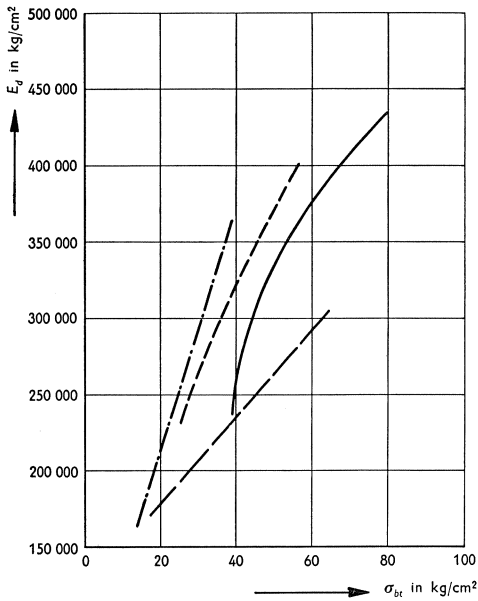


Fig. 19. Invloed van het cementgehalte op het verband tussen E_d en σ_{bt} voor portlandcement A (legenda onderaan p. 25).

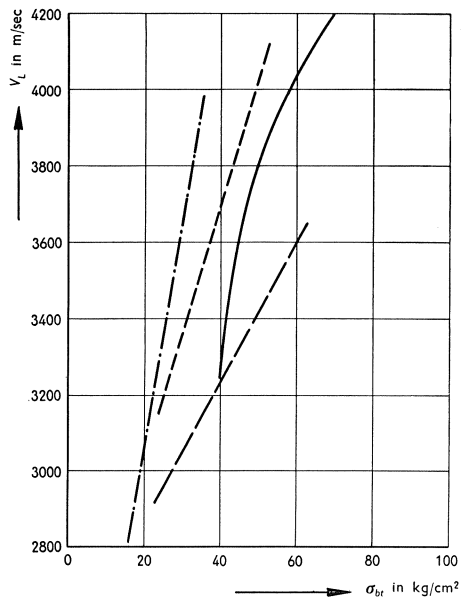


Fig. 20. Invloed van het cementgehalte op het verband tussen V_L en σ_{bt} voor portlandcement A (legenda onderaan p. 25).

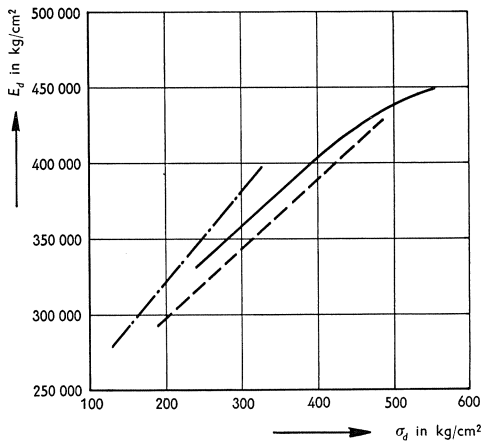


Fig. 21. Invloed van het cementgehalte op het verband tussen E_d en σ_d voor portlandcement B. (legenda onderaan deze pagina)

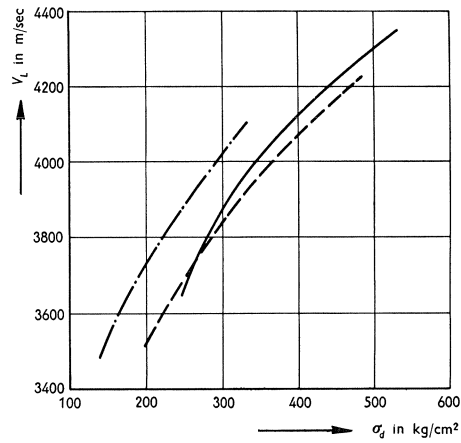


Fig. 22. Invloed van het cementgehalte op het verband tussen V_L en σ_d voor portlandcement B. (legenda onderaan deze pagina)

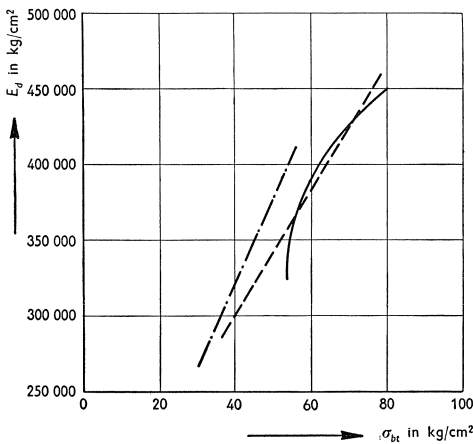


Fig. 23. Invloed van het cementgehalte op het verband tussen E_d en σ_{bt} voor portlandcement B.

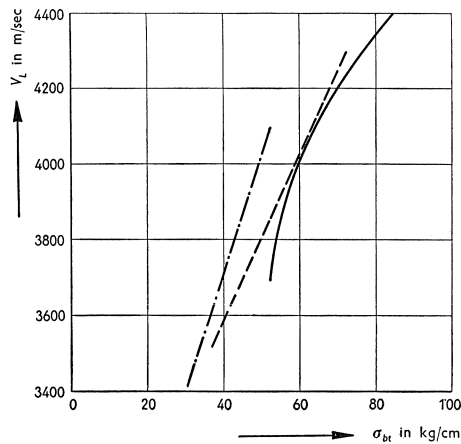


Fig. 24. Invloed van het cementgehalte op het verband tussen V_L en σ_{bt} voor portlandcement B.

Legenda voor fig. 17 tot en met 24

| | | |
|---------|---|-----------------------------------|
| ———— | cement/toeslag = 1 : 3; w.c.-factor 0,45, 0,55 en 0,65. | } verharden steeds onder water |
| - - - - | cement/toeslag = 1 : 4; w.c.-factor 0,60, 0,70 en 0,80. | |
| - . . - | cement/toeslag = 1 : 5; w.c.-factor 0,80, 0,90 en 1,00. | |
| — — — | { cement/toeslag = 1 : 3; w.c.-factor 0,54. | } verharden bij 65% R.V. en 19 °C |
| — — — | { cement/toeslag = 1 : 4; w.c.-factor 0,72. | |
| — — — | { cement/toeslag = 1 : 5; w.c.-factor 0,88. | |

bij beton de correlaties tussen de sterkte en $E_a(V_L)$ na te gaan. Het verloop van de correlatie bij een bepaalde cement : toeslag-verhouding kan worden bepaald door variatie in de ouderdom, in de w.c.-factor en/of in de gradering.

Voor praktijkmetingen in de toekomst zal het dan dus van het grootste belang zijn de cement : toeslag-verhouding te kennen, daar hierbij een bepaalde correlatieformule (grafiek) met redelijke nauwkeurigheid gegevens over de sterkte verstrekt.

Het tweede zeer belangrijke punt, dat uit de metingen volgt, is de invloed van de wijze van verharden. Immers voorgaande conclusies zijn uitsluitend gebaseerd op de methode van steeds onder water verharden. Het blijkt nu echter dat verharden bij 65 % R.V. en 19 °C geen aansluiting geeft op de gevonden correlaties bij verharden onder water. Het is dus gewenst nadere gegevens te verkrijgen over de invloed van de verharding, indien de methodiek voor praktijkmetingen dient te worden toegepast.

Daar voor laboratoriummetingen en de hierbij verrichte keuringsproeven meestentijds verharden onder water (b.v. cementkeuring) wordt toegepast, wordt hier dus de mogelijkheid bevestigd om b.v. de cementkeuring op akoestische wijze te laten plaats vinden, hetgeen zoals reeds werd opgemerkt door de vermindering van het aantal proefstukken en de grote snelheid der metingen besparing van tijd en kosten met zich mee zal brengen.

De invloed van de omstandigheden tijdens de latere verhardingsperiode op de correlatie tussen E_a en de sterkte werd tijdens nieuwe proeven met microbetonproefstukken onderzocht. Teneinde van een gelijke aanvangstoestand uit te gaan en in eerste instantie ook de invloed van de eerste verhardingsperiode voor een deel uit te schakelen, had voor alle proefstukken de verharding gedurende de eerste 28 dagen onder water plaats. Daarna werden series gedroogd bij 30, 60, 100 en 150 °C, terwijl eveneens series werden gedroogd bij 19 °C en 40 % R.V., 60 % R.V. en 98 % R.V. Duplo-series werden steeds onder water bewaard. Na uitdrogen tot nagenoeg constant gewicht werd de invloed nagegaan van het weer onder water brengen van de gedroogde proefstukken, dan wel het ondergaan van een andere wijze van verharden (b.v. van 40 % R.V. naar 60 % R.V. en omgekeerd).

In fig. 25 wordt het resultaat van de metingen bij uitdrogen door temperatuur gegeven. Het blijkt, dat bij uitdrogen de E_a lager wordt, terwijl druk- en buigtreksterkte juist hoger worden. Het blijkt dat, indien na drogen de E_a nagenoeg constant is, deze een waarde heeft, welke, uitgedrukt in % van de E_a na 28 dagen verharden onder water, bedraagt:

| | |
|------------------------|-------------------------|
| voor 30 °C drogen 90 % | voor 100 °C drogen 77 % |
| voor 60 °C drogen 82 % | voor 150 °C drogen 70 % |

Bij weer onder water plaatsen van de door temperatuursverhoging gedroogde series blijkt, dat niet de waarde wordt bereikt welke aanwezig is bij verharden steeds onder water. Voor de 30, 60 en 100 °C-series wordt na 96 dagen weer 100 % van de E_a na 28 dagen onder water bereikt, terwijl bij verharden steeds

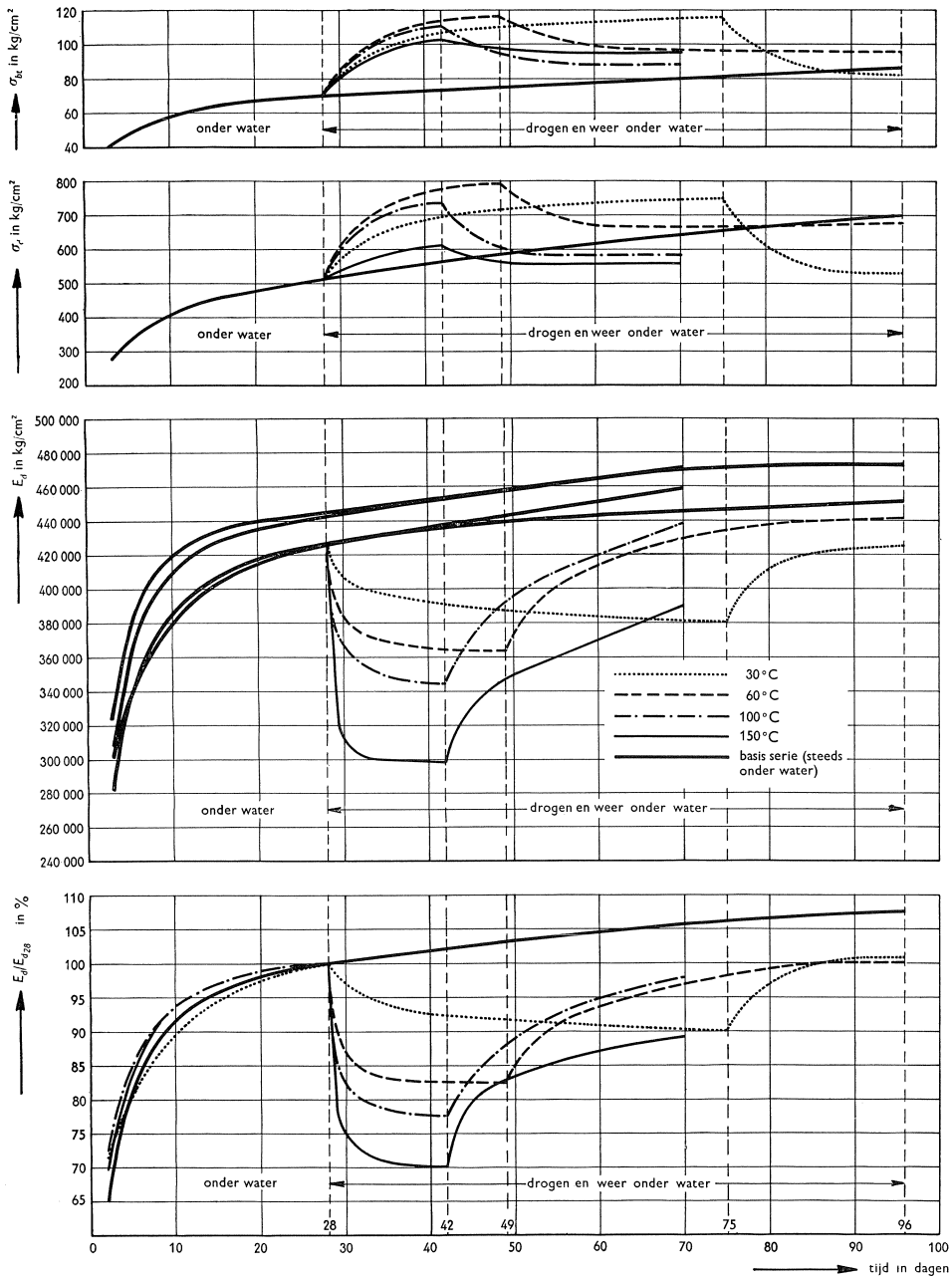


Fig. 25. Invloed van temperatuur op σ_{bt} , σ_d , E_d en E_d/E_{d28} .

onder water thans 108 % aanwezig is. De 150 °C-serie bereikt na 96 dagen slechts 90 % van de E_a na 28 dagen onder water verharden. Waarschijnlijk zullen door het drogen bij deze hoge temperatuur chemische omzettingen hebben plaats gehad die dit gedrag zouden kunnen verklaren.

Wat betreft de druksterkte ten opzichte van de sterkte na 28 dagen verharden onder water, deze bedraagt voor de series welke zijn gedroogd bij:

| | | | |
|-------|-------|--------|-------|
| 30 °C | 142 % | 100 °C | 142 % |
| 60 °C | 153 % | 150 °C | 120 % |

Voor de buigtreksterkte worden na drogen de volgende waarden bereikt:

| | | | |
|-------|-------|--------|-------|
| 30 °C | 160 % | 100 °C | 152 % |
| 60 °C | 163 % | 150 °C | 137 % |

Bij drogen bij ca. 60 °C worden dus de maximale sterkten bereikt.

Bij het weer onder water plaatsen blijken, behalve voor de 60 °C-serie, alle druksterkten te dalen tot onder de waarde die aanwezig zou zijn bij steeds onder water verharden; de 60 °C serie bereikt ongeveer dezelfde waarde. Bij het weer onder water plaatsen blijkt, behalve voor de 30 °C-serie, dat alle buigtreksterkten hoger blijven dan bij steeds onder water verharden het geval zou zijn; de 30 °C serie bereikt ongeveer dezelfde waarde. Indien de proefstukken na de uitdroogperiode gedurende 1 dag weer onder water geplaatst worden en vervolgens geëvacueerd, blijkt dit weinig invloed op de E_a te hebben, daar deze nagenoeg niet hoger is geworden. De sterkte echter wordt hierbij weer ongeveer gelijk aan de sterkte, welke werd bereikt bij verharden steeds onder water.

De invloed van uitdrogen door verharden bij diverse waarden van de relatieve vochtigheid blijkt uit fig. 26, waarbij, in verband met de lange tijdsduur van deze proeven de tijdschaal logaritmisch is uitgezet. Het blijkt dat met deze schaal (zoals reeds eerder werd opgemerkt) voor het verband E_a -tijd rechte lijnen worden gevonden voor het tijdsverloop 3–7 dagen en 10–200 dagen bij verharden steeds onder water. Voor de sterkte blijkt over het gehele tijdsverloop een rechte lijnig verband te bestaan bij verharden onder water. Indien weer de E_a na 28 dagen verharden onder water op 100 % wordt gesteld, blijkt dat verharden bij resp. 95, 60 en 40 % R.V. voert tot de constante waarden

| | |
|----------------|--|
| voor 98 % R.V. | 103,5 % |
| voor 60 % R.V. | 97 % |
| voor 40 % R.V. | 95 % (de R.V. varieerde tijdelijk van 40 tot 55 %) |

Bij weer onder water plaatsen blijkt dat tenslotte voor alle proefstukken weer de waarde bereikt wordt van de E_a bij steeds onder water verharden (112 % bij 200 dagen).

Worden proefstukken welke in lucht van 60 % R.V. verhardden, vervolgens blootgesteld aan lucht van 40 % R.V., dan daalt de E_a verder tot 90 % van de E_a na 28 dagen onder water (bij 200 dagen). Bij het daarna plaatsen in 60 % R.V. blijft deze waarde constant, terwijl bij vervolgens onder water

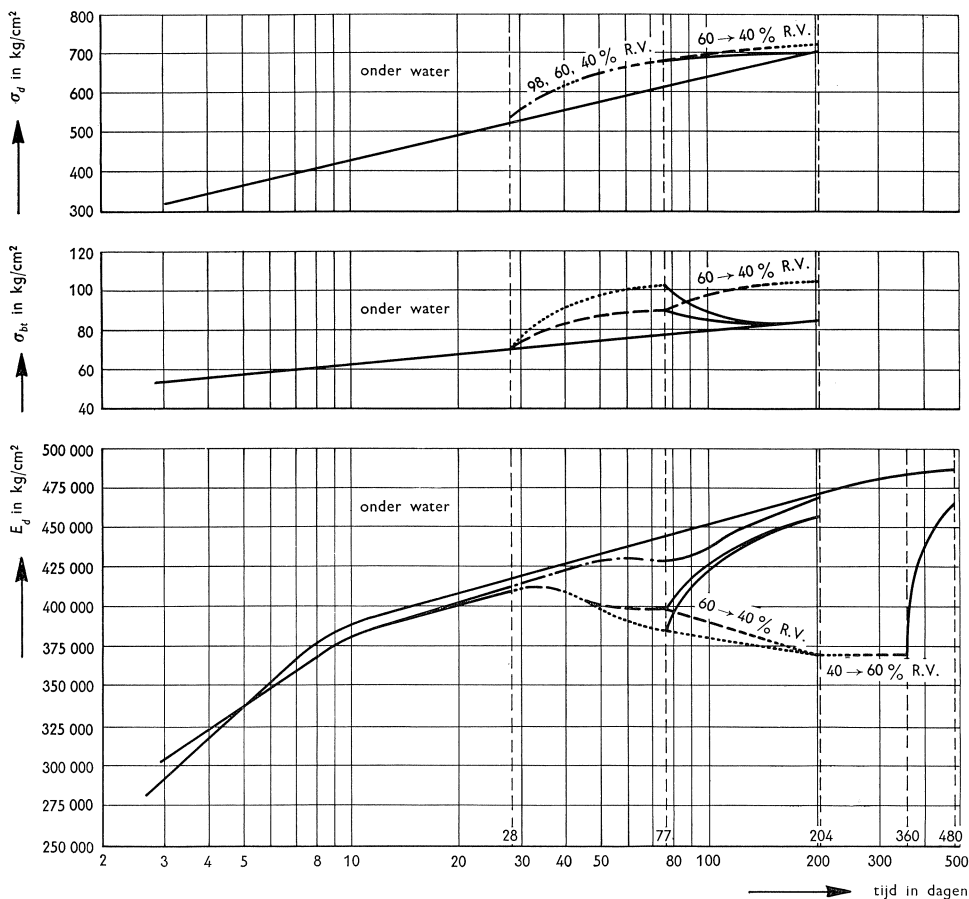


Fig. 26. Invloed van de relatieve vochtigheid op de druksterkte σ_d , de buigtreksterkte σ_{bt} en dynamische elasticiteitsmodulus E_d .

Legenda 40 % R.V. - - - - - 60 % R.V. - . . . - 98 % R.V. ——— onder water

plaatsen waarschijnlijk weer de waarde die bij steeds onder water verharden aanwezig is, wordt bereikt.

Bij het verloop van de druksterkte blijkt geen grote invloed door het drogen. De tendens is, dat iets hogere druksterkte wordt bereikt voor verharden bij 98, 60 en 40 % R.V. Bij weer onder water plaatsen van de op deze wijze gedroogde proefstukken wordt dezelfde druksterkte gevonden als bij verharden steeds onder water. Bij plaatsen van proefstukken bij 40 % R.V. na verharden bij 60 % R.V. blijkt de tendens aanwezig van iets hogere druksterkten t.o.v. die bij verharden steeds onder water.

Voor de buigtreksterkte worden wel verschillen gevonden, waardoor de buigtreksterkte, uitgedrukt in % van die na 28 dagen verharden onder water, bedragen: voor verharden bij 98 % R.V. 129 %, bij 60 % R.V. 133 %, bij 40 % R.V. 150 %.

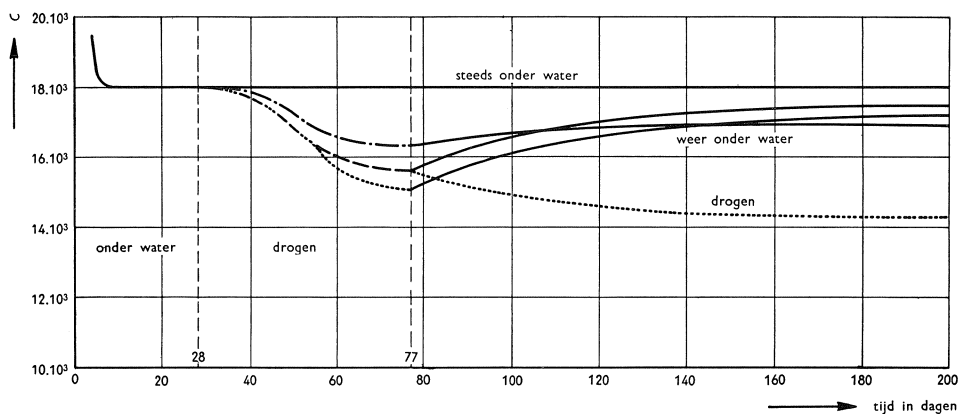


Fig. 27 Invloed van de relatieve vochtigheid op de constante C uit de formule $E_a = C\sqrt{\sigma_a}$.
 legenda: - - - - - 40 % R.V. — — — 60 % R.V. — · — · 98 % R.V.

Bij weer onder water plaatsen wordt de buigtreksterkte weer gelijk aan de sterkte aanwezig bij steeds onder water verharden. Geschiedt de verharding van proefstukken welke zijn geconditioneerd bij 60 % R.V., verder bij 40 % R.V., dan stijgt de buigtreksterkte verder tot 150 %.

Het blijkt dus dat verharden in lucht van diverse R.V. tamelijk grote invloed heeft op de mechanische en dynamische eigenschappen van het microbeton, welke zeker niet mogen worden verwaarloosd. Immers in de praktijk zal eveneens de verhouding variëren van ca. 98 % R.V. tot ca. 40 % R.V. (na een periode van goed nathouden, die eventueel gelijk gesteld kan worden aan verharden steeds onder water). Wel blijkt dat deze invloed groter is voor de buigtreksterkte dan voor de dynamische elasticiteitsmodulus, terwijl ze het geringst is voor de druksterkte (de series welke worden gedroogd bij hogere temperaturen zijn hoofdzakelijk van belang voor het onderzoek naar het vochtgehalte, waarover later).

Teneinde nu na te gaan wat de invloed van de wijze van verharden (lager E_a , hoger sterkte) is op de correlatie E_a -druksterkte, werd het eenvoudigste verband hiertussen, te weten $E_a = C\sqrt{\sigma_a}$ berekend en de variatie in de constante C als functie van de wijze van verharden in fig. 27 grafisch weergegeven.

Voor de proefstukken welke steeds onder water verhardden, is na 4 dagen de C onafhankelijk van de ouderdom en blijkt gemiddeld 18 000 (standaarddeviatie $s = 672$, variatiecoëfficiënt v.c. = 3,7 %, aantal metingen $n = 27$).

Bij verharden in lucht van 98, 60 en 40 % R.V. daalt C resp. tot 16 300, 15 600 en 15 000; bij weer onder water plaatsen stijgt C weer tot resp. 16 900, 17 500 en 17 200, gemiddeld dus 17 200 ($s = 450$, v.c. = 2,6 %, $n = 8$). Bij verder verharden in lucht van 40 % R.V., na de verhardingsperiode bij 60 % R.V. daalt C verder tot 14 300.

Het blijkt dus dat de variatie in de constante C vrij groot is en variëren zal tussen ca. 17 500 en ca. 14 500 (verschil ca. 17 %); uiteraard is het mogelijk

dat voor een andere correlatieformule de invloed kleiner zal zijn. Het leek echter raadzaam eerst na te gaan in hoeverre het vochtgehalte correleerde met de E_d .

Teneinde echter het vochtgehalte van de microbetonproefstukken te kunnen berekenen moest het drooggewicht worden gevonden. Alleen voor de series welke bij 150 °C, 100 °C en 60 °C waren gedroogd, mocht worden verwacht dat het vochtgehalte 0 % was geworden.

Hieruit, en uit andere reeds eerder verrichte proeven kon een bestaande methode worden getoetst om het evenwichtsvochtgehalte te berekenen. Men gaat daarbij uit van de formule: $V = V_e + A_1 e^{-\beta_1 t} + A_2 e^{-\beta_2 t} + \dots$, welke bij toenemen van de tijd overgaat in $V = V_e + A_1 e^{-\beta_1 t}$. Hierin is V_e het evenwichtsvochtgehalte in gewichtsprocenten van de droge stof en $-\beta_1 \log e$ de helling in de figuur $\log(V - V_e)$. Door het pro-

beren van verschillende waarden van V_e wordt die waarde van V_e gevonden waarbij de meetpunten dicht om een rechte lijn liggen. Dit is dan het gezochte evenwichtsvochtgehalte. Het bleek dat voor de series verhard bij 150 °C, 100 °C, 60 °C, 30 °C en 40 % R.V. het evenwichtsvochtgehalte 0% bedroeg, voor de overige series lag dit tussen 2 en 6 %. Terugrekenend kan nu voor elke ouder-

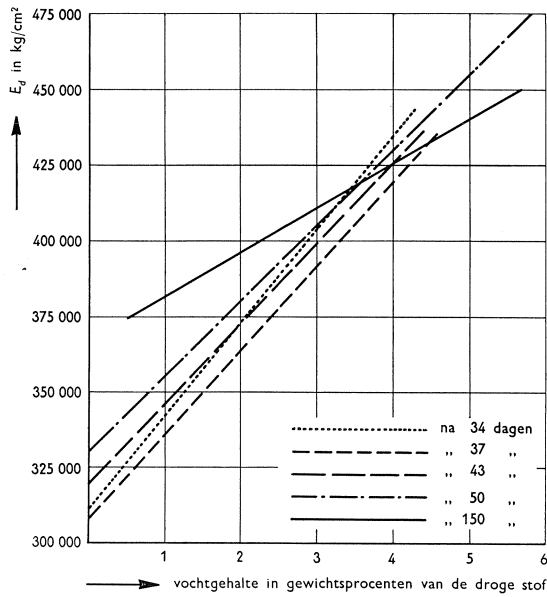


Fig. 28. Verband tussen de dynamische elasticiteitsmodulus E_d en het vochtgehalte.

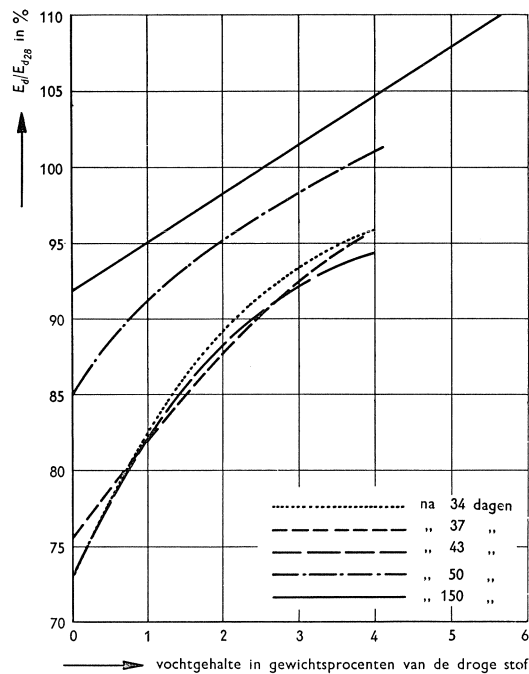


Fig. 29. Verband tussen de dynamische elasticiteitsmodulus E_d en het vochtgehalte (E_d uitgedrukt in procenten van de waarde na 28 dagen).

dom het vochtgehalte worden berekend. Wanneer nu de E_d t.o.v. het vochtgehalte (gew. % t.o.v. de droge stof) wordt uitgezet, dan blijkt wel, dat de gevonden waarden dicht om een rechte lijn liggen, doch tevens (zie fig. 28) dat dit lineaire verband met de ouderdom varieert. Dit komt nog beter tot uiting indien het vochtgehalte wordt uitgezet t.o.v. de E_d uitgedrukt in de E_d na 28 dagen verharden onder water (zie fig. 29). De lijnen blijken nu ongeveer parabolisch te verlopen en de invloed der ouderdom is duidelijk zichtbaar, hetgeen echter voor praktische toepassing een belemmering vormt. Het blijkt echter, dat indien de E_d bij een bepaalde ouderdom (en na verharden bij bepaalde R.V.) wordt uitgedrukt in % van de E_d (bij dezelfde ouderdom) van een proefstuk dat steeds onder water is bewaard, deze waarden een lineair verloop vertonen t.o.v. de R.V. (zie fig. 30). Ditzelfde blijkt het geval te zijn voor de druksterkte en de buigtreksterkte.

Voor beton, dat reeds een à twee maanden oud is, kan men, indien de verhardingsconditie, zoals meestal, onbekend is, rekenen, op een R.V., welke in Nederland gemiddeld 70 % bedraagt en zal men dus t.o.v. verharden onder water de gemeten E_d met 0,92 moeten vermenigvuldigen, de σ_d met 1,03 en de σ_b met 1,16, dan wel dit direct verwerken in de constante, welke in de correlatie E_d -sterkte (bij verharden onder water) voorkomt. Uiteraard dient dit verder te worden nagegaan voor betonproefstukken en dan in de vorm van b.v. kubi, daar de grootte van het proefstuk zeer zeker van invloed zal zijn op de invloed der conditionering. Tevens dient bij dit onderzoek dan de invloed van de R.V. als verhardingsconditie te worden nagegaan vanaf een ouderdom voor het beton van 1 dag.

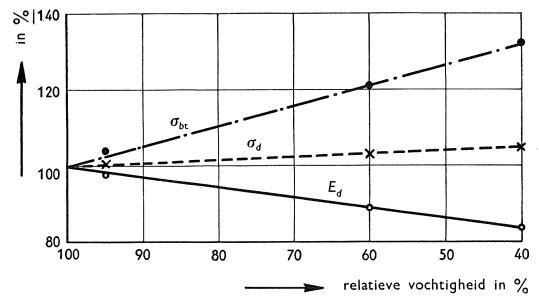


Fig. 30. Verband tussen verharden bij een bepaalde relatieve vochtigheid en de buigtreksterkte σ_b , de druksterkte σ_d en dynamische elasticiteitsmodulus E_d uitgedrukt in procenten van de waarden, die verkregen zouden zijn bij verharding steeds onder water.

Recapitulerend blijkt dus uit het onderzoek met microbeton en uitgevoerd met behulp van het resonantieapparaat, dat zeer zeker gesproken kan worden van een redelijke correlatie tussen sterkte en E_d . Hierbij is de verhouding cement : toeslag van belang en voor bepaalde waarden van deze verhouding dient de correlatie te worden vastgesteld, die verder onafhankelijk is van ouderdom, w.c.-factor en gradering.

Voorts blijkt de verhardingsconditie van invloed te zijn. Bovengenoemde correlatie kan het eenvoudigst worden vastgesteld bij verharden steeds onder water. Verharden bij R.V. van 98, 60 en 40 % R.V. dient echter te worden

nagegaan hetzij om te komen tot de invloed van deze wijzen van verharden op de E_a en sterkte afzonderlijk, hetzij om deze invloed te verwerken in de correlatie E_a -sterkte, waardoor de fout om uit de E_a tot de sterkte te komen natuurlijk iets hoger zal worden.

5 ONDERZOEK MET HET LANGSMEETAPPARAAT MET MECHANISCHE IMPULS

Met behulp van het langsmeetapparaat met mechanische impuls wordt gemeten langs de oppervlakte van het beton. Het is dus van belang om te weten over welke diepte bij de oppervlaktemetingen de trillingen zich voortplanten, m.a.w. tot welke diepte bij deze oppervlaktemetingen de kwaliteit beoordeeld kan worden. Na vele mislukte proeven gelukte het deze schijnbaar eenvoudig vast te stellen invloedssfeer tenslotte op de volgende wijze na te gaan:

Op een balk $15 \times 15 \times 150$ cm vervaardigd met $400 \text{ kg cement/m}^3$ werd een laag beton gestort met een cementgehalte van 250 kg/m^3 en een oplopende laagdikte zodanig, dat aan het ene einde deze opgestorte balk 0 cm en aan het andere einde 15 cm dik was. Het bleek (zie fig. 31) dat bij de oppervlaktemetingen de voortplantingsnelheid van de nieuw gestorte laag (II) werd gemeten bij een dikte van 8 cm en meer. Bij een dikte van 5 cm (en minder) werd de voortplantingssnelheid van de oude betonbalk (V_{L_1}) gemeten. Teneinde de reproduceerbaarheid hiervan na te gaan, werd op de nu taps zijnde balk weer een nieuwe in dikte variërende laag (III) gestort, zodat een balk van $30 \times 15 \times 150$ cm werd verkregen, waarop de metingen werden herhaald.

Fig. 31 laat zien dat dezelfde resultaten werden gevonden. Daar tussen de metingen aan de balken I–II en die aan de balken II–III een tijdsverschil van

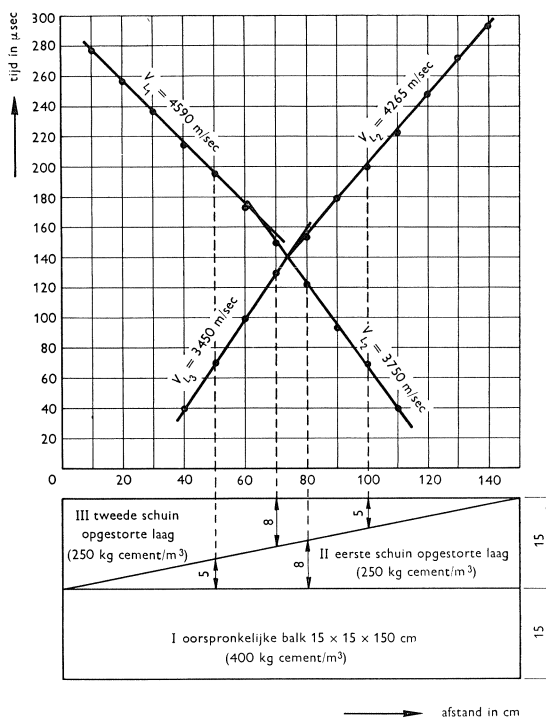


Fig. 31. Invloedssfeer van het langs- en doorsmeetapparaat met mechanische impuls.

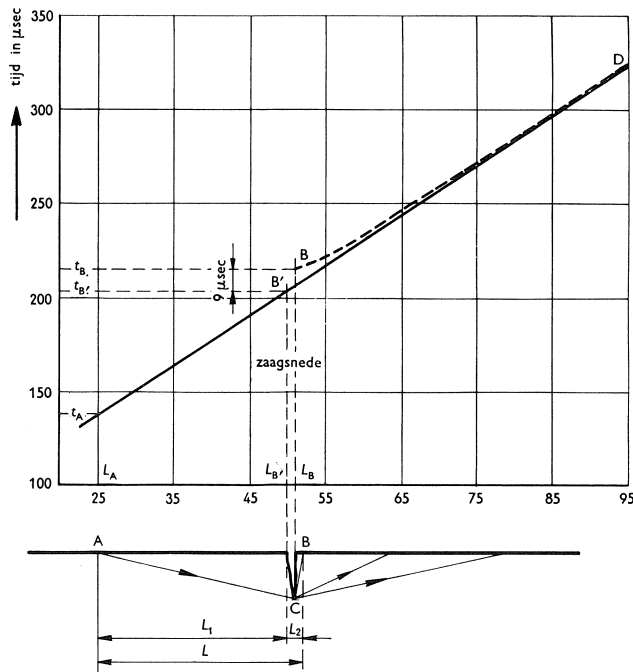


Fig. 32. Bepaling van de scheurdiepte van beton.

I maand aanwezig is, is de voortplantingssnelheid bij de metingen I-II dus ook lager dan bij de metingen II-III (3750 m/sec t.o.v. 4265 m/sec). Daar de schuingestorte laag II bij een ouderdom van 10 dagen werd gemeten en de schuingestorte laag III bij 5 dagen ouderdom, is, hoewel de betonsamenstelling van beide lagen dezelfde is, een verschil in voortplantingssnelheid aanwezig (3750 m/sec t.o.v. 3450 m/sec).

Aangenomen kan dus worden dat de invloedssfeer van het apparaat zich uitstrekt over een diepte van minstens 8 cm. Aangezien het apparaat bij uitstek geschikt is voor het onderzoeken van beton in de vorm van platen (b.v. wegonderzoek, plaatvloeren etc.) en hier zich veelal scheuren in bevinden was het gewenst verder na te gaan wat de invloed hiervan op de metingen was en in hoeverre wellicht van een indicatiemiddel voor scheuren kan worden gesproken.

Het bleek dat indien een scheur de voortplantingsweg der trillingen kruist, deze trillingen onder de scheur door lopen en een verstoring in de tijdsmeting optreedt in de vorm van een plotselinge toename van de tijd. In fig. 32 wordt een voorbeeld gegeven van een meting aan een betonbalk waarin zich een kunstmatig aangebrachte scheur (zaagsnede) bevindt. De voortplantingssnelheid volgt uit $V = \frac{L_{B'} - L_A}{t_{B'} - t_A}$. De lijn BD nadert asymptotisch tot de rechte B'D daar de invloed van de extra weg steeds kleiner wordt. De plaats van de scheur wordt aangegeven door het punt $L_{B'}$. Theoretisch is het dan ook moge-

lijk de diepte d der scheur te berekenen, immers in plaats van de rechte weg AB zal thans de weg ACB worden afgelegd. Het verschil in weg is gelijk aan het verschil in tijd, vermenigvuldigd met de voortplantingssnelheid van het ongescheurde beton:

$$\sqrt{L_1^2 + d^2} + \sqrt{L_2^2 + d^2} - (L_1 + L_2) = V_L \cdot t_0$$

Daar L_2 klein kan worden gehouden t.o.v. L_1 kan benaderend worden geschreven $\sqrt{L^2 + d^2} + d - L = V_L \cdot t_0$.

De minimale afwijking t_0 welke op een scheur duidt, bedraagt, in verband met de spreiding der tijdwaarnemingen, ca. $5 \mu\text{sec}$, hetgeen overeenkomt met een scheurdiepte van ca. 2 cm. Daar ook voor de V_t -meting dezelfde tijd van ca. $5 \mu\text{sec}$ maatgevend is voor een scheuraanduiding, zal hiervoor de scheurdiepte reeds vanaf ca. 1 cm diepte zijn te berekenen.

Teneinde dit na te gaan werden kunstmatig scheuren van verschillende diepte te aangebracht. Nevenstaande tabel geeft het resultaat.

Zoals uit de tabel blijkt, is de overeenstemming tussen de direct gemeten diepte en die berekend uit de metingen uitstekend te noemen.

Het is dus inderdaad mogelijk met het apparaat de aanwezigheid van scheuren op te sporen en in bepaalde gevallen ook de diepte hiervan.

Als inleiding tot verdere praktijkmetingen werd getracht de homogeniteit na te gaan in de betonkwaliteit van een gewapend betonvloer ($4 \times 4 \text{ m}^2$), die slechts aan de bovenzijde bereikbaar was. Hiertoe werd een meetlijnenpatroon aangebracht, waarbij de vloer in vierkanten met zijden van 1 m werd verdeeld (zie figuur 33, hoekpunten aangegeven door cijfers, zijden door letters).

In elke meetstrook werd om de 25 cm gemeten en grafisch de V_L bepaald. Uit de tabel blijkt, dat het niet nodig is om de aanstoter te verzetten (b.v. a, b, c) teneinde

| gemeten diepte in cm | diepte der zaagsnede in cm berekend uit waarden van de voortplantingssnelheid | |
|-------------------------|---|-----------|
| | uit V_L | uit V_t |
| 1,0 à 1,3 | — | 1,23 |
| 2,0 à 2,2 | 2,04 | 2,16 |
| 3,2 à 3,5 | 3,46 | 3,34 |
| 4,1 à 4,4 | 4,40 | 4,43 |
| 5,3 à 5,6 | 5,42 | 5,56 |

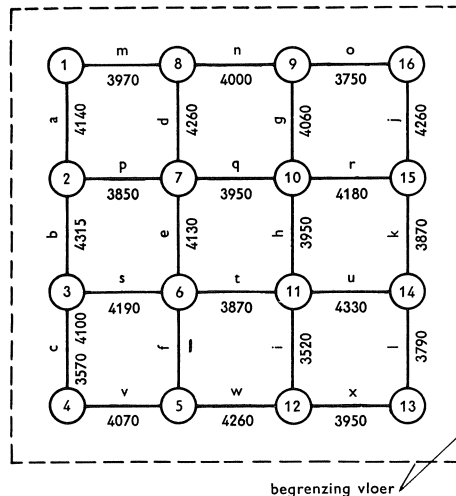


Fig. 33. Meting van de voortplantingssnelheid in een betonvloer van $4 \times 4 \text{ m}$.

een strook te meten (b, c) die bij de eerste stand der aanstoter ook gemeten kan worden. Door nl. in het puntenpatroon voor de strook a-b-c, resp. alleen de punten voor a, voor b en voor c te nemen, krijgt men voor deze stroken de resp. voortplantingssnelheden. Het is dus niet noodzakelijk de aanstoter in punt 3 te plaatsen teneinde de V_L van strook c te meten.

| aanstoter in punt: | meetstroken met bijbehorende V_L (m/sec) | | | |
|-----------------------|--|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | a 4140 | b 4310 | c 4170 | |
| 2 | | b 4315 | c ₁ 4180 ¹⁾ | c ₂ 3570 ²⁾ |
| 3 | | | c ₁ 4100 | c ₂ 3570 |
| 8 | d 4260 | e 4170 | f 4540 | |
| 7 | | e 4130 | f 4430 | |
| 6 | | | f — | |
| 9 | g 4060 | h 4000 | i — | |
| 10 | | h 3950 | i — | |
| 11 | | | i 3520 | |
| 16 | j 4260 | k 3790 | l 3750 | |
| 15 | | k 3870 | l 3675 | |
| 14 | | | l 3790 | |
| 1 | m 3970 | n 4130 | o — | |
| 8 | | n 4000 | o 3870 | |
| 9 | | | o 3750 | |
| 2 | p 3950 | q 4015 | r 4170 | |
| 7 | | q 3950 | r 4200 | |
| 10 | | | r 4180 | |
| 3 | s 4190 | t 4020 | u — | |
| 6 | | t 3870 | u 4570 | |
| 11 | | | u 4330 | |
| 4 | v 4070 | w 4260 | x 3910 | |
| 5 | | w 4260 | x 4070 | |
| 12 | | | x 3950 | |

¹⁾ geldt voor de eerste 50 cm van strook c

²⁾ geldt voor de tweede 50 cm van strook c

Het gemiddelde van de 45 waarnemingen bedraagt 4050 m/sec met een standaardafwijking (s) van 244 m/sec en dus een variatiecoëfficiënt (v.c.) van 6,0 %. Worden alleen de 23 waarnemingen van de stroken zelf beschouwd (zie fig. 33), dan bedraagt het gemiddelde 4018 m/sec met een s van 222 m/sec en een v.c. van 5,5 %. Volgens de Amerikaanse kwaliteitsaanduiding (zie onder §3) zou de kwaliteit dus goed genoemd kunnen worden.

Daar de variatiecoëfficiënt in de V_L tamelijk hoog is, zal die nader worden beschouwd. Bij een v.c. in de V_L van 6 % zal die in de E_d 12 % zijn. Door een juiste keuze van de constante C in de eenvoudigste formule $E_d = C/\sigma_k$ zal σ_k tot ± 5 % nauwkeurig gevonden kunnen worden. Daar echter de v.c. in de E_d reeds 12 % is, wordt deze voor σ_k 29 %. Dit is nog toelaatbaar, mits

de gemiddelde sterkte hoog genoeg is. Teneinde tot (globale) absolute waarden te komen, wordt aangenomen, dat $C = 20\ 000$ bedraagt en het volumegewicht $2,36\ \text{kg/dm}^3$. Uit de metingen volgde voorts $\mu = 0,20$. Daar de dikte der vloer $18\ \text{cm}$ bedraagt en dus klein is t.o.v. de toegepaste golflengte (deze is nl. $\frac{V_L\ \text{in cm/sec}}{\text{frequentie in Hz}} = \frac{401\ 800}{10\ 000} = 40,2\ \text{cm}$) is V_{L_2} gemeten en volgt E_a uit:

$$V_{L_2} = \sqrt{\frac{E_a \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{1}{1 - \mu^2}} \text{ of } E_a = \frac{401\ 800^2 \cdot 0,00236}{981,2} (1 - 0,2^2) = 373\ 000\ \text{kg/cm}^2.$$

Uit $E_a = 20\ 000 \sqrt{\sigma_k}$ volgt dus de gemiddelde sterkte van $345\ \text{kg/cm}^2$. De variatiecoëfficiënt van $29\ \%$ betekent, dat op $95\ \%$ van de onderzochte plaatsen de sterkte zal liggen tussen de waarden

$$345 - 2 \times 0,29 \times 345 \text{ en } 345 + 2 \times 0,29 \times 345$$

of tussen $145\ \text{kg/cm}^2$ en $545\ \text{kg/cm}^2$.

De vloer is dus inderdaad weinig homogeen te noemen en de minimale sterkte zal plaatselijk ongeveer $150\ \text{kg/cm}^2$ bedragen. Van invloed van de wapening op de meetresultaten is niets gebleken. Met de wapeningdetector werd het patroon der staven van de vloer bepaald; vervolgens werd gemeten recht boven een doorgaande wapeningstaaf en halverwege de afstand tussen twee wapeningsstaven. In beide gevallen werden dezelfde waarden gevonden (de dekking der wapening bedroeg $2,6\ \text{cm}$).

De invloed van de wapening werd opnieuw nagegaan bij een uitgebreid homogeniteitsonderzoek betreffende fabrieksmatig vervaardigde betonheipalen. Ook hierbij bleek de vrij zware wapening geen invloed op de metingen te hebben. Teneinde dit nader te verifiëren werden in het laboratorium twee balken vervaardigd, de ene gewapend met 1 staaf $\varnothing 16\ \text{mm}$, de andere met een loden buis $\varnothing 2\ \text{cm}$. Met behulp van een ingestort latje $1 \times 1\ \text{cm}^2$ doorsnede, dat bij ontkisten werd verwijderd, werd bereikt, dat de staven aan de bovenzijde zichtbaar waren en overigens goed aan het beton hechtten (zie fig. 34). De aanstoting geschiedde tegen de uitstekende wapeningsstaven, terwijl op de staven zelf werd gemeten. Ondanks de verschillende voortplantingssnelheden voor staal en lood (resp. 5000 en $2000\ \text{m/sec}$) werd in beide gevallen de voortplantingssnelheid van het beton $3970\ \text{m/sec}$ gemeten, welke waarde eveneens werd gevonden bij metingen aan het beton zelf op de zijde tegenover die waaraan de staven zich bevonden.

Als verklaring wordt voorlopig aangenomen, dat wanneer impulsen aan de wapeningsstaven worden toegevoerd, deze (daar het beton zich hecht aan de wapening) over de gehele omtrek van de staaf trillingsenergie aan het beton mededelen. Daar de voortplantingssnelheid van het beton lager is dan die van

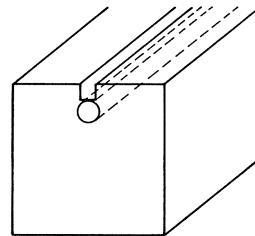


Fig. 34.

staal, werkt het beton als een traagheid t.o.v. de in het staal aanwezige impulsen en zal (na een bepaalde afstand) de voortplantingssnelheid worden gemoduleerd tot de voortplantingssnelheid welke overeenkomt met die van het beton.

Inderdaad bleek uit latere metingen door het beton heen, dat voor groter afstand dan 20 cm de V_L voor beton werd gevonden; terwijl bij kleiner afstand dan 20 cm die van het staal werd gemeten. Blijkbaar is dan een afstand van ca. 20 cm nodig om de voortplantingssnelheid in het staal te reduceren tot die van het beton. In elk geval is het duidelijk dat bij langsmetingen geen invloed van de wapening op de meetresultaten aanwezig zal zijn.

Recapitulerend blijkt het dus mogelijk met het langsmmeetapparaat met mechanische impuls de kwaliteit na te gaan van beton waarbij de invloedssfeer zich uitstrekt tot minstens 8 cm onder het betonoppervlak. De mogelijkheid is aanwezig, dat aanwezige scheuren uit de metingen volgen, zowel wat ligging als diepte betreft, terwijl de metingen geen invloed ondervinden van de wapening. Voor het onderzoek naar de gelijkmatigheid van de kwaliteit (aan de oppervlakte) is het apparaat reeds voor meerdere onderzoeken toegepast. Voor wat betreft het vaststellen van de absolute waarde van de kwaliteit dient verder onderzoek betreffende de correlatie $V_L-(E_d)$ -sterkte te worden afgewacht om tot een goede beoordeling te komen. Daarnaast wordt zoveel mogelijk vergelijkend cijfermateriaal verzameld wat op den duur wellicht in staat stelt tot een analoge kwaliteitsaanduiding te komen als in Amerika is opgesteld.

6 ONDERZOEK MET HET ULTRASONISCH DOORMEETAPPARAAT

Een van de belangrijke punten bij de akoestische metingen is, zoals reeds onder § 1 werd gezien, het feit, dat, afhankelijk van de dwarsafmetingen van het proefstuk of de constructie t.o.v. de toegepaste golflengte een V_{L_1} , V_{L_2} of V_{L_3} wordt gemeten.

Zijn de dwarsafmetingen groot t.o.v. de golflengte, dan wordt een V_{L_3} gevonden, zijn deze klein dan vindt men V_{L_1} of V_{L_2} . Het is nu nodig te weten bij welke verhouding tussen de golflengte en de dwarsafmetingen van het meetobject de theoretische precisering klein of groot hoort. Vooral is dit van belang voor de metingen met het langsmmeetapparaat met mechanische impuls, aangezien hierbij de golflengte ca. 40 cm bedraagt en dit dus ongeveer gelijk is aan de afmetingen van vele meetobjecten. Het nagaan van genoemde invloed is het gemakkelijkst met behulp van het ultrasonische doormmeetapparaat. Aangezien onder § 2 reeds bleek, dat metingen met dit apparaat en met het langsmmeetapparaat tot gelijke resultaten voert, en de V_L voor beton (en staal) dus onafhankelijk is van de frequentie, zullen de conclusies uit een onderzoek

naar de invloed der afmetingen op de gemeten snelheid ook toegepast kunnen worden op het langsmmeetapparaat.

Voor het ultrasonisch doormetapparaat bedraagt de frequentie 200 000 Hz, zodat voor metingen aan beton de golflengte, afhankelijk van de voortplantingssnelheid, ca. 1,6 à 2,5 cm bedraagt. Voor praktische metingen wordt met dit apparaat dus steeds de V_{L_3} gevonden. Voor laboratoriummetingen is het ook voor dit apparaat nodig de samenhang tussen golflengte en dwarsafmetingen te kennen.

In eerste instantie werd nagegaan de eventuele invloed van de meetlengte. Voor staafijzer \varnothing 25, 30, 35 en 59 mm (resp. diameter/golflengte = $d/\lambda = 0,84, 1,01, 1,17$ en $2,02$) werd de meetlengte gevarieerd van 70 cm tot 2,2 cm (resp. l/λ van 25,5 tot 0,75). Het bleek dat hierbij de gemeten voortplantingssnelheid steeds gelijk bleef aan de V_{L_3} (variatiecoëfficiënt over 42 metingen 1,23 %).

Vervolgens werden voor enige lengten (l/λ van 0,84 tot 11,6) een bijbehorende serie diameters nagegaan (d/λ van 0,222 tot 3,4). Daar uit resonantie-metingen gevonden was dat $V_{L_1} = 5180$ m/sec en $\mu = 0,29$ bedroeg, zou voor

V_{L_3} de waarde $V_{L_3} = V_{L_1} \sqrt{\frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} = 1,145 V_{L_1} = 5930$ m/sec moeten worden gevonden. Voor $d/\lambda > 0,85$ was dit inderdaad het geval. Voor kleinere waarden van d/λ werden overgangswaarden naar V_{L_1} gevonden. Indien de correlatie tussen d/λ en $(V - V_1) / (V_3 - V_1)$ wordt uitgezet ($V =$ met ultrasonisch doormetapparaat gemeten voortplantingssnelheid) wordt fig. 35

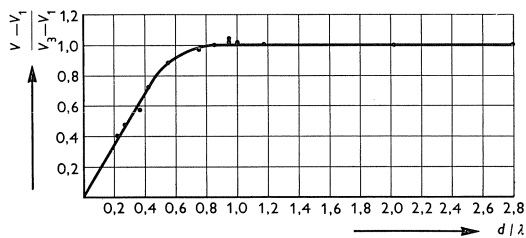


Fig. 35. Invloed van d/λ op de gemeten voortplantingssnelheid voor staal.

verkregen, waarbij de indruk wordt gewekt dat slechts voor $d/\lambda = 0$ een V_{L_1} wordt gevonden. Uitgebreid onderzoek hierover is nog gaande en zal te zijner tijd worden gepubliceerd.

Een nader onderzoek met dit apparaat werd gedaan naar de invloed der wapening. Daartoe werden betonkubi voorzien van wapeningstaven ($4 \varnothing 12, 4 \varnothing 16$ en $4 \varnothing 22$). Het bleek dat in de richting der staven alleen dan de voortplantingssnelheid van staal werd gemeten, wanneer de zender op het staaf-einde werd geplaatst en de afstand van doormeten kleiner was dan 20 cm. Juist naast de staven werd direct de voortplantingssnelheid van het beton gemeten. Bij groter afstand van doormeten werd onafhankelijk van de plaats der zender steeds de voortplantingssnelheid van het beton gemeten. Bij me-

| meting volgens | V_{L_3} m/sec | V_{L_3} gem m/sec |
|----------------|--------------------|------------------------|
| 1 | 4000 | 4073 |
| 2 | 4090 | |
| 3 | 4130 | |
| 4 | 3960 | 3997 |
| 5 | 4040 | |
| 6 | 3990 | |
| 7 | 4090 | 4100 |
| 8 | 4080 | |
| 9 | 4130 | |
| 10 | 4070 | 4010 |
| 11 | 3950 | |
| 12 | 4010 | |

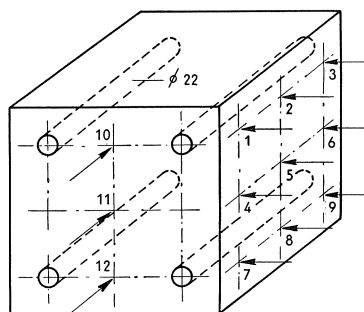


Fig. 36.

metingen loodrecht op de wapening bleek de invloed van de wapening alleen merkbaar bij de kubi met 4 \varnothing 22 mm (zie fig. 36). De metingen volgens 1 t/m 3 en 7 t/m 9 zijn loodrecht op de wapening verricht en geven gemiddeld $\frac{4073 + 4100}{2} = 4087$ m/sec, die volgens 4 t/m 6 en 10 t/m 12 geven gemiddeld

4004 m/sec. De verhoging bedraagt dus ca. 2%. De staven \varnothing 22 liggen hierbij h.o.h. 11 cm m.a.w. de hoeveelheid wapening bedraagt $38 \text{ cm}^2/\text{m}^3$. Dat voor het ultrasonisch doormetapparaat wel invloed bij metingen loodrecht op de wapening wordt gevonden, is wellicht het gevolg van de kleine golflengte van de uitgezonden trillingen. Nader onderzoek hierover vindt nog plaats.

Naar aanleiding van de belastingsproeven met balken, waarbij tevens de E_d werd vastgesteld (resonantieapparaat, langsmetapparaat met mechanische impuls), die zoals theoretisch reeds werd nagegaan onafhankelijk van de belasting was, werden analoge proeven uitgevoerd met het ultrasonische doormetapparaat. Het nadeel van de eerder behandelde metingen was nl., dat niet tot breuk de E_d kon worden bepaald; bij de resonantietingen werd niet meer dan ca. 70 % der breukbelasting bereikt, bij de metingen met het langsmetapparaat niet meer dan 80 %. In dit laatste geval geven de vele scheuren (waarbij het nu mogelijk was om plaats en diepte der scheuren vast te stellen) op de vrij korte balken een dermate grote verstoring, dat metingen bij hoger belasting dan 80 % der breukbelasting geen resultaat hadden.

Met het ultrasonisch doormetapparaat kan gemakkelijk tijdens de beproeving van een kube onder de drukpers worden gemeten. De resultaten van deze metingen zijn verzameld in fig. 37 en 38. Het blijkt nu, dat bij ca. 50 à 60% der breukbelasting de tijd welke de impulsen nodig hebben om door het materiaal te komen groter wordt en dus de V_{L_3} begint te verminderen. Dit proces gaat door tot tenslotte bij de breukbelasting de V_{L_3} ca. 50 à 60% bedraagt van

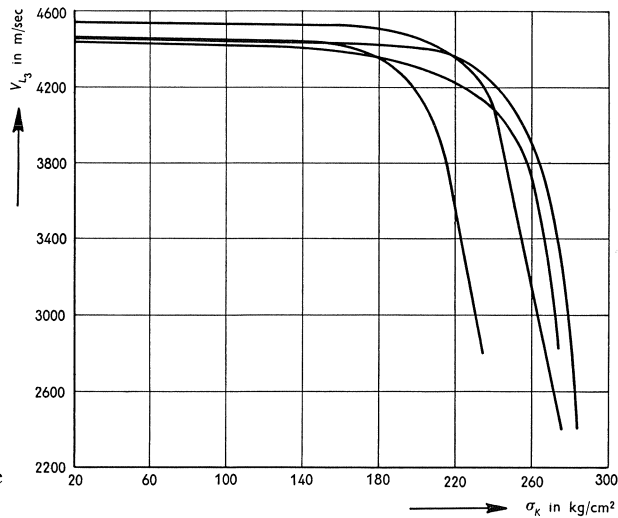


Fig. 37. Invloed van de drukspanning op de berekende V_{L_3} .

de V_{L_3} , gemeten aan de onbelaste kubus. Dat tot ca. 60% der breukbelasting de V_{L_3} constant blijft is het bewijs, dat deze inderdaad onafhankelijk is van de belasting (zoals besproken onder § 3).

De oorzaak van de vermindering van V_{L_3} zal waarschijnlijk zijn, dat zich bij een belasting van ca. 60% der breukbelasting microscheurtjes volgens de drukrichting ontwikkelen, waarbij de impulsen gedwongen zijn een langere weg af te leggen, hetgeen dus resulteert in een lagere voortplantingssnelheid.

Opmerkelijk is, dat indien de treksterkte aan kubi wordt bepaald door middel van de slijtproef¹⁾ hier de V_{L_3} tot ca. 99,5 % der treksterkte constant

¹⁾ Zie I.B.C.-Mededelingen
4 (1956) no. 3, p. 103—119

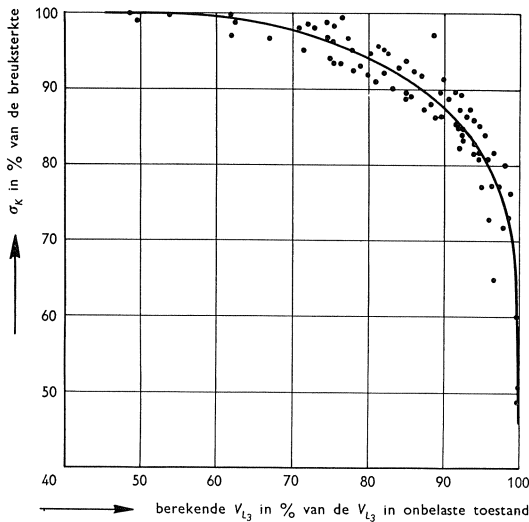


Fig. 38. Invloed van de drukspanning op de berekende V_{L_3} procentueel uitgedrukt.

blijft, waarna de kube splitst en de meting uitvalt. De conclusie zou moeten zijn, dat zich bij deze proef dus geen microscheurtjes ontwikkelen en dat de breuk hierbij plotseling optreedt. Bovenstaande metingen blijken een goed hulpmiddel om op meer fundamentele wijze het breukprobleem te benaderen.

Tenslotte werden uitgebreide proeven opgezet betreffende de correlatie V_{L_3} -(E_d)-sterkte. Hiertoe werden kubi vervaardigd van portlandcement klasse A met toeslag : cement-verhouding (gew. dln.) van 7,75, 5,85, 5,40 en 5,00 (resp. ca. 275, 325, 350 en 375 kg cement per m³). Voor elke toeslag : cement verhouding werden vier korrelgraderingen (zie fig. 39, b t/m e) nagegaan, terwijl voorts de w.c.-factor zodanig werd gevarieerd dat de slump per variatie 0—2 cm, 6—8 cm en 12—16 cm bedroeg. Bij een ouderdom van 7, 28 en 91 dagen werd de kubussterkte in viervoud bepaald, nadat de V_{L_3} was gemeten (totaal 417 waarden voor σ_k en V_{L_3}). Fig. 40 geeft het resultaat van deze proeven, waarbij de verharding steeds onder water geschiedde. Het blijkt, dat de resultaten voor het microbeton bevestigd worden, aangezien de correlatie ook hier bepaald wordt door de toeslag : cement-factor; voor een bepaalde toeslag : cement-factor hebben de w.c.-factor, ouderdom en korrelgradering verder geen invloed.

Zijn geen gegevens betreffende de toeslag : cement-factor aanwezig, dan kan uit de V_{L_3} de kubussterkte met een nauwkeurigheid van $\pm 35\%$ worden berekend. Is deze factor wel bekend, dan kan de nauwkeurigheid vergroot worden tot 8 à 18%. Opvallend is dat voor de serie met gemiddeld cementgehalte (ca.

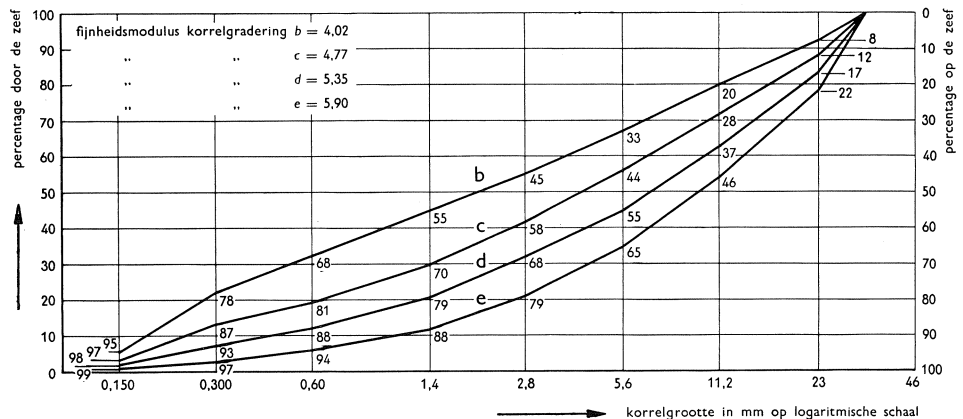


Fig. 39. Toegepaste korrelgraderingen.

325 kg/m³) bij oplopende sterkte de spreidingbreedte gelijk blijft en de nauwkeurigheid dus procentueel stijgt (tot ca. 8 %).

Statistisch worden deze resultaten verder uitgewerkt en ontleed. Hoewel nog uitgebreid onderzoek nodig is (verharding in lucht van ca. 60 % R.V., toepassing van andere cementsoorten) is het duidelijk, dat inderdaad van een redelijke correlatie tussen V_{L_3} en sterkte kan worden gesproken. Ook zal het aan de hand van deze en volgende proeven mogelijk worden eveneens als

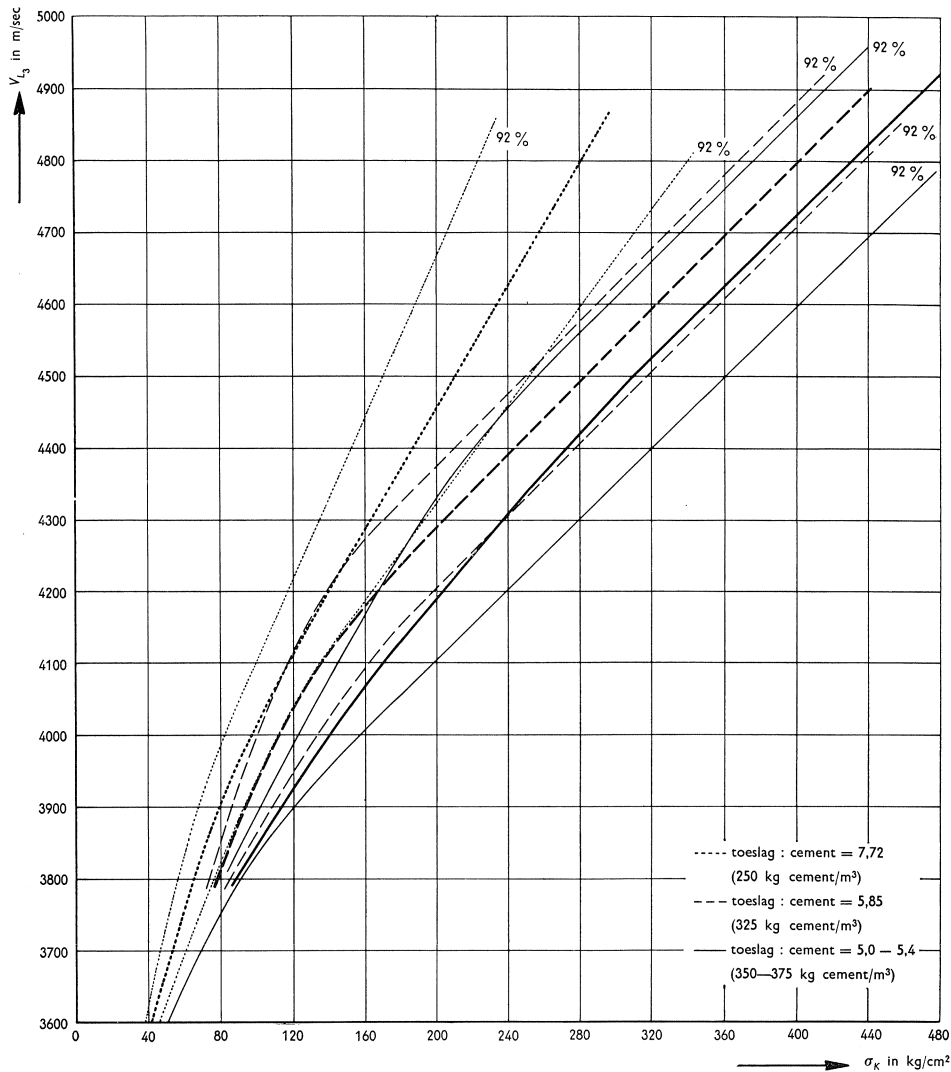


Fig. 40. Correlatie tussen voortplantingssnelheid en kubussterkte σ_k voor verschillende gewichtsverhoudingen toeslag : cement bij toepassing van portlandcement, klasse A en verharding steeds onder water.

kwaliteitsaanduiding de voortplantingssnelheid te gebruiken, welke het grote voordeel biedt dat de werking hiervan niet-destructief is.

Recapitulerend blijken dus voor praktijkonderzoek grote mogelijkheden voor het ultrasonische doormetapparaat en het langsmeetapparaat met mechanische impuls, ten aanzien van de controle der betonkwaliteit, aanwezig te zijn. Verder spuurwerk ten aanzien van de absolute waarden van de voortplantingssnelheid (event. E_a) als graadmeter voor de kwaliteit blijft nog nodig. Voor onderzoek naar de homogeniteit is de akoestische meetmethode

reeds bij uitstek geschikt, terwijl ook in vele gevallen over de absolute waarde der kwaliteit reeds belangrijke conclusies kunnen worden getrokken. Vele praktijkonderzoekingen hebben dan ook reeds op akoestische wijze plaats gevonden en het laat zich aanzien, dat deze meetmethode in toenemende mate zal worden toegepast.

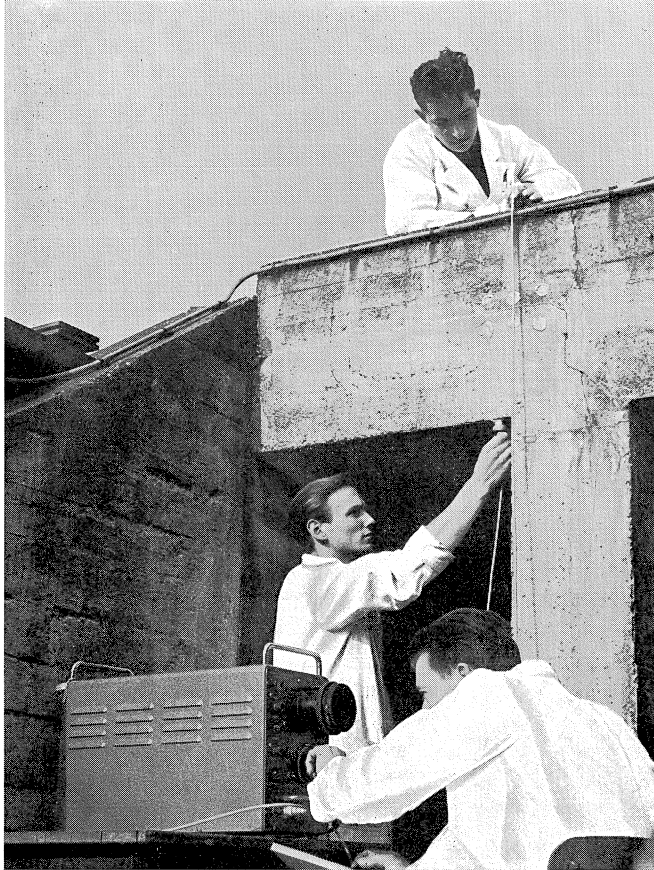


Fig. 41. Praktijkmeeting met het ultrasonisch doormeetapparaat.

Summary

An intertime review is given of three years research on acoustical testing of concrete. In the first part the methods and the mathematical relations concerning wave-velocities, resonance frequencies and dynamical modulus are given. The second part gives a short description of the three apparatuses for making high precision measurements of resonance frequencies, wave velocities and pulse-velocity. The use of velocity and dynamic modulus as a criterion of quality is discussed in part three. The last three parts deal with the principal results of measurements done up to now with the three apparatuses.