

SYMPOSIUM ON MIX DESIGN  
AND QUALITY CONTROL OF CONCRETE  
LONDON, MAY 1954

BEARBEJDET DANSK  
OVERSÆTTELSE AF 5 INDLÆG

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT  
ex. 5 00832 P  
20 JULI 1988

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT SÆRTRYK NR. 60

I KOMMISSION HOS TEKNISK FORLAG KØBENHAVN 1955

**SYMPOSIUM ON MIX DESIGN  
AND QUALITY CONTROL OF CONCRETE  
LONDON, MAY 1954**

*FORORD*

*I maj 1954 afholdt Cement and Concrete Association i London et symposium om betonproportionering og betonkontrol, hvor der blev præsenteret ialt 22 originale afhandlinger om emner inden for disse områder.*

*Afhandlingerne, som fortrinsvis var af engelsk oprindelse, tager for de flestes vedkommende så direkte sigte på engelsk praxis, normer, materialer og materiel, at de næppe er af interesse for større kredse her i landet. Men 5 afhandlinger beskæftiger sig med mere generelle problemer, som praktisk taget er ens her og i England, og Statens Byggeforskningsinstitut har derfor set det som en nyttig opgave at foranledige disse 5 oversat til dansk samt at yde bidrag til deres offentliggørelse i Beton og Jernbeton. Vi håber, de vil være et værdifuldt supplement til den hjemlige betonlitteratur.*

*For venlig tilladelse til oversættelse og offentliggørelse bringer vi hermed Mr. A. R. COLLINS, Cement and Concrete Association, vor bedste tak.*

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT MAJ 1955

*Niels Munk Plum*

**BETONPROPORTIONERINGENS GRUNDPRINCIPPER***Af**J. D. McIntosh, Cement and Concrete Association, London.**Oversat og forkortet af civilingeniør Birger Warris.*

## SAMMENFATNING

666.972.1

I artiklen omtales, hvorledes udviklingen inden for betonteknologien har medført ændringer i betingelserne og i fremgangsmåden ved proportionering. Der er nu tendens til i betingelserne at angive krav til betonens egenskaber fremfor til kvaliteten og mængden af de materialer, der indgår i betonen, og dette har medført en større interesse for de principper, som ligger til grund for udvælgelsen af de mest økonomiske blandingsforhold.

Sammenhængen mellem trykstyrken, holdbarheden, bearbejdéligheden samt kohæsionen og blandingsforholdene gennemgås, og det vises, hvorledes denne sammenhæng danner grundlag for proportioneringsmetoderne. Disse metoder er baseret på en række tabeller, som dog kun kan benyttes som retningsgivende, og der kræves f. eks. nogen erfaring for at vælge netop den bearbejdélighed og den kornkurve, som er den bedste til et foreliggende arbejde. Det er derfor ikke muligt at finde frem til den mest økonomiske blanding alene ved beregning, medmindre man er i besiddelse af betydelig erfaring, og de beregnede proportioneringsforhold bør derfor kontrolleres ved prøveblandinger.

Principperne, der danner grundlag for hvert enkelt trin af proportioneringen, diskuteres med henblik på at få det foreløbige skøn over blandingsforholdene så nøjagtigt som muligt.

## INDLEDNING

Det kan synes overraskende, at man i en artikel beskæftiger sig med principperne for betonproportionering nu, hvor beton har været et af de vigtigste byggematerialer i mere end 50 år. Betonteknologer har da også kendt mange af disse principper i lang tid, men det er først i løbet af

de senere år efter fremkomsten af moderne materiel beregnet på at forbedre betonens ensartethed, og efter at man er begyndt at forstå, at det kan være en fordel at kontrollere betonen, at ingeniører i almindelighed har fattet en mere aktiv interesse for disse spørgsmål. Samtidig har man også fundet frem til enkelte nye principper, som må anvendes, hvis man ved proportioneringen vil opnå den bedst mulige økonomi i betonfremstillingen.

Betontechnologien har ikke udviklet sig helt ens i de forskellige lande, og betonproportionering gribes an på flere måder. I det følgende behandles den engelske metode, i højere grad fra ingeniørens synspunkt end fra den rene videnskabs. Det har ikke været hensigten at angive en matematisk formel, men snarere at formulere den opsamlede erfaring som almene principper.

Ved betonproportioneringen støtter man sig i almindelighed til oplysninger fra forskellige publikationer, suppleret med ens egen erfaring. Man må dog ikke forvente, at det blandingsforhold, man således når frem til, i enhver henseende vil give den ønskede beton. Derfor udføres sædvanligvis altid en prøveblanding, hvorefter proportioneringen korrigeres.

#### GRUNDLAGET FOR BETONPROPORTIONERING

Ved proportionering vælger man mængderne af de forskellige delmaterialer således, at man opnår de ønskede betonkvaliteter.

I mange år antoges, at betonkvaliteten og blandingsforholdene hang meget nøje sammen, og f.eks. mente man, at en beton 1:2:4 efter rumfang kunne bruges til næsten, hvad det skulle være. Efterhånden fandt man imidlertid ud af, at kvaliteten af en sådan beton, angivet ved en eller anden målelig egenskab, f.eks. betonstyrken, var langt fra konstant. Man tilføjede da i sine betingelser krav til trykstyrken, målt på en standardmetode. Der kan imidlertid kun opnås en entydig sammenhæng mellem blandingsforhold og styrke, når grusmaterialerne på forhånd er fastlagt. Nogle steder var det meget let at arbejde efter betingelser, der både angav styrke og blandingsforhold, fordi grusmaterialerne dér lå meget nær op ad dem, man havde forudsat ved udarbejdelsen af betingelserne, men andre steder var det næsten umuligt, hvis man ville anvende lokale materialer. Da man yderligere ofte tilføjede krav til kornform og kornkurve som en ekstra sikkerhedsforanstaltning, blev resultatet en sådan efterspørgsel efter specielle typer af grusmaterialer fra steder,

hvor de ikke forekom naturligt, at forsyningerne af den »bedste« type grus var i fare for ikke at kunne tilfredsstille efterspørgslen.

Der er nu en tendens til at ændre betingelserne således, at man i stedet for at angive blandingsforhold, specificerer de krævede betonegenskaber, hvilket har flere fordele. Proportioneringen af betonen er da entreprenørens ansvar, og han bliver i stand til bedst muligt at udnytte de forhåndenværende grusmaterialer. Da endvidere blandingsforholdene tidligere fastsattes således, at de gav tilstrækkelig god beton selv ved de værste forhold, der kunne forekomme, medfører den ændrede fremgangsmåde ofte en yderligere formindskelse af betonens pris.

Betonproportioneringen bliver ved den ændrede formulering af kravene et meget væsentligt led i bestræbelserne for at udføre arbejdet i overensstemmelse med betingelserne og må afpasses efter omfanget af betonkontrollen.

#### PRINCIPPET FOR BETONPROPORTIONERING

Formålet med betonproportioneringen er at udvælge et blandingsforhold, hvormed der kan opnås en hærdnet beton med den krævede minimumskvalitet (sædvanligvis angivet ved trykstyrken) til den billigste pris.

Prisen for betonen afhænger af, hvor stor variationen af styrkerne på byggepladsen bliver; hvis variationsbredden kan formindskes ved udvidelse af betonkontrollen, vil den gennemsnitsstyrke, der kræves, for at minimumstyrken kan overholdes, være lavere, end hvis variationen er stor, og udgiften til materialer bliver følgelig mindre. En sådan reduktion i materialeudgifterne må dog sammenholdes med omkostningerne ved den ekstra inspektion og det bedre udstyr, som forbedringen af betonkontrollen kræver.

Valget af betonkontrollens omfang og dermed variationen i betonkvaliteten er en væsentlig forudsætning for, at man kan bestemme et passende blandingsforhold. Sammenhængen mellem styrken (eller andre egenskaber) og blandingsforholdene er nemlig givet ved gennemsnitsværdierne, og proportioneringen må derfor udarbejdes svarende til gennemsnitsforhold. Det økonomisk rigtige omfang af kontrollen afhænger af mængden og kvaliteten af den beton, der skal udstøbes, men indtil dato foreligger der ingen nøjagtige oplysninger om dette spørgsmål, og hver entreprenør må derfor her støtte sig til sin egen erfaring.

Betonprisen inkluderer dels udgifter til materialer, dels omkostninger

ved udstøbning af betonen. Materialeudgifterne afhænger først og fremmest af cementindholdet pr. m<sup>3</sup> beton; en grov tilnærmelse herfor fås ved cement/grus forholdet. Det bør dog bemærkes, at en formindskelse af cementindholdet pr. m<sup>3</sup> modsvarer af en forøgelse af grusindholdet pr. m<sup>3</sup>, og når den samlede økonomiske gevinst skal udregnes, må besparelsen i udgiften til cement derfor formindskes med merudgiften til grus. Omkostningerne ved udstøbningen af betonen afhænger for en stor del af, om blandingen har passende bearbejdelighed (hvorved her forstås en målelig egenskab hos den friske beton) og tilstrækkelig god kohæsion (d.v.s. ringe tendens til afblanding).

Betonproportioneringens vigtigste problem er da, sagt med lidt andre ord end anvendt i begyndelsen af dette afsnit, at fremstille en blanding, hvormed man kan opnå den rigtige kvalitet af den hærtnede beton og en passende bearbejdelighed og kohæsion af den friske beton, med så lavt cementindhold som muligt.

I almindelighed gælder, at trykstyrken og holdbarheden af beton med en given cementkvalitet og cementmængde pr. m<sup>3</sup> forøges, når v/c-tallet formindskes, forudsat at betonen er fuldstændig komprimeret. Når vandmængden formindskes, bliver bearbejdeligheden imidlertid dårligere, hvilket gør betonens komprimering mere besværlig, og kohæsionen påvirkes måske også. På den anden side kan bearbejdeligheden og kohæsionen sædvanligvis forøges, uden at trykstyrken ændres, ved at forøge blandingens cementindhold samtidig med vandindholdet, bruge andre grusmaterialer, forøge grusets største kornstørrelse eller ændre kornkurven.

For at opnå en økonomisk proportionering skal bearbejdeligheden holdes så lavt, som kravet om tilfredsstillende udstøbning gør det muligt. Hvis man kan forbedre udstøbningsmetoden, således at en mindre bearbejdelig beton kan tillades, uden at man forøger omkostningerne til udstøbningen eller får dårligere komprimeret beton, er det muligt at formindske materialeudgifterne. Valget af bearbejdelighed afhænger derfor af den komprimeringsmetode, der skal anvendes, men bestemmes endvidere af formen og størrelsen af den konstruktion, der skal støbes, og af armeringens mængde og placering.

Når man skal afgøre, hvorvidt en blanding er velegnet til en foreliggende opgave, må man først og fremmest sammenligne betonens styrke, bearbejdelighed og cementindhold, uden at tage hensyn til andre egenskaber. Virkningen af et eller andet tilsætningsmiddel på betonegenskaberne må bedømmes på tilsvarende måde ved sammenlignende prøver

på arbejdspladsen, og dette gælder ligeledes undersøgelser over forskellen mellem tilslagsmaterialer med kontinuert og diskontinuert kornkurve. Den blanding, der med det mindste cementindhold giver den krævede trykstyrke, er sædvanligvis den bedste både ud fra tekniske og økonomiske synspunkter.

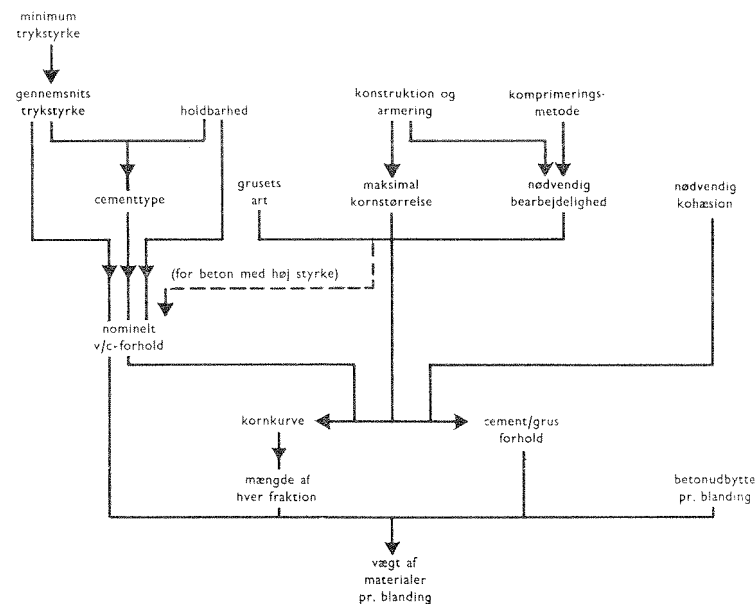


Fig. 1. En skematisk oversigt over betonproportioneringen

#### OVERSIGT OVER BETONS EGENSKABER

De vigtigste egenskaber for den hærtnede beton er trykstyrken og holdbarheden og for den friske beton bearbejdeligheden og kohæsionen. Kendskab til sammenhængen mellem disse egenskaber og blandingsforholdet er en væsentlig forudsætning for at kunne proportionere betonen rigtigt.

#### Trykstyrke

Styrketilvæksten af en beton med et givet blandingsforhold afhænger stærkt af den anvendte cementtype, lagringstemperaturen og lagrings-

måden; men disse variable er sædvanligvis fastlagt på forhånd inden betonproportioneringen. Cementtypen er sædvanligvis angivet i betingelserne, og prøvelegemerne skal lagres under standardiserede forhold. Det er derfor fortrinsvis trykstyrkens afhængighed af blandingsforholdene, der har interesse for vort formål.

Under forudsætning af, at betonen er fuldstændig komprimeret, aftager som nævnt trykstyrken, når v/c-forholdet forøges. Formindskelsen af styrken forårsages af den forøgede mængde overskudsvand, som ikke indgår forbindelse med cementen, men i stedet, hvad enten vandet fordampes eller ikke, gør den hærdnede cementpasta mere porøs. For betoner, hvis styrke hverken er særlig høj eller særlig lav, kan man regne, at trykstyrken kun er afhængig af v/c-forholdet ligegyldigt hvilket blandingsforhold, hvilken grustype eller kornkurve, der er anvendt (Abram's lov). I virkeligheden afhænger styrken dog også af cementindholdet pr. m<sup>3</sup>; hvis man bibeholder v/c-forholdet i en beton, men formindsker cementindholdet (og dermed vandmængden og bearbejdeligheden), fås en lidt højere styrke. Cementindholdets betydning for trykstyrken vokser, når betonstyrken vokser, og man bør tage hensyn hertil, hvis styrken er større end 350 kg/cm<sup>2</sup>. Ved så høje styrker må man iøvrigt også tage grustypens indflydelse på styrken med i betragtning. Man har fundet, at beton støbt med granit som stenmateriale har haft trykstyrker op til 100 kg/cm<sup>2</sup> større end beton med samme cementindhold og bearbejdelighed støbt med almindelige stenmaterialer.

#### *Holdbarhed*

Betonens modstandsdygtighed over for vejrets påvirkninger og kemiske angreb afhænger blandt andet af, om tætheden er tilstrækkelig til at forhindre indtrængning af vand eller opløsninger. Holdbarheden forbedres derfor, når man formindsker antallet og størrelsen af de porer, der har form som kanaler i betonen, og da denne slags porer fortrinsvis fremkommer, når det vand, der ikke deltager i cementens hydratation, fordampes, opnås holdbarhed bl. a. ved at anvende små v/c-forhold. Det er endvidere meget væsentligt for holdbarheden, at betonen er helt komprimeret. Modstanden mod kemiske angreb afhænger først og fremmest af cementens kemiske sammensætning.

#### *Andre egenskaber af den hærdnede beton*

Det er så heldigt, at mange andre af de egenskaber, man kræver af den hærdnede beton, forøges, når trykstyrken og holdbarheden forøges. F.eks. hænger bøjningsstyrken, trækstyrken, forskydningsstyrken og adhæsionsstyrken nøje sammen med trykstyrken, og man vil få en vandtæt beton, hvis betonens holdbarhed, som angivet ovenfor, er tilfredsstillende.

Sammenhængen mellem betonens svind og blandingsforholdet er temmelig kompliceret, men det synes dog, som om svindet formindskes, når vandindholdet pr. m<sup>3</sup> beton bliver mindre, hvilket i almindelighed kan opnås, når betonens bearbejdelighed formindskes.

Rumvægten af beton er en vigtig egenskab ved f.eks. dæmninger. Den afhænger hovedsagelig af materialernes vægtfylde, men kan i mindre udstrækning forøges ved at sænke betonens bearbejdelighed.

#### *Bearbejdelighed*

Betons bearbejdelighed påvirkes af v/c-forholdet og betonens cementindhold, af formen og strukturen af gruskornene, af største kornstørrelse og kornkurven. Bearbejdeligheden af meget cementholdige blandinger synes også at afhænge af cementens egenskaber. Indflydelsen af disse forhold kan illustreres, ved at man betragter, hvad der sker, når man sætter grus til ren cementpasta med et givet v/c-forhold. Hvis en ikke for stor mængde grus tilsættes cementpastaen, forøges bearbejdeligheden. Består gruset af glatte runde korn, vil berøringsfladen mellem pastaen og gruskornene være mindre, og betonen vil derfor have større bearbejdelighed, end hvis gruskornene består af ru kantede korn; dette skyldes, at de runde partikler har en mindre specifik overflade, d. v. s. overfladeareal pr. enhed absolut rumfang. Man har fundet, at dette princip gælder for beton med styrke omkring det almindelige, men det er ikke klarlagt, om noget tilsvarende gælder for beton med høj styrke. Hvis kornkurven varieres således, at grusets specifikke overflade formindskes – f.eks. ved at man forøger grusets maksimale kornstørrelse eller formindsker mængden af fine materialer – vil bearbejdeligheden blive bedre. Mængden af fine materialer kan imidlertid kun varieres inden for et mindre område, fordi utilstrækkelige mængder heraf giver en beton, der ikke hænger sammen, som er svær at bearbejde og tilbøjelig til at afblande. Man har fundet, at hvis kornkurven for en bestemt beton varieres inden for et stort område, men på en sådan måde, at grusets specifikke overflade forbliver

uforandret, påvirkes bearbejdigheden ikke særlig meget, og der er derfor ingen grund til at prøve på at få grusmaterialer med kornkurver svarende til dem, der angives i proportioneringsvejledninger. Når man skal bestemme de procentiske mængder af de enkelte grusfraktioner således, at kornkurven bliver ækvivalent med den i proportioneringsvejledningen givne, bør man lægge særlig vægt på at finde frem til de rigtige procenter for det fine materiale, fordi dette bidrager mest til den specifikke overflade. Blandinger med diskontinuerte kornkurver tilpasses foreskrevne kornkurver på samme måde som lige anført for kontinuerte kornkurver.

### *Kohæsion*

Kohæsionen forhindrer betonblandingen i at blive strid og formindsker faren for afblanding under transport og udstøbning. Kohæsionen i en cementpasta bliver større, når  $v/c$ -tallet stiger op til en optimal værdi, men aftager derefter påny. Ved mindre værdier af  $v/c$ -tallet er der ikke vand nok til at gøre cementpartiklerne tilstrækkelig våde, og ved større værdier bliver cementpastaen flydende og derfor dårligere i stand til at overføre sammenhængskræfterne mellem partiklerne. I almindelighed formindskes betonens kohæsion, når blandingen bliver mere våd, men »tør afblanding« kan forekomme ved betonblandinger med meget ringe bearbejdighed eller meget store kornstørrelser.

Betonen bliver mere kohæsiv, når mængden af fine korn forøges. Det største bidrag til kohæsionen leverer cementen, ikke alene fordi den i sig selv udgør de fineste partikler, men også fordi hydratationsproduktet er yderst findelt, og jo større cementindholdet er, des mindre tendens har betonen til afblanding. En forøgelse af mængden af fine grusmaterialer vil tilsvarende forbedre kohæsionen betydeligt.

Kohæsionen afhænger endvidere af formen og strukturen af gruskornene; den er større for glatte og runde korn end for ru og kantede, og den kan forøges ved at indblande små luftbobler i betonen.

## FREMGANGSMÅDE VED PROPORTIONERING

### *Minimumsstyrken*

Da trykstyrken for beton på en arbejdsplads varierer under arbejdets udførelse, angives den som regel ved en minimumsværdi. Som nævnt kan en blanding kun proportioneres for gennemsnitsforhold; man forudsæt-

ter en gennemsnitskvalitet af materialerne og en gennemsnitlig omhu ved blanding, komprimering og lagring af betonen. Blandingsforholdet må derfor fastlægges ud fra gennemsnitstrykstyrken, og denne skal være så stor, at man med den betonkontrol, der findes på arbejdspladsen, ikke får styrker, der er mindre end den i betingelserne angivne minimumstrykstyrke.

Det gælder imidlertid her som ved alle andre processer, at man aldrig kan opnå absolut sikkerhed for, at intet prøveresultat vil være lavere end et givet minimum, og spørgsmålet om sammenhængen mellem den nødvendige gennemsnitstrykstyrke og den i betingelserne angivne minimumsstyrke må derfor behandles ved statistikkens hjælp. Enten må udtrykket minimumsværdi defineres mere præcist i betingelserne, eller den projekterende må fastlægge, hvor stor sikkerhed han vil have for, at et prøveresultat ikke falder under minimumsværdien. I begge tilfælde må minimumsstyrken angives som en værdi, under hvilken man kun kan forvente eet prøveresultat ud af et nærmere bestemt antal.

Hvis man betragter den angivne minimumsværdi som det absolutte minimum og forlanger drastiske forholdsregler, hvis et prøveresultat er lavere, kan man f.eks. fastsætte risikoen for, at et resultat falder under minimumet, så lav som  $1/100$ . Dette betyder, at gennemsnitsstyrken skal være højere, og at betonen derfor skal indeholde mere cement, end hvis betingelserne definerede minimumsstyrken som den værdi, hvorunder f.eks. 1 prøveresultat ud af 100 må falde. For en almindelig arbejdsplads med hverken for stort eller for lille omfang af betonkontrollen kan den tilsvarende forskel i gennemsnitstrykstyrken løbe op til ca.  $35 \text{ kg/cm}^2$ , hvilket svarer til, at forholdet mellem cement og grus ændres f.eks. fra 1:6 til ca. 1:5½. Denne ændring hænger altså udelukkende sammen med fortolkningen af betingelserne.

Der har i nogen udstrækning været offentliggjort data, som for forskelligt omfang af betonkontrollen angiver sammenhængen mellem minimumsstyrken og gennemsnitsstyrken. Undertiden redegøres for den statistiske sammenhæng, men hvor dette ikke er tilfældet, kan man f.eks. antage, at minimumsstyrken er den værdi, under hvilken højst 1% af prøveresultaterne kan forventes at ligge. Hvis prøveresultaterne er opgivet som gennemsnitsstyrken for et sæt terninger, vil muligheden for, at et prøveresultat er lavere end minimumsstyrken være mindre, end hvis styrkerne svarer til enkelte terninger.

Sammenhængen mellem minimums- og gennemsnitsstyrken for et

givet omfang af betonkontrollen kan udtrykkes både som et forhold og som en differens, men det synes rimeligst at angive differencen.

#### *Holdbarhed*

Da betons holdbarhed – under forudsætning af en bestemt cementtype – hovedsagelig bestemmes af v/c-forholdet, lader man ofte stiltiende kravene til holdbarhed falde ind under kravene til trykstyrke. Imidlertid er styrken undertiden af ret beskeden betydning, og der har været offentliggjort enkelte maksimalværdier for v/c-forholdet i beton med Portland cement, der skal kunne modstå forskellige grader af påvirkning fra vejrlig og kemikalier. Disse værdier er nominelle eller gennemsnitlige v/c-forhold. Det er tilrådeligt, når der kun skal udstøbes små mængder af beton, og det kun er rimeligt at kontrollere betonen i ringe omfang, at anvende mere forsigtige værdier af v/c-forholdet (altså for samme bearbejdelighed en mere cementrig blanding).

#### *Valg af grus*

Grusmaterialerne er ofte fastlagt på forhånd, fordi der kun er een økonomisk anvendelig grusaflejring i nærheden af arbejdspladsen, eller måske fordi en speciel grusart kræves af arkitektoniske grunde. Grus med glatte og runde partikler vil, når betonen skal være af middelkvalitet, sandsynligvis give mindst cementforbrug. Til beton med meget høje styrker, er det dog sandsynligt, at et stenmateriale af knuste bjergarter (skærver) sammen med naturligt sand vil give en mindre cementrig blanding end et stenmateriale fra naturlig aflejring. Når man skal vælge mellem 2 forskellige grusmaterialer, bør man foretage prøvestøbninger.

Største kornstørrelse bør være så stor som udstøbningsforholdene tillader, dels fordi en forøgelse af største kornstørrelse medfører bedre bearbejdelighed, selvom forholdet mellem de fine og de grove fraktioner ikke ændres, dels fordi mængden af fine materialer uden at skade kohæsionen derved kan formindskes, hvilket medfører en yderligere forøgelse af bearbejdeligheden. Den nominelle maksimale kornstørrelse begrænses sædvanligvis til  $1/4$  af den mindste afstand mellem modsatte sider i betonkonstruktionen, til 6 mm mindre end den mindste tykkelse af dæklaget eller til 6 mm mindre end afstanden mellem hovedarmeringen. Det synes rimeligt, når afstanden mellem armeringsjernene er bestemmende for

kornstørrelsen, at anvende en lidt større største kornstørrelse ved vibreret beton end ved håndstampet beton.

En analyse af offentliggjorte resultater fra arbejdspladser, hvor man anvender meget store kornstørrelser (f.eks. ved dæmninger), viser, at der næppe vindes meget ved at anvende sten større end 150 mm.

#### *Valg af bearbejdelighed*

Hvilken bearbejdelighed man skal vælge, afhænger først og fremmest af den foreliggende betonkonstruktion og den anvendte komprimeringsmetode. Bearbejdeligheden skal ikke være større end nødvendig, men det er på den anden side væsentligt, at betonen er tilstrækkelig bearbejdelig til at sikre fuldstændig komprimering. Når man fastlægger den gennemsnitlige bearbejdelighed, bør man derfor have opmærksomheden henledt på, at blandingen ikke ved de udsving i bearbejdeligheden, som uundgåeligt forekommer, undertiden bliver for vanskelig at udstøbe.

Hvis betonkonstruktionen ikke er lige kompliceret overalt, vil en beton, der er bearbejdelig nok til at kunne udstøbes i den vanskeligste del af konstruktionen, have for god bearbejdelighed til andre dele, men dette klares som regel ved at variere udstøbningsstemplet, ikke ved at ændre blandingsforholdet. Bearbejdeligheden bør vælges således, at selv betonen i den vanskeligste del af konstruktionen kan udstøbes tilfredsstillende.

Der kræves en særlig bearbejdelig blanding til konstruktioner med stor overflade i forhold til volumen eller med mange hjørner uden lister. Bearbejdeligheden skal forøges, når armeringen ligger tæt, specielt hvis dæklaget eller afstanden mellem jernene er lille i forhold til største kornstørrelse, og når betonen skal anbringes på steder, hvor det kan være vanskeligt at komme til. Af alle disse grunde er bunden af en konstruktion ofte den vanskeligste at komprimere. Vibration er mere effektiv end håndstampning og muliggør anvendelse af blandinger med dårligere bearbejdelighed. Ved vibration af meget tørre blandinger kan komprimeringen ofte forøges ved at sætte et svagt tryk på betonoverfladen. I sædvanlige konstruktioner er vibrationsintensiteten ofte mindre, end man regner med, og man skal derfor ikke overvurdere vibratorens effektivitet.

#### *Valg af kornkurve*

Ved valget af kornkurve bør man særlig lægge vægt på at få den rette mængde fine materialer, da dette er afgørende for, at blandingen får en



passende kohæsion og komprimeres fuldstændigt i formen. Særlig meget fint materiale kræves: Hvis blandingen skal være særlig sammenhængende for at formindske afblandingen (f.eks. på grund af transport i rystende beholdere, udtømning i stærkt hældende slidsker eller med stor faldhøjde ned i en form oven på armering), hvis betonen skal pumpes eller udstøbes under vand, hvis betonkonstruktionen er lille i forhold til største kornstørrelse, hvis konstruktionen har mange hjørner uden lister, hvis konstruktionen har tætliggende armering, eller hvis formen har tilbøjelighed til at lade mørtelen løbe ud.

Når man fastlægger kornkurven, bør man tage hensyn til grusmaterialeart og størrelse, bearbejdigheden og cementindholdet pr. m<sup>3</sup> beton; disse forhold vil være fastlagt i større eller mindre grad ved andre overvejelser, der ligger forud for valget af kornkurve. Ønsker man særlig god kohæsion, må man i følgende tilfælde anvende særlig meget fint materiale: Hvis gruskornene er kantede, flade eller aflange og med ru overflade, hvis den maksimale kornstørrelse er lille, hvis blandingen skal være særlig bearbejdelig, eller hvis grus/cement forholdet er højt.

Denne del af proportioneringen kræver derfor betydelig erfaring, men det er heldigvis således, at valget af kornkurve ikke er særligt afgørende og let kan ændres, hvis betonkvaliteten ved prøvestøbningerne er utilfredsstillende.

Bearbejdigheden og kohæsionen af en betonblanding fremstillet med diskontinuerte kornkurver er mere følsom over for små variationer i mængden af fint materiale end en tilsvarende blanding med en kontinuert kornkurve. Beton med diskontinuert kornkurve og ret høj bearbejdighed har endvidere ret stor tendens til afblanding. Man bør derfor kun vælge diskontinuerte kornkurver, når der er en omfattende betonkontrol, og blandingens bearbejdighed skal være ret lille, svarende til vibrering.

#### BRUG AF PROPORTIONERINGSVEJLEDNINGER

Følgende problemer er det væsentligt at være opmærksom på ved anvendelsen af proportioneringsvejledninger.

##### *Definition af v/c-forholdet*

Der er almindelig enighed om, at beregning af v/c-forholdet skal inkludere både fugtigheden i gruset og vandmængden tilsat ved blanderen,

men der er nogen tvivl om, hvorvidt man skal medregne grusets overfladefugtighed alene eller både den fugtighed, der findes på overfladen af gruskornene, og den, der findes absorberet i disses porer. Forskellen er ikke stor, hvis gruset kun absorberer en lille smule vand, men hvis f.eks. gruset absorberer 2% vand, er afvigelsen mellem v/c-forholdene 0,12 for en blanding 1:6 efter vægt. Dette kan ændre 28 døgns trykstyrken mere end 70 kg/cm<sup>2</sup> og forandre bearbejdigheden fra god til dårlig. Det kan synes naturligt at basere definitionen af v/c-forholdet udelukkende på grusets overfladefugtighed, fordi man ikke kan vente, at det absorberede vand vil bidrage til bearbejdigheden eller påvirke betonens styrke. Der er imidlertid visse vanskeligheder ved at fastsætte en sådan definition, og der er foreløbig ikke nogen almindelig fastsat metode til at bestemme, hvad man kan kalde det effektive v/c-forhold. Når man anvender tabeller, der angiver sammenhængen mellem trykstyrken, holdbarheden eller bearbejdigheden og v/c-forholdet, er det derfor vigtigt at vide, hvorledes v/c-tallet er forudsat defineret. Hvis der er taget hensyn til det absorberede vand, bør grusets absorptionsegenskaber angives.

##### *Anvendelse af tørt grus til laboratorieprøver*

De fleste af de data, der angives i proportioneringsvejledninger stammer fra laboratorieforsøg, hvor v/c-forholdet svarer til vægten af vand sat til lufttørret grus, og derfor inkluderer det absorberede vand. Hvis grusets absorbtionsevne er stor, aftager det effektive v/c-forhold hurtigt i de første 10–15 minutter, efter at vandet er sat til blandingen, og samtidig formindskes bearbejdigheden stærkt. Det er derfor væsentligt at vide, hvorvidt angivne oplysninger om bearbejdigheden er baseret på prøvning udført øjeblikkeligt efter blandingen, eller først 10–15 minutter senere, når bearbejdigheden har nået sin endelige værdi. Denne vanskelighed opstår overalt, hvor man skal overføre bearbejdighedsresultater fra laboratoriet til byggepladsen.

##### *Data for trykstyrken*

Data for trykstyrken gælder sædvanligvis kun, hvis betonen er fuldstændig komprimeret og har været lagret i fugtig luft de første 24 timer og derefter i vand ved en standardiseret temperatur. I engelske opgivelser anvendes endvidere terningtrykstyrken fremfor cylindertrykstyrken. In-

den man går i gang med at anvende proportioneringsvejledninger, bør man undersøge, om den i betingelserne for arbejdet angivne minimumstyrke svarer til de forhold, der forudsættes i vejledningen. De prøver, der udføres under arbejdet for at kontrollere, om der er overensstemmelse mellem kvaliteten af den støbte beton og betingelsernes krav, skal også udføres i nøje overensstemmelse hermed.

Trykstyrkeopgivelserne må naturligvis svare til en bestemt cementkvalitet. Prøveblandingerne vil ikke nødvendigvis blive fremstillet med cement af samme kvalitet som den, der har været anvendt ved udarbejdelsen af proportioneringsvejledningen, medmindre der også udføres cementprøvninger. Hvis terningtrykstyrkerne for en prøveblending har været unødvendig store, er det derfor ikke altid klogt at formindske cementindholdet, medmindre man er sikker på, at den høje styrke ikke hænger sammen med særlig høj cementkvalitet.

#### *Data for bearbejdelighed*

Bearbejdeligheden er afhængig af grusets art, og selvom der er opgivet resultater for 3 slags grus (runde korn, korn med middel kornform og kantede korn), kan betydelige forskelle i bearbejdeligheden forventes, når der anvendes andre grusmaterialer end de forudsatte. Man kan være nødt til at interpolere, hvis stenene og sandet er af forskellig type (skærver bruges f.eks. ofte sammen med almindeligt sand), og man bør da især lægge vægt på sandets egenskaber. Hvis opgivelserne er baseret på, at v/c-forholdet er beregnet ud fra betonens totale vandindhold, kan det være nødvendigt at tage hensyn til grusets absorptionsevne.

Det er nu sædvanlig praksis at udtrykke blandingens cementindhold ved cement/grus-forholdet efter vægt fremfor efter rumfang på grund af den større nøjagtighed. Bearbejdeligheden hænger imidlertid sammen med forholdet mellem de absolutte rumfang af cement og tilslagsmaterialer, og hvis man derfor skal anvende grusmaterialer med anden kornvægtfylde end forudsat i proportioneringsvejledningen, må vægtforholdene korrigeres i forhold til vægtfylderne.

#### AFSLUTTENDE BEMÆRKNINGER

Det er vanskeligt at fremstille beton med en eller anden bestemt egenskab liggende inden for givne værdier, selv under de mest omhyggelig kontrollerede forhold, på grund af variationerne i de materialer, betonen fremstilles af. Det er derfor ikke overraskende, at man ikke har tilvejebragt en nøjagtig sammenhæng mellem den hærdnede og den friske betons egenskaber.

De data, der angives i proportioneringsvejledninger, kan kun betragtes som en vejledning, og ved anvendelse af dem, bør man udnytte sin personlige erfaring og sit kendskab til grundprincipperne for betonproportionering. Brugen af en proportioneringsvejledning er kun det første skridt på vejen til at nå frem til den rette blanding, og skal overalt efterfølges af prøveblandinger. Hvis den foreslåede blanding fremstilles i et laboratorium, kan man få et indtryk af, om betonen har de ønskede egenskaber, men hvis man vil være sikker på, at blandingen på enhver måde passer til formålet og arbejdet, bør en prøveblending fremstilles og bruges på arbejdspladsen.

Man kan summere det foregående i, at proportionering er et spørgsmål om »trial and error«, og at en hvilken som helst beregning baseret på opgivelser i proportioneringsvejledninger kun er et middel til at udføre et fornuftigt skøn over, hvad udgangspunktet for de første prøveblandinger skal være.

## LITTERATURFORTEGNELSE

- [1] ROAD RESEARCH LABORATORY. Design of concrete mixes. 2nd edition. London. H.M.S.O. Road Research Road Note No. 4. 1953. pp. 16.
- [2] McINTOSH, J. D. and ERNTROY, H. C. Design of concrete mixes with aggregates of  $\frac{3}{8}$  in. maximum size. London. Cement and Concrete Association. 1951. Research Note Rp. 4. pp. 22.
- [3] McINTOSH, J. D. The design of concrete mixes. Journal of the Institution of Municipal Engineers. 1952. Vol. 78. No. 9. March. pp. 565-580.
- [4] WALSH, H. N. How to make good concrete. 1st edition. London. Concrete Publications Ltd. 1939. February. pp. 103.
- [5] Concrete aggregates and buildings sands from natural sources. London. British Standards Institution. British Standard No. 882 : 1944. pp. 54.
- [6] ABRAMS, D. A. Design of concrete mixtures. Chicago. Structural Materials Research Laboratory. Lewis Institute. 1918. Bulletin No. 1. pp. 22.
- [7] COLLINS, A. R. Principles of making high-strength concrete. Reinforced Concrete Review. 1950. Vol. 2, No. 1. January. pp. 29-48.
- [8] Unpublished research conducted by the Cement and Concrete Association.
- [9] SINGH, B. G. The use of fine sands and gap-gradings in concrete mixes. Building Research Station. 1953. February. Note. No. D235. pp. 27. (Not available for publication).
- [10] The structural use of normal reinforced concrete in buildings. London. British Standards Institution. British Standard CP 114 (1948). pp. 57.
- [11] Control of quality of ready-mixed concrete. 2nd edition. Washington. National Ready Mixed Concrete Association. 1945. May. pp. 75.
- [12] COLLINS, A. R. The effect of batching errors on the uniformity of concrete. London. H.M.S.O. Road Research Road Note No. 3. 1947. pp. 9.
- [13] MURDOCK, L. J. Concrete control. Reinforced Concrete Review. 1949. Vol. 1, No. 10. January. pp. 361-387.
- [14] MURDOCK, L. J. The control of concrete quality. Proceedings of the Institute of Civil Engineers. Part I. 1953. Vol. 2, No. 4. July. pp. 426-453.
- [15] HIMSWORTH, F. R. The variability of concrete and its effect on mix design. Proceeding of the Institution of Civil Engineers. Part I. 1954. Vol. 3. No. 2. March. pp. 163-195.
- [16] JOINT COMMITTEE ON STANDARD SPECIFICATIONS FOR CONCRETED REINFORCE AND CONCRETE. Recommended practice and standard specifications for concrete and reinforced concrete. Detroit. American Concrete Institute. 1950. September. p. 12.
- [17] STEWART, D. A. Vibrated concrete. Civil Engineering and Public Works Review. 1952. Vol. 47, No. 556. October. p. 837.
- [18] Methods of testing concrete. London. British Standards Institution. British Standard No. 1881 : 1952. pp. 61.

**ØKONOMISKE FAKTORER VED VALG AF  
KORNKURVE I FORBINDELSE MED KVALITETSKONTROL  
AF BETON**

*Af*

*D. A. Stewart, M.B.E., A.M.I.C.E., A.M.I.E.E.*

*Oversat og bearbejdet af civilingeniør Johs. Landbo*

SAMMENFATNING

666.972.1

Gruset, som udgør hovedbestanddelen af betonen, har stor indflydelse på økonomien ved ethvert betonarbejde, og dets egenskaber er meget afgørende for den opnåede kvalitet.

Det er velkendt, at variationer i gradering påvirker bearbejdigheden, styrken og den færdige betonoverflades beskaffenhed. Men også andre faktorer i forbindelse med gruset har indflydelse på betonen.

Idet det er påvist, at der er en sammenhæng mellem kornform og hulrumsforhold, og da hulrumsforholdet for stenene er bestemmende for betonens mørtelbehov og derfor også for vandbehovet, må man for at opnå en effektiv kontrol af tilslaget også undersøge hulrumsforholdet. Dette sker ved en rumvægtsbestemmelse, som derfor må foretages i forbindelse med undersøgelsen af graderingen.

Det påvises, at beton, hvortil der benyttes et diskontinuerligt graderet tilslag, kan fremstilles ved hjælp af enklere anlæg og med mindre arbejde, end hvis der benyttes kontinuerligt graderede materialer.

Det påpeges, at det, i betragtning af de høje transportudgifter, er mere økonomisk at købe gode tilslagsmaterialer end dårlige. Den større udgift til de gode materialer vil betale sig gennem en forbedret betonkvalitet.

## INDLEDNING

Ved fabrikmæssig fremstilling af betonvarer spiller en nøje kontrol med såvel de anvendte råmaterialer som med det færdige produkt en stor økonomisk rolle.

Anvendelse af standardiserede og kontrollerede materialer reducerer udgifterne til tilsyn og formindsker muligheden for, at den færdige vare må kasseres, fordi den ikke opfylder de stillede krav. Og hvis ikke de anvendte materialer er så ensartede, at der hele tiden skal tilføres den samme energimængde for at opnå den ønskede bearbejdning, vil man ikke kunne benytte mekanisering i større udstrækning ved fremstillingsprocessen.

Således vil f.eks. variationer i grusets egenskaber nødvendiggøre, at der under arbejdet til stadighed må foretages ændringer af de tilsatte mængder for at få en ensartet blanding. Hertil må anvendes øvet arbejdskraft, og udgifterne til betonfremstillingen vil vokse.

Også ved almindelige betonarbejder, hvor betonen blandes på byggepladsen, er man klar over værdien af og behovet for kontrol af hensyn til kvaliteten af det færdige arbejde. Blot er de måder, hvorpå en effektiv kontrol kan opnås, kun delvis blevet forstået. Hertil kommer, at mange af de i årevis benyttede kontrolmetoder ikke er tilstrækkeligt videnskabeligt underbyggede.

I et forsøg på at formindske spredningen af resultaterne ved trykforsøg har man hidtil lagt for megen vægt på opnåelsen af et konstant  $v/c$ -tal. Men dette er sket på bekostning af hensyntagen til ensartet bearbejdelse og kvaliteten af den færdige beton. Varierende bearbejdelse kan bevirke anselige forskelle i den opnåede brudstyrke, endda selvom variationerne ligger inden for de grænser, som den benyttede komprimeringsmetode tillader. Både laboratorieforsøg og praksis viser, at der findes en sammenhæng mellem bearbejdelse og trykstyrke. Som figur 1 viser, vil styrken vokse for konstant  $v/c$ , hvis konsistensen gøres stivere ved at forøge grus/cement forholdet. Herved formindskes mængden af cementpasta pr.  $m^3$ .

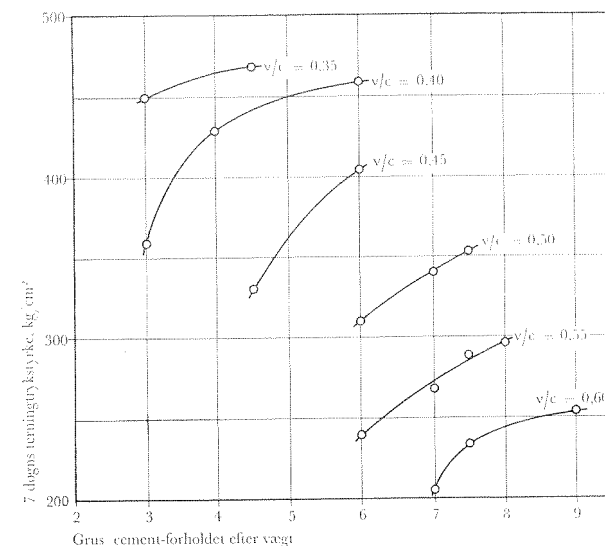


FIG. 1. Trykstyrken som funktion af grus/cement forholdet for konstante værdier af  $v/c$ . Relationship between crushing strength and aggregate/cement ratio for constant water/cement ratio.

Tilslagets egenskaber er i høj grad bestemmende for betonens bearbejdelse. For et givet vandindhold afhænger bearbejdelsen af:

Kornkurven,  
kornformen og  
kornoverfladens struktur.

Inden kornkurven diskuteres, skal omtales de to sidstnævnte faktorer indflydelse.

## KORNFORMENS INDFLYDELSE PÅ BEARBEJDELIGHEDEN

Det er en kendt sag, at for et givet vandindhold og bestemt kornkurve opnås den bedste bearbejdelse, når tilslaget består af glatte og runde korn, samt at bearbejdelsen aftager, jo mere kornene afviger fra kugleformen.

For at sikre konstant bearbejdelse er det altså utilstrækkeligt at nøjes med at fastlægge kornkurven. Kornformen må også tages i betragt-

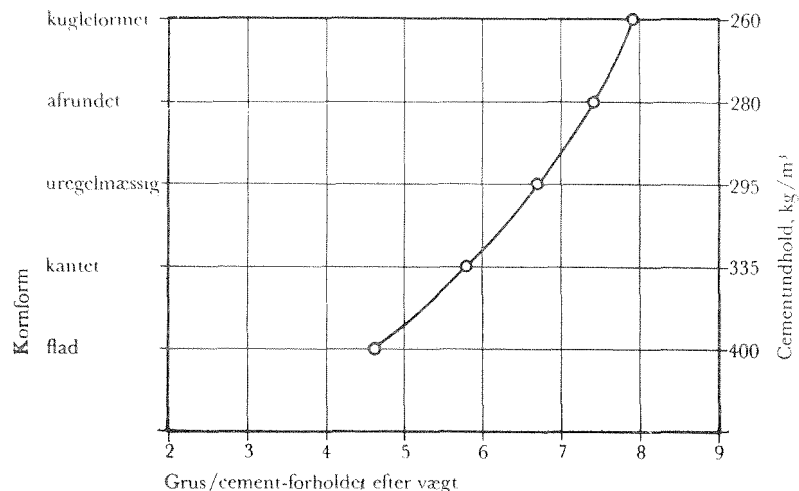


FIG. 2. Kornformens indflydelse på grus/cement forholdet for konstant styrke og bearbejdelse.

*Effect of particle shape on aggregate/cement ratio for constant workability and strength.*

ning og holdes konstant. Figur 2 viser kornformens indflydelse på cementindholdet for opnåelse af konstant styrke og bearbejdelse.

Undersøgelser på bl. a. det engelske Road Research Laboratory har vist, at der er en nøje sammenhæng mellem grusets kornform og rumvægt. En rumvægtsundersøgelse af tilslaget i forbindelse med undersøgelsen af kornkurven er derfor i virkeligheden en praktisk nødvendighed, når man ønsker en beton med konstante egenskaber. Begge disse undersøgelser må foretages, selv om alt gruset kommer fra samme grusgrav, idet grusleverandørerne hyppigt tilsætter en ikke nærmere fastsat mængde skærver eller andet kunstigt fremstillet tilslag til det naturlige grusmateriale.

En ændring af kornformen fra rund til kantet med det deraf forøgede forhold mellem kornenes overflade og rumfang (minimum for en kugle) påvirker på to måder vandbehovet for opnåelse af en bestemt bearbejdelse. For det første kræves der mere vand til at fugte overfladerne i en bestemt vægtmængde sten, og for det andet vil hulrummet mellem stenene vokse (rumvægten formindskes), hvad tabel 1 tydeligt viser. Uanset vægtfylden er rumvægten mindst, hulrumsforholdet derfor størst, for de skarpkantede korn.

stenart	kornform	vægtfylde	rumvægt
flintesten	rund	2.6	1.56
kalkstensskærver	skarpkantet	2.6	1.46
granitskærver	skarpkantet	2.7	1.42

TABEL 1. Kornformens indflydelse på rumvægten.

Men stort hulrum mellem stenene betyder stort mørtelbehov, d.v.s. stort vandbehov, idet langt den største vandmængde medgår til at give mørtelen en passende konsistens. Det grove tilslag i betonen kan opfattes blot som et kraftoverførende fyldmateriale i den omgivende mørtel. Og da mørtelen som regel er den svageste komponent og stenene den stærkeste, er det ingenlunde givet, at et forøget indhold af sten (og således lavere cementindhold pr. m<sup>3</sup>) giver en svagere beton. Tværtimod bør sten/cement forholdet gøres så stort, som hensynet til bearbejdelse tillader. Herved vil økonomien forbedres, idet mørtelen er langt den dyreste bestanddel.

Hvis mørtelen gøres federe ved at formindske sand/cement forholdet til fordel for et større stenindhold, vil styrken vokse, selv om v/c-tallet holdes konstant, se tabel 2.

samlet tilslag/cement	sand/cement	v/c - tal	trykstyrke kg/cm <sup>2</sup>
9	2,88	0.54	114
9	2.70	0.53	197
9	2.25	0.53	239

TABEL 2. Styrken vokser med federe mørtel for konstant v/c.

Såfremt der benyttes et stort indhold af sten i betonen, kan man undertiden også opnå andre besparelser.

De fleste betonblandinger, der proportioneres for bearbejdning ved vibrering, har intet eller kun nogle få cm sætmål. Når en sådan beton er færdigkomprimeret, kan den bære sig selv, undtagen på steder, hvor den bliver udsat direkte for bøjning, som f.eks. i bjælker.

Ved vægge og søjler kan formen fjernes, så snart støbningen er overstået, og en efterbehandling af den endnu uhardnede betonoverflade kan finde sted med det samme, hvad enten det drejer sig om at opnå en ru overflade, så man senere kan pudse uden først at foretage udkastning, eller man ønsker en blotlægning af stenene af rent arkitektoniske grunde. Endvidere kan formen hurtigt anvendes igen, og arbejdet med at rense formbrædderne tager kun kort tid, når mørtelen ikke har nået at blive tør.

Imidlertid må man for at kunne opnå disse lettelser og besparelser være meget omhyggelig ved valget af tilslagsmaterialer, og en undersøgelse af deres egenskaber må have fundet sted, inden blandingen proportioneres.

#### VALG AF KORNBURVE

Det er umuligt at fremstille en førsteklases, ensartet beton af et kontinuerligt graderet tilslag, medmindre der ved hver blanding anvendes ganske de samme mængder af de forskellige fraktioner, hvoraf tilslaget består. Som før vist, er det også af meget stor værdi at undgå variationer i kornformen. Hvor der benyttes et kontinuerligt graderet tilslag, kan der kun opnås ensartethed af betonen, når de forskellige grusfraktioner opbevares adskilt fra hverandre, og der blandes efter vægt. Ved nogle arbejder kan dette medføre, at der ved blandemaskinen må anvendes fem eller flere siloer, og der optages et anseligt område til lagerplads. Udgifterne ved oprettelsen af disse blandingsanlæg og til arbejdet med at blande fra så mange fraktioner er meget store. Meget kan imidlertid spares her, uden at kontrollen med betonen bliver ringere, hvis der benyttes et diskontinuerligt graderet grus, idet det da som oftest kun er nødvendigt at arbejde med to kornstørrelser, f. eks. en grov fraktion med en kornstørrelse på ca. 16–32 mm og en fin i området 0–4 mm. Men det er lige så nødvendigt som før at sørge for, at de fastsatte grænser inden for de to fraktioner ikke overskrides, og at rumvægtene hele tiden er de samme, såfremt der kun tillades en lille afvigelse fra den tilstræbte middeltrykstyrke. Blanding efter vægt må benyttes, men der bruges i dette tilfælde kun to vejesiloer, og et mindre område end før beslaglægges til arbejds- og lagerplads.

#### VÆRDIEN AF GODE TILSLAGSMATERIALER

Det er en fundamental misforståelse at tro, at man får en billigere beton, jo billigere et tilslag man benytter. Tværtimod kan anvendelse af

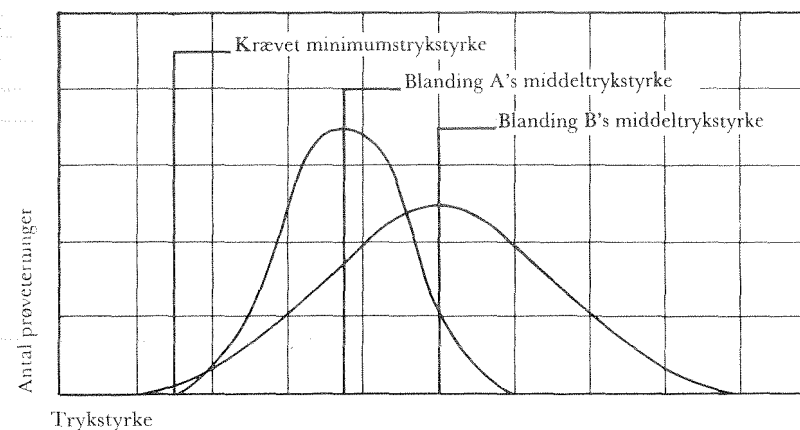


Fig. 3. Fordelingskurver for opnået styrke af 2 betonblandinger.

*Distribution curves of compressive strength of two mixes.*

et ret dyrt, men velgraderet og kontrolleret tilslag reducere den samlede  $m^3$  pris med måske 3–4 kr. i forhold til beton fremstillet af et billigere, dårligt graderet tilslag indeholdende en ubestemt mængde knuste materialer.

De to kurver i figur 3 viser den vigtigste begrundelse herfor. Kurven A angiver betonen indeholdende det dyre tilslag. Betonen med det billige tilslag, repræsenteret af kurven B, har større spredning af de opnåede terningtrykstyrker og må derfor udføres med en højere tilstræbt middeltrykstyrke end blanding A, hvis ikke et for stort antal terninger skal opvise styrker, der ligger under det krævede minimum. I blanding A kan entreprenøren benytte et grus/cement forhold på måske 9:1, mens det ved blanding B er nødvendigt at anvende forholdet 7:1. Forskellen i cementindhold for disse to betonblandinger andrager ca.  $60 \text{ kg/m}^3$ . Uden dette merforbrug af cement må betonen med det dårlige tilslag hærde i længere tid for at opnå den tilstrækkelige styrke, d.v.s. den hastighed, hvormed arbejdet kan skride frem, må nedsættes.

I betragtning af den rolle tilslaget spiller for at opnå en ensartet beton, er det overraskende, at grænserne i valg af kornkurve, som de kommer til udtryk i de fleste landes normer, er så vide, som de er, samt at der sjældent foreskrives nogen virkelig kontrol med kornformen. Og endda viser erfaringen, at kun få grusleverandører er i stand til at opfylde de normerede krav.

Såfremt man i fremtiden skal høste nogen fordel af en mere udbredt mekanisering inden for betonindustrien, kommer man ikke uden om at foreskrive og i praksis foretage en langt nøjere kontrol af de anvendte grusmaterialer. Ikke alene af hensyn til ønsket om små variationer i det færdige arbejdes kvalitet, men også af hensyn til maskinerne, hvis ydeevne – og dermed den nytte man kan have af dem – afhænger meget af de tilførte materials ensartethed.

#### RIGTIG UDNYTTELSE AF GRUSFOREKOMSTER

Det er velkendt, at man meget sjældent har bestræbt sig for at nyttiggøre det fremkomne spildmateriale ved udvindingen af tilslagsmaterialer i grusgrave, før forekomsterne er ved at slippe op. Det frasigtede, ikke ønskede materiale, er simpelthen blevet kasseret. Dette gælder især for sandet, fra hvilket man, for at få de forskellige fraktioner til at virke godt sammen, har krævet en stor del af de finere materialer frasigtet, et krav, der i mange tilfælde ikke har været logisk begrundet.

Hadde man skænket studiet af tilslagets lejringsforhold i betonen større opmærksomhed, ville det sikkert i mange tilfælde have været muligt at benytte de fineste sandfraktioner som fillermateriale, især ved diskontinuerte graderinger. En omhyggelig undersøgelse af tilslaget vil tit gøre det muligt at fremstille en fuldt tilfredsstillende beton af et materiale, der ved første øjekast ikke ser lovende ud. Imidlertid må man være klar over, at man ikke kan nå til et godt resultat med slet sorteret og slet vaskede tilslag, så jo dårligere gruskvaliteten er, desto større er leverandørens ansvar for, at der leveres velsorterede, vaskede og ensartede materialer.

#### KVALITETSKONTROL AF GRUS

En almindelig forbedring i kvaliteten af og kontrollen med gruset sker ikke af sig selv. En forbedring vil først indtræde, når der bliver stillet krav derom. Ansvar herfor hviler i første omgang på den normgivende myndighed, og kravene burde støttes af entreprenørerne. Som vist må disse være meget interesserede i, at de leverede grusmaterialer er de bedst mulige, samt at de opfylder de stillede betingelser. Men entreprenørerne lægger desværre altfor sjældent tilstrækkelig vægt på, at leverandørerne til stadighed opfylder betingelserne, blot den første leverance er blevet godkendt. De nødvendige fortløbende kontrolundersøgelser af tilslagets kornkurve, kornform og evt. forurening undlader man ofte at foretage, eller de foretages ganske overfladisk.

En udvikling i retning af mere udbredt anvendelse af diskontinuerligt graderede tilslagsmaterialer burde af grusleverandørerne hilses med glæde, da dette vil give disse økonomiske fordele. Thi da sand og sten almindeligvis sælges efter rumfang, og 1 m<sup>3</sup> materiale bestående af korn af næsten samme størrelse vejer mindre end det samme rumfang indeholdende mange forskellige kornstørrelser, vil den faktiske pris pr. ton vokse.

Hertil kommer, at da brug af et nøje kontrolleret, diskontinuerligt graderet grus giver en beton med lille spredning, kan man som før vist benytte en magrere blanding for opnåelse af en bestemt trykstyrke, hvilket vil bevirke, at den vægtmængde tilslag, der bliver solgt pr. m<sup>3</sup> beton, vil forøges.

Til slut skal påpeges, at ved mange entrepriser skyldes størstedelen af udgifterne ved tilslaget transport af dette til forbrugsstedet. Det er derfor uøkonomisk at betale høje transportpriser for et materiale, der giver beton af varierende kvalitet, når man for ringe ekstra betaling kan købe et grus med mere hensigtsmæssige egenskaber, eller hvis leverandøren, med lille ekstra udgift for køberen, forpligter sig til at levere bedre sigtede og rensede materialer.

**PROPORTIONERING  
PÅ GRUNDLAG AF BØJNINGSTRÆKSTYRKEN**

af

*P. J. F. Wright, Road Research Laboratory, Department  
og Scientific and Industrial Research*

*Oversat og forkortet af civilingeniør Birger Warris*

620.17:666.972.1

Proportionering af beton på grundlag af bøjningstrækstyrken foretages på næsten samme måde som proportionering på grundlag af trykstyrken; kun på to punkter er der afvigelser, nemlig med hensyn til bestemmelsen af

- 1) hvilken gennemsnitsbøjningstrækstyrke der kræves for at opnå den angivne minimumstyrke, og
- 2) hvilket v/c-forhold der kan give den ønskede gennemsnitsbøjningstrækstyrke.

Forholdet mellem den i betingelserne angivne minimumstyrke og den nødvendige gennemsnitsstyrke afhænger først og fremmest af variationskoefficienten  $v$  for styrkerne og kan sættes til  $(1 \div 2, 3 v)$  under forudsætning af, at man tillader, at ca. 1 prøveresultat ud af 100 er lavere end den angivne minimumsværdi.

Hvis variationskoefficienten for bøjningstrækstyrken og trykstyrken af prøvelegemer fremstillet på byggepladsen er den samme, kan man anvende samme forhold mellem minimumstyrken og gennemsnitsstyrken i de to tilfælde. Hidtil foreligger kun få erfaringer vedrørende variationskoefficienten for bøjningstrækstyrken, men de hidtil publicerede data synes at vise, at den i hvert tilfælde ikke er højere end variationskoefficienten for trykstyrken. Forhåbentlig vil der i de kommende år komme til at foreligge flere oplysninger om variationskoefficienten for bøjningstrækstyrken.

Bestemmelse af v/c-tallet, når gennemsnitsbøjningstrækstyrken er givet, sker ved hjælp af diagrammer på samme måde, som når trykstyrken er udgangspunkt, men kurverne afhænger af tilslagsmaterialernes art.

Der foretages i øjeblikket en undersøgelse på Road Research Laboratory for at fremskaffe oplysninger til sådanne diagrammer, og de hidtidige resultater viser, at der er en almindelig tendens til, at bøjningstrækstyrken forøges, når gruset bliver mere skarpkantet, selvom v/c-forholdet forbliver uforandret. Prøveresultaterne har været anvendt til at proportionere blandinger med meget lav bearbejdelighed og en gennemsnitlig 28-døgns trykstyrke på 390 kg/cm<sup>2</sup> og en gennemsnitlig 28-døgns bøjningstrækstyrke på 39 kg/cm<sup>2</sup>. Tabel 1 angiver blandingsforholdene. Den krævede trykstyrke blev opnået ved v/c-forhold mellem 0,61 og 0,66; 0,64 er sandsynligvis anvendelig for alle de anvendte grusarter. Den forlangte bøjningstrækstyrke blev opnået med v/c-tal liggende mellem 0,67 og 0,75 – et interval næsten 4 gange så stort. Ved forsøgene med trykstyrken har det vist sig, at grus med runde korn kræver mindst cement, medens man ved bøjningstrækstyrkeforsøgene fik den cementfattigste blanding med skarpkantet grus.

Tabel 1 viser, at med grus af skarpkantede, knuste materialer, kræves

TABEL 1.

krav til beton	blandingsforhold	grusets kornform		
		rund	middel	skarpkantet
28 døgns gennemsnitstrykstyrke 390 kg/cm <sup>2</sup>	v/c-forhold (efter vægt)	0,61	0,66	0,64
	grus/cement forhold (efter vægt)	10,4	9,4	8,7
	relativt cementindhold pr. m <sup>3</sup> beton	93	100	107
28 døgns gennemsnitsbøjningstrækstyrke 39 kg/cm <sup>2</sup>	v/c-forhold (efter vægt)	0,57	0,66	0,75
	grus/cement forhold (efter vægt)	9,9	9,4	10,1
	relativt cementindhold pr. m <sup>3</sup> beton	98	100	93



der 14% mindre cement til opnåelse af den angivne bøjningstrækstyrke end til den angivne trykstyrke.

Det vil ses af det foregående, at proportionering på basis af bøjningstrækstyrken i princippet foregår på samme måde som proportionering på basis af trykstyrken, men at man ved at gå ud fra bøjningstrækstyrken undertiden kan spare betydelige mængder cement. Det synes derfor, som om man i højere grad bør være opmærksom på bøjningstrækstyrken, og at man specielt ved arbejder på flyvepladser og veje bør proportionere betonen på grundlag af bøjningstrækstyrken.

## LITTERATURHENVISNING

- [1] Road Research Laboratory. Design of concrete mixes. 2nd edition. H.M.S.O. Road Research Road Note No. 4. 1950. pp. 16.

## III

**PROPORTIONERING AF BETON  
BEREGNET TIL KOMPRIMERING MED  
OVERFLADEVIBRATOR**

*Af*

*R. H. H. Kirkham, B.Sc., Ph.D., A.M.I.C.E. Road Research Laboratory,  
Department of Scientific and Industrial Research  
Oversat og forkortet ved civilingeniør Birger Warris*

## SAMMENFATNING

666.972.1

Beton til vejbelægninger, der skal komprimeres ved vibration, må proportioneres på en lidt anden måde end sædvanlig beton, fordi der kun kan tillades små variationer i styrken og bearbejdigheden.

v/c-forholdet fastsættes i forhold til den krævede styrke. Hvis man har konstateret, at de variationer, der forekommer i styrken på arbejdspladsen, er små, kan man tillade en forøgelse af vand-cement-forholdet og derved en formindskelse af cementindholdet, således at betonen bliver mere økonomisk.

Grus-cement-forholdet bestemmes ved, at betonen, når den skal komprimeres med overfladevibrator, skal have en ret ringe bearbejdighed. Bearbejdighedens størrelse afhænger af, hvilke vibratorer der bruges, af den maksimale kornstørrelse og af sandets kornkurve. Gruskornkurven må sammensættes sådan, at betonen er stabil og får en pæn overflade. Man kan beregningsmæssigt fastsætte blandingsforholdene, men disse bør i almindelighed altid kontrolleres ved prøveblandinger, og før man kan nå til en mere nøjagtig fremgangsmåde, kræves en laboratorieprøve, ved hvilken forskellige vibratorers karakteristika kan efterliges.

Benyttelse af den reelt forekommende variation i styrken til at bestemme vand-cement-forholdet og af en vibrationsprøve til at bestemme grus/cement-forholdet vil sandsynligvis medføre bedre metoder for betonkontrollen og mere effektive komprimeringsmaskiner. Det vil imidlertid være nødvendigt at indføre visse ændringer i betingelserne for betonarbejder.

## INDLEDNING

Beton, der skal komprimeres med overfladevibrator, proportioneres i princippet på samme måde som al anden beton. Proportioneringen kan opdeles i to hovedpunkter:

1. Fastlæggelse af vand/cement-forholdet på grundlag af den krævede minimumsstyrke.
2. Bestemmelse af grus/cement-forholdet med henblik på en passende bearbejdelighed.

Ved beton til belægninger skal disse to forhold fastsættes med en større nøjagtighed end den, der anvendes ved beton til andre arbejder.

v/c-forholdet skal vælges således, at man opnår den krævede minimumsstyrke billigst muligt, men selv om dette er væsentligt, bør man dog ofre størst omhu på fastsættelsen af grus/cement-forholdet, da dette bestemmer betonens bearbejdelighed, der nøje skal svare til, hvad den anvendte vibratortype kræver.

## BESTEMMELSE AF V/C-FORHOLD

I de fleste betingelser for betonveje og startbaner forlanges, at minimumstrykstyrken efter 28 døgn skal være 280 kg/cm<sup>2</sup>. Der er endvidere næsten samme kontrol på alle arbejdspladser, da betonens bearbejdelighed skal holdes meget konstant, hvis man vil undgå store variationer i belægningens komprimeringsgrad og ujævnheder i overfladen; hvis bearbejdeligheden ændrer sig, skal overhøjden ved udlægningen forandres. F. eks. kræver beton med en »compaction factor«\*) på 0,80 en overhøjde på 3,8 cm, når betonen skal udlægges med håndkraft i en 20 cm tyk belægning, og man ønsker en fuldstændig komprimering. Hvis betonens bearbejdelighed forøges, så »compacting factor« er 0,84, reduceres den nødvendige overhøjde til 3,2 cm, da den mere bearbejdelige beton i højere grad komprimerer sig selv under tyngdekraftens indflydelse. En ændring på 0,04 i »compacting factor« nødvendiggør altså en korrektion på 0,6 cm i overhøjden, og da sådanne korrektioner ikke kan udføres mellem udlægningen af hver blanding, kan variationer i bearbejdeligheden kun imødegås ved at lade vibrationsmaskinen gå flere eller færre gange hen over belægningen. Det er derfor nødvendigt at anvende om-

\*) se bilag 1.

hyggelig kvalitetskontrol med vejning af materialerne, flere forskellige grusfraktioner, regelmæssig bestemmelse af vandindholdet i gruset og konstant inspektion. Med et sådant omfang af kontrollen må man, for at opnå en 28 døgns minimumstrykstyrke på 280 kg/cm<sup>2</sup>, anvende et v/c-tal på 0,5, og ved de fleste store arbejder, der har været udført siden 1946, har v/c-forholdet da også været mellem 0,48 og 0,53.

Man har derfor i almindelighed uden videre anvendt denne gennemsnitsværdi for v/c-forholdet og har sjældent forsøgt en nøjagtigere bestemmelse i hvert enkelt tilfælde. Anvendelsen af statistiske metoder på betonkontrollen har imidlertid medført, at man bør overveje dette spørgsmål nærmere.

Når man tager alle de mange variable i betragtning, som forekommer ved fremstilling og prøvning af betonterninger, synes det rimeligt at tillade, at 1% af prøveresultaterne må være mindre end den angivne minimumsstyrke, og hvis der anvendes udstrakt kontrol, kræver Road Note No. 4\*\*), at gennemsnitsstyrken af prøvelegemerne under arbejdet skal være så høj, at 75% af gennemsnitsstyrken ikke er lavere end den specificerede minimumsstyrke. Under disse forudsætninger må for en beton med minimumstrykstyrke på 280 kg/cm<sup>2</sup> trykstyrkens spredning ikke overstige 40 kg/cm<sup>2</sup>.

Har man tidligere indhøstet erfaringer med den kontrolmetode, man ønsker at anvende, og kendes variationerne i cementkvaliteten, kan man foretage et skøn over, hvilken spredning der kan forventes. Hvis man tør påregne en spredning mindre end 40 kg/cm<sup>2</sup>, kan betonens gennemsnitsstyrke reduceres, og v/c-forholdet tilsvarende forøges; skønner man, at den er større, skal v/c-forholdet formindskes. Ved en sådan proportionering kan man også tage hensyn til den forøgelse af cementstyrken, der er sket siden proportioneringskurverne blev tegnet, men man bør dog, for at undgå frostskafer på belægningen, ikke gå over et v/c-forhold på 0,6.

Står man derimod uden tidligere erfaringer, kan man proportionere direkte efter Road Note No. 4, og når spredning og gennemsnitsstrykstyrke efter prøvning af 50–60 terninger kan bestemmes, ændres proportioneringen som angivet ovenfor. Denne metode kan naturligvis kun bruges på ret store arbejder, eftersom det vil tage mindst 1 uge at støbe så mange terninger, og foretages prøvningerne efter 28 døgn, kan ændring af blandingsforholdet først foretages 5 uger efter, at arbejdet er begyndt.

\*\*) se bilag 2.

Det er derfor ønskeligt at samle erfaringer fra arbejdspladser, hvor der har været anvendt forskellige materialer og forskellige kontrolmetoder.

Proportionering på grundlag af den reelt forekommende variation i styrken vil sandsynligvis resultere i forbedrede kontrolmetoder, da disse vil medføre besparelser i penge, men der bør også indføres visse ændringer i betingelsernes formulering, således som angivet nedenfor.

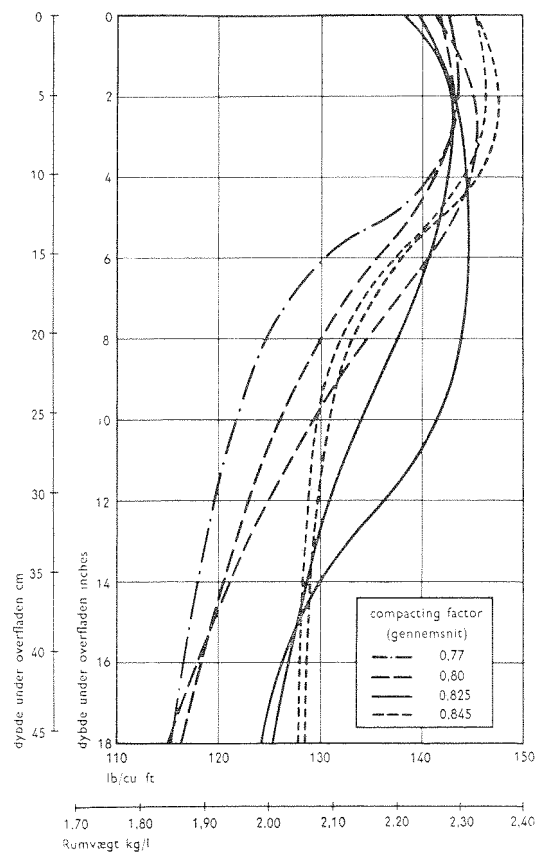


FIG. 1  
Sammenhæng mellem bearbejdigheden udtrykt ved »compacting factor«, betonens rumvægt og dybden under betonoverfladen.

#### BESTEMMELSE AF GRUS/CEMENT-FORHOLDET

Bestemmelsen af grus/cement-forholdet afhænger af, hvilken bearbejdighed der kræves, og af grusmaterialernes kornkurve og art. Blandingsforholdet kan i første omgang fastsættes ved hjælp af tabeller, men må da kun betragtes som en tilnærmelse, der skal korrigeres, efter en prøvestøbning er foretaget. Korrektionens omfang kan imidlertid formindskes, når man ved anvendelse af tabellerne tager hensyn til følgende forhold.

I Road Note No. 4 skelnes mellem 4 forskellige grader af bearbejdighed, men til veje og startbaner, hvor betonen komprimeres ved overfladevibratoren, må bearbejdigheden fastlægges mere nøjagtigt – dels på grund af den ovenfor omtalte sammenhæng mellem bearbejdighed og nødvendig overhøjde, dels fordi bearbejdigheden bestemmer, hvor langt komprimeringen trænger ned i betonen. Fig. 1 viser resultaterne fra en undersøgelse over virkningen af en håndstyret vibratorbjælke. Som mål for denne virkning er benyttet betonens rumvægt, og på figuren er afbildet sammenhængen mellem rumvægten og dybden under betonoverfladen for beton med 4 forskellige bearbejdighedsgrader. I forsøgsserien var pladetykkelsen for stor til, at vibratoren var i stand til at komprimere betonen i fuld dybde, og for alle blandinger gjaldt, at rumvægten under 40 cm's dybde svarede til ukomprimeret betons rumvægt. Ved den mest tørre blanding havde vibratoren næsten ingen virkning ved dybder over 20 cm, og en rumvægt på 2,30 kg/l blev kun opnået ned til en dybde på ca. 7 1/2 cm. Når bearbejdigheden forbedredes, nåede vibratorens virkning længere ned, og et maksimum for »virkningsdybden« fandtes ved en »compacting factor« på 0,825. Ved større bearbejdighed aftog virkningsdybden påny.

Erfaringerne synes at vise, at hvis en plade af meget stor tykkelse bliver fuldstændig komprimeret ved overfladevibration ned til en dybde af 12 1/2 cm eller mere, vil en 20 cm tyk plade blive fuldstændig komprimeret i hele sin dybde, når den samme vibrator anvendes. Dette skyldes, at vibrationsbølgerne kastes tilbage fra underlaget, hvorved de nederste lags komprimering forøges. Ved de to blandinger, hvor »compacting factor« var 0,02 større eller mindre end optimum, var rumvægten 2,30 kg/l kun ned til en dybde på 11 1/2 cm. Det er usandsynligt, at en 20 cm tyk plade ville være blevet fuldstændig komprimeret under de angivne forhold, og det er derfor ønskeligt, at variationen i »compacting factor« ikke overstiger  $\pm 0,02$ , hvilket netop kan opnås med omhyggelig kvalitetskontrol.

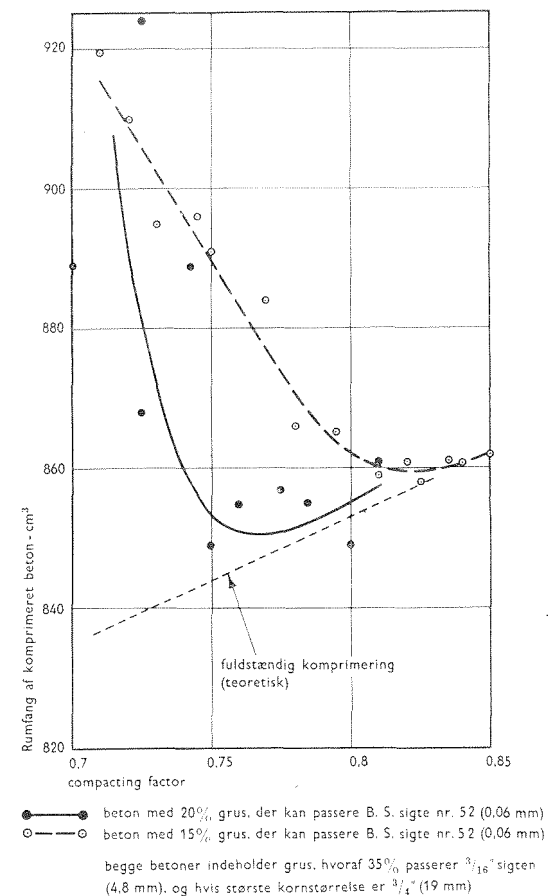
Den optimale »compacting factor« afhænger af det materiel, der anvendes på arbejdspladsen. For beton med en maksimal kornstørrelse på 19 mm og med en kornkurve svarende til kurve nr. 2 i Road Note No. 4 (35% gennemfald på 4,8 mm sigten, se fig. 3), ligger den optimale »compacting factor« for en maskindreven vibrator mellem 0,80 og 0,82, og for en håndstyret vibratorbjælke mellem 0,83 og 0,85; den laveste værdi svarer til de bedste vibratoren. Eksempelvis vil maskindrevne vibratoren med amplitude på 0,5 cm kunne komprimere betonen i 20 cm's tykkelse, når »compacting factor« er 0,80. Anvendes vibratorbjælker med den samme gennemsnitsamplitude, skal betonen have en »compacting factor« på 0,83, for at en 20 cm tyk plade kan blive tilfredsstillende komprimeret. Maskiner med mindre amplitude kræver større bearbejdelse.

De opgivne tal for optimum af »compacting factor« må kun betragtes som en grov angivelse, da de kun gælder for en bestemt kornstørrelse og kornkurve, og de må derfor ændres, hvis andre grusmaterialer anvendes. Med større maksimal kornstørrelse skal »compacting factor« formindskes med omkring 0,02; hvis der anvendes et grovere sand, skal bearbejdelse forøges.

I fig. 2 er vist resultaterne af en undersøgelse over indflydelsen af sandets kornkurve foretaget i et laboratorium med en lille overfladevibrator. En bestemt vægtmængde beton blev komprimeret på standardiseret måde, og størrelsen af rumfanget benyttedes derefter som mål for komprimeringsgraden. Blandingsforholdet var det samme for alle prøverne, men sandets kornkurve varierede. Når der anvendtes fint sand svarende til det ved forsøgene i fig. 1 benyttede, hvor 20% af det samlede grus passerende en 0,6 mm sigte, kunne betonen komprimeres fuldstændig, når »compacting factor« var 0,77. Et grovere sand, hvor kun 15% af de samlede grusmaterialer passerede 0,6 mm sigten, krævede en »compacting factor« på omkring 0,82. Brug af finere sand gør det derfor muligt at komprimere beton med lav bearbejdelse med denne specielle vibrator.

Kornkurven for stenene har kun lille indflydelse på, hvilken bearbejdelse der er nødvendig for at opnå fuldstændig komprimering, men der må ikke være for meget af den største kornstørrelse eller af materiale mellem 2,4 mm og 9,6 mm. Hvis der er for meget groft materiale, vil de tørre blandinger, der normalt anvendes til vejarbejde, vise tendens til afblanding, og da betonen skal udlægges i ret tynde plader, vil selv ringe afblanding medføre dannelse af porer.

Fig. 2 Figuren viser sammenhængen mellem betonens tæthed angivet som rumfang af en fast vægtmængde beton og bearbejdelse udtrykt ved »compacting factor«.<sup>1)</sup>



Når beton udlægges ved håndkraft, tippes den ofte direkte fra en vogn ned på underlaget. I en undersøgelse foretog man udboring af cylindre, dels hvor betonen fra to udtippede vognlæs »overlappede« hinanden i belægningen, dels på steder, hvor man havde beton fra midten af et vognlæs, eller hvor udlægningen skete med maskine. Skønt der kun forekom ringe afblanding, når betonen tippedes ud, resulterede det

<sup>1)</sup> Errata: B. S. sigte nr. 52 (0,06 mm) til B. S. Sigte nr. 25 (0,6 mm)

uundgåelige overskud af store sten ved foden af de udtippede betonbunker i dannelsen af stenreder i bunden af de fleste cylindre til trods for vibrationen. Mængden af fine materialer, der kan fylde porerne imellem stenene, er i de sandfattige blandinger, der anvendes til belægninger, ret lille, og for meget materiale af middeldkornstørrelse vil forhindre de store korn i at pakkes tæt sammen. Dette forøger mængden af porer, hvilket gør det vanskeligt at få en pæn overflade, medmindre man bruger mere sand eller mere cement. De kurver, der angives i Road Note No. 4, giver sig ikke ud for at være idealkornkurver, og man behøver ikke nødvendigvis sammensætte grusmaterialet således, at det nøjagtigt svarer til disse kurver; det er tværtimod ofte tilrådeligt at bruge mindre materiale med kornstørrelserne 38 mm og 9,6 mm, end kurverne angiver. Et begreb om betydningen af sådanne ændringer for »compacting factor« kan man få ved at betragte resultaterne af en nylig udført serie prøveblandinger. De anvendte kornkurver er vist på fig. 3. Den oprindelige kornkurve svarede til den i Road Note No. 4 nr. 2 angivne og gav beton med en »compacting factor« på 0,77. Formindskelse af 38 mm grusfraktionen

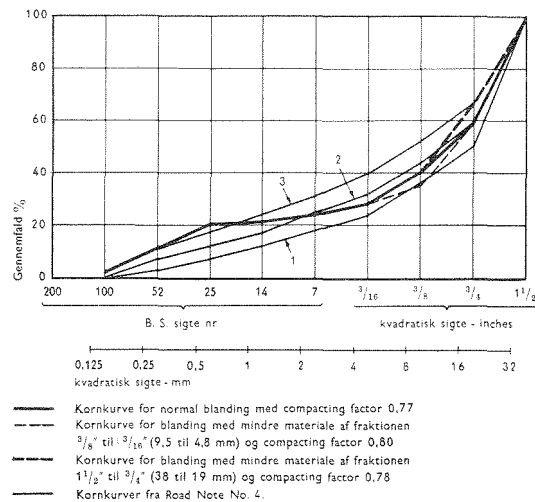


FIG. 3 Kornkurver for forsøgsblandinger.

resulterede i en ret beskedent ændring i »compacting factor«, men når 9,6 mm fraktionen blev formindsket, forøgedes »compacting factor« til 0,80.

I tabeller til brug ved proportionering er ofte angivet forskellige kornformer. Erfaringen synes at vise, at når mængden af skarpkantede korn i et materiale af iøvrigt middel kornform overstiger 25%, skal tabeller for knuste materialer benyttes til bestemmelse af bearbejdeligheden.

Som det fremgår af det ovenfor anførte, kan grus-cement-forholdet ikke på forhånd bestemmes nøjagtigt, og en forbedret metode til at proportionere beton, der skal komprimeres med overfladevibrator, er derfor ønskelig. Den lille overfladevibrator, der blev omtalt ovenfor, er konstrueret således, at den kan efterligne karakteristikkene for forskellige vibratoren, og det ventes, at forsøg med den vil kunne medføre forenkling i proportioneringen. Der kræves imidlertid omfattende erfaringer.

I øjeblikket kan det bedste skøn over grus/cement-forholdet opnås, hvis »compacting factor« vælges mellem størrelser svarende til lav eller meget lav bearbejdelighed på en sådan måde, at betonen bedst muligt er i overensstemmelse med den vibrator, der anvendes, med den største kornstørrelse af gruset og med sandets kornkurve. Hvis man f.eks. skal anvende en håndmanøvreret vibratorbjælke med en gennemsnitsamplitude på 0,5 cm til at komprimere en 20 cm tyk betonbelægning, hvori grusmaterialernes største kornstørrelse er 38 mm, og hvor 17% af gruset passerer 0,6 mm sigten, kan et første skøn over det korrekte grus/cement-forhold opnås, hvis man sætter »compacting factor« til 0,84. Denne værdi fremkommer ved, at man går ud fra værdien svarende til den specielle type maskine (0,83) og korrigerer for største kornstørrelse ( $\div 0,02$ ) og for sandets finhed ( $+0,03$ ). Kornkurven skal derefter afpasses således, at betonen hverken har tendens til afblanding eller er svær at give en pæn overflade, og man må yderligere foretage en skønsmæssig vurdering af kornformen, således at grus/cement-forholdet kan findes af tabeller ved interpolation. Da metoden ikke er nøjagtig, bør man derefter foretage en prøveblanding for at kontrollere, at de anvendte blandingsforhold giver en passende beton.

#### BETINGELSERNES FORMULERING

Hvis man skal opmuntre til fremkomsten af forbedrede kontrolmetoder eller mere effektive komprimeringsmaskiner, må man i betingelserne tillade højere max. v/c-forhold end for øjeblikket. Det vil endvidere være

nødvendigt at indføre visse arter af straf eller prisnedsættelser, der skal træde i kraft, når minimumsstyrkerne ikke opnås, eller hvis de udborede cylindre viser dårlig komprimering. Dette vil sandsynligvis føre til forbedrede proportioneringsmetoder og som følge deraf give større økonomi og bedre kvalitet for betonbelægninger.

## LITTERATURHENVISNING

- [1] Road Research Laboratory. Design of concrete mixes. 2nd edition London. H.M.S.O. Road Research Road Note No. 4. 1950. pp. 16.

*Compacting factor***Bilag 1.**

Bearbejdigheden måles med »Compacting Factor« apparatet, som er vist i fig. 6. Betonen anbringes i den øvre tragt, falder herfra ned i den nedre, og herfra ind i en cylinderform med  $D=15$  cm og  $H=30$  cm. For en given blanding vil vægten af den beton, der netop fylder cylinderen, være et mål for bearbejdigheden, og jo større vægt des større bearbejdighed. Formen anbringes på en vægt, der isten for at angive den absolutte vægt, automatisk viser afvigelsen fra en tilstræbt vægt (=bearbejdigheden). For en given blandemaskine og blanding kan apparatet kalibreres således, at man direkte aflæser den ændring i vandmængde, der fordres for at opnå en given bearbejdighed.

Tabellen nedenfor angiver omtrentligt forholdet mellem bearbejdigheden bestemt ved sætmål og »compacting factor«. Det bemærkes, at sætmålet og »compacting factor« langt fra er direkte korrelerede.

Bearbejdighed	Sætmål cm	Compacting factor
meget lav	0-2 ½	0,78-0,80
lav	2 ½-5	0,85-0,87
middel	5-10	0,92-0,935
høj	10	0,95-0,96

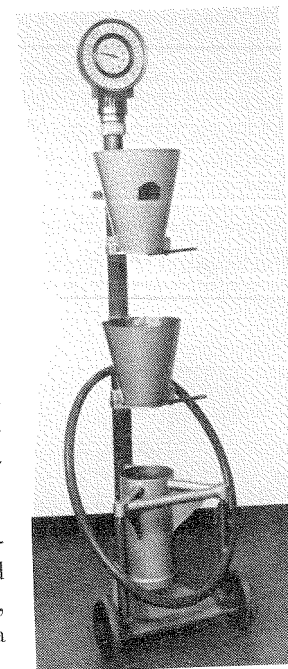


FIG. 4. Automatisk »Compacting Factor« apparat til måling af betonens bearbejdighed. (Efter sparkes).

**Bilag 2.***Road Note No. 4*

Proportioneringsmetoden heri er baseret på, at man først udfra den angivne minimumstyrke bestemmer den gennemsnitlige styrke, der er nødvendig, for at højst 1% af prøveresultaterne er mindre end minimumstyrken. Forholdet mellem minimumstrykstyrken og gennemsnitstrykstyrken angives for arbejdspladser med omfattende kontrol – vejning af materialer, fugtighedsbestemmelser på gruset og konstant inspektion – til 0,75; ved sædvanlig kontrol med afvejning af materialerne til 0,60 og ved ringe kontrol og afmåling efter rumfang til 0,40. Derefter bestemmes på sædvanlig måde  $v/c$ -forholdet udfra gennemsnitstrykstyrken. Endvidere indeholder proportioneringsforskriften tabeller til bestemmelse af grus/cement-forholdet for forskellige grader af bearbejdelighed; forskellige kornkurver og forskellige  $v/c$ -forhold, samt forskellige arter af grus. Når bearbejdeligheden og kornkurven – for hvilket der er angivet nogle intervaller – tillige med  $v/c$ -forholdet er fastlagt, kan man altså direkte finde grus/cement-forholdet.

**NOGLE PROBLEMER VEDRØRENDE  
DESTRUKTIV OG IKKE-DESTRUKTIV PRØVNING  
AF BETON**

*Af*

*R. Jones, B.Sc., Ph.D. og P.J.F. Wright, B.Sc. Road Research Laboratory,  
Department of Scientific and Industrial Research*

*Oversat og bearbejdet af civilingeniør Erik Trudsø.*

SAMMENFATNING

620.179

Artiklen behandler nogle af problemerne i forbindelse med betonprøvning ved destruktive og ikke-destruktive metoder.

De betragtede destruktive prøver er trykprøven, bøjeproven og den ækvivalente terningprøve. Forholdet mellem prøvestykkets styrke og styrken af det tilsvarende bygværk diskuteres. Der synes at være tydelige fordele ved at prøve bøjningsstyrken i stedet for trykstyrken ved bygning af veje og startbaner.

Beton kan bekvemt prøves på stedet ved, at man måler hastigheden af en ultralyd-impuls. Ved at anvende metoden til at prøve bygværker og vejbelægninger af beton kan man vurdere betonkvaliteten.

INDLEDNING

Normalt opfatter man betons »styrke« i betydningen trykstyrke af bygværker eller af terninger fra byggepladsen. Resultaterne af prøver med disse terninger angiver ikke nødvendigvis kvaliteten af betonen i konstruktionen, fordi komprimeringsgraden og lagringsmåden sandsynligvis er forskellig i de to tilfælde. Alligevel er terningernes trykstyrker meget nyttige, idet de giver et mål for ensartetheden af den beton, der bliver fremstillet, og eftersom terningerne tilberedes og prøves på standardiseret måde, giver de tillige en antydning af betonens mulige styrke i bygværket.

Udover de oplysninger, som ingeniøren får af trykstyrkerne, ønsker man at kende betonkvaliteten i selve bygværket.

Man kan behandle dette problem på 2 måder. Den ene går ud på at udskære cylindre, bjælker eller andre prøvestykker og at prøve styrken af disse; den anden er at bruge ikke-destruktive metoder til at prøve betonen på stedet. At udbore cylindre er almindeligvis af værdi, når man studerer veje, startbaner og andre belægninger, og muliggør direkte bestemmelser af pladetykkelsen, betontætheden og beliggenheden af eventuel armering. Betonens trykstyrke kan måles ved at knuse cylindrene, efter at de er blevet passende afrettet. På den anden side er det en forholdsvis langsom og dyr operation at udbore og afrette cylindre, og pladerne skal udbedres, efter at kærnerne er udboret. Undertiden udskærer man bjælker af betonplader, særlig startbane-plader, men dette er en endnu vanskeligere og dyrere fremgangsmåde end at udbore cylindre.

Der er udviklet en del ikke-destruktive prøvemethoder, som ikke kræver udskæring af prøvestykker. De måler almindeligvis snarere betonens elastiske egenskaber end dens styrke. Den prøve, som synes at have særlig nyttige anvendelser, går ud på at måle hastigheden af en ultralyd-impuls igennem betonen. Denne metode er hurtig og nem og gør det let at sammenligne betonkvaliteterne i bygværket og i de tilsvarende prøveterninger. Prøven kræver sædvanligvis, at to modstående flader af konstruktionen er afdækkede og tilgængelige; i sin nuværende form er den ikke nem at anvende på vejbelægninger. Imidlertid er den egnet til at prøve jernbetonsøjler, bjælker, vægge og andre konstruktioner, forspændte konstruktioner og præfabrikerede elementer, deriblandt armerede og forspændte elementer. Den er tillige et praktisk middel til at studere betonkvalitetens variation gennem et bygværk og til at følge styrkeforøgelsen med tiden eller nedbrydningen som følge af ødelæggende påvirkninger såsom frost eller havvand.

## DESTRUKTIV PRØVNING

### *Trykprøvningen*

Under mange omstændigheder går beton i stykker, ikke som følge af påførte belastninger, men på grund af fortsat forvitring, slid eller ublid behandling. I sådanne tilfælde behøves der en prøve til at angive betonens almindelige kvalitet, og sædvanligvis bruges trykprøven. Prøvelegemerne til denne prøve fremstilles og prøves let, idet resultatet er nært knyttet til vand/cement-forholdet, som stort set betinger holdbarheden, og der findes et rigt fond af erfaring, grundet på trykprøven.

Det må imidlertid understreges, at trykstyrken, målt ved eenakset belastning af terninger eller cylindre, ikke er nogen grundlæggende egenskab ved betonen. Den belastning, ved hvilken brud indtræder, påvirkes af faktorer såsom prøvelegemets form, friktion ved enderne og belastningshastighed. Således vil trykstyrken af beton i en konstruktion under de betingelser, der hersker her, afvige fra en ternings trykstyrke, selv om betonkvaliteten er den samme. For eksempel er det velkendt, at en  $15 \times 30$  cm cylinders trykstyrke er ca. tre fjerdedele af en 15 cm ternings. Dette skyldes ikke nogen forskel i betonkvaliteten, ej heller nogen udbøjningsvirkning, men kommer af, at en given trykbelastning frembringer en anden spændingsfordeling i en terning end i en cylinder med samme tværsnitsareal.

I almindelighed vil vilkårene i en konstruktion være sådan, at en given belastning pr. arealenhed af tværsnittet har større sandsynlighed for at medføre brud her end i en terning, og derfor kan en sikkerhedsfaktor på 1,5 til 2 være påkrævet for at opveje virkningen af form, endefriktion og belastningshastighed. Denne margin skal adderes i tilgift til, hvad der kræves for at tage hensyn til mindre gode materialer, overbelastning og lignende eventualiteter.

Prøvebetingelsernes indflydelse på brudlasten ved trykprøven skyldes den udviklede måde, hvorpå prøvestykkerne brydes itu. Forsøg viser, at de første sprækker i betonprøver er parallelle med den anvendte belastnings retning og har karakter af trækbrud [1]. Den last, ved hvilken revnerne indtræffer, afhænger af spændingsfordelingen; de er i terninger blevet opdaget ved ca. 30 procent og i cylindre ved 50 procent af brudlasten. Når først sprækkerne er dannet, ophører alle sædvanlige betragtninger over spændingsanalyse at gælde, og Cowan [2] har gjort opmærksom på, at efter den tid ligner betonen »mere og mere en kornet masse,



hvis styrke beror på indre gnidning«. I brudområdet forbliver den spænding konstant, ved hvilken deformationen fortsætter, og der er en betydelig krumning i arbejdslinien umiddelbart før brud.

Partiklerne nær ved prøvens over- og underside hæmmes af friktionen mellem prøvens endeflader og prøvemaskinens plader i at bevæge sig udad. Det resulterer i, at en pyramideformet eller konisk del af prøven forbliver intakt og fri for revner ved begge ender af prøvestykket; resten af prøven falder væk. Således hæmmer enderne af en cylinder med højde/diameter-forhold på to eller derover kun i ringe grad midterpartiet af prøven i at brydes. Ved kortere prøvelegemer bliver indflydelsen betydelig, og en større last kan modstås. Det skyldes denne virkning, at der i B.S. 1881:1952 er givet omregningstal for skøn over en standardcylinders ækvivalente styrke ud fra iagttagne styrker af cylindre med forskellige forhold mellem højde og diameter.

Selvom trykprøven ikke giver et sandt mål for brudstyrken af beton i konstruktioner, har den vist sig yderst nyttig som middel til at kontrollere kvaliteten af betonen fra blandemaskinen. Den er også nyttig til at sammenligne forskellige betoner og har gjort det muligt at sammensætte blandinger efter deres særlige formål.

Forbedrede metoder til at kontrollere betonkvalitet har fremdraget betydningen af en faktor, som man ikke tidligere havde haft mistanke til, nemlig uensartetheden i prøvemaskinernes virkemåde.

**MASKINER TIL TRYKPRØVNING.** De væsentlige krav til en trykprøvemaskine er, at den udøver en jævnt fordelt belastning på prøvens overflade og at belastningsforøgelsen, eller også prøvens deformationstilvækst, sker på foreskrevet og kontrolleret måde. B.S. 1881 indeholder visse krav, især om en grænse for uregelmæssigheden af prøvers og trykpladers overflader, om tilvejebringelsen af et kuglesæde og om brugen af foreskrevet hastighed for spændingsforøgelsen, men disse krav kan undertiden være utilstrækkelige. Plane flader på prøven, plane trykplader og kuglesæde sikrer ikke nødvendigvis jævnt fordelt last, og i nogle tilfælde har man bemærket, at maskiner, der opfyldte disse krav, frembragte udpræget ujævn belastning. Fejlen fremtræder som en gensidig vinkeldrejning af pladerne, altid i samme retning; prøvens deformation er større ved den ene side end ved den anden, og den iagttagne styrke kan være 10 til 12 procent lavere, end hvis den blev bestemt korrekt. Selv om et kuglesæde til at begynde med tilpasser sig til enhver skævhed mellem de belastede flader,

synes det, som om friktionen under belastningen er for stor til at tillade nogen senere bevægelse. Hvis der således forekommer nogen vridning af maskinen som følge af, at maskinrammen er justeret mangelfuldt eller er usymmetrisk, ophæver kuglesædet ikke virkningen af dette, og der udvikler sig en ujævn belastning.

British Standard foreskriver en konstant hastighed af spændingsforøgelsen på 2.000 lb/sq. in. ( $\approx 146 \text{ kg/cm}^2$ ) pr. minut, men det er ikke let at opnå denne; ej heller er det let at få konstant væksthastighed af deformationen.

I alle hydrauliske maskiner må indstrømningsventilen åbnes gradvist, eller også må pumpehastigheden øges, efterhånden som terningen nærmer sig brud, for at opretholde den foreskrevne hastighed for spændingstilvæksten. Under disse betingelser brydes nogle terninger pludseligt i visse maskiner med et tydeligt endepunkt af arbejdslinien, medens terningerne i andre tilfælde giver efter uafbrudt og opretholder deres maksimumlast, når maskinen ikke længere kan sammentrykke terningen hurtigt nok til at fortsætte spændingsforøgelsen. I sådanne tilfælde falder væksthastigheden for spændingerne forholdsvis langsomt fra den foreskrevne til en negativ værdi, og den optegnede maksimumslast kan afhænge betydeligt af maskinens pumpekapacitet.

#### *Bøjeprøven*

Til vejbelægninger kræves det, at betonen modstår både træk- og trykspændinger, og brud opstår enten under direkte træk eller under bøjning. En direkte trækprøve kan ikke så bekvemt udføres på beton, og det er derfor logisk at bruge bøjeprøven, ved hvilken bjælkerne brydes som følge af trækspændingerne. Brugen af bøjeprøven er endnu ikke udbredt her i landet (i England), og det er usandsynligt, at den bliver almindeligt brugt som kontrolprøve, førend betonforskrifterne fastsætter en mindsteværdi for bøjningsstyrken. I en tidligere artikel [3] er det blevet fremført, at man godt kan indvirke på vejes og startbaners økonomi ved at foreskrive bøjningsstyrken og proportionere betonen herefter, og det blev derfor anbefalet at gøre således.

Betons bøjningsstyrke er et mål for dens trækstyrke, som er en mere karakteristisk egenskab end trykstyrken. Det er lettere at bestemme bøjningsstyrken end den direkte trækstyrke, men den opnåede værdi er omkring ved to gange den sande trækstyrke. Dette skyldes stort set, at

den simple bjælkeformel, som bruges ved beregning af brudstyrken, er baseret på den antagelse, at deformationer og spændinger er proportionale, hvilket ikke gælder for beton. Det er mere ligetil at fortolke resultatet af en bøjeprove end af en trykprøve, men ved fortolkningen optræder nogle problemer, som for en del er blevet drøftet andetsteds [4].

Forholdet mellem prøvelegemets længde og højde påvirker resultatet, eftersom den simple bjælkeformel kun gælder strengt for lange, tynde bjælker, hvorimod man til prøven bruger forholdsvis korte og tykke bjælker. Dette bevirker, at der fremkommer små trækstyrker, når man prøvebelaster bjælker i trediedelspunkterne, og større værdier, når de prøvebelastes på midten. Størrelsen af virkningen kan vurderes ved matematisk spændingsanalyse. Ved midtbelastning går desuden bjælken nødvendigvis itu i eller nær ved midtersnittet, medens den derimod under belastning i trediedelspunkterne kan brydes hvor som helst mellem de to angrebsplaner for belastningen. I mange tilfælde er det svageste snit ikke midtersnittet mellem disse 2 planer, og derfor vil den iagttagne styrke gennemsnitlig være ringere.

Belastningshastigheden har betydelig indflydelse på den iagttagne bøjningsstyrke, som tiltager lineært med logaritmen til hastigheden af belastningsforøgelsen. Grunden til denne virkning er ikke klar, men den hænger utvivlsomt sammen med bruddets mekanik og med krybnings-effekter.

Størrelse af prøvelegemet, belastningsmåde og belastningshastighed er alle standardiseret i B. S. 1881, og dette gør prøven nyttig til sammenligning og kontrol. Almindeligvis vil imidlertid belastningsvilkårene i en konstruktion afvige på flere måder fra dem, der findes i et prøvelegeme, og konstruktionens effektive brudstyrke vil normalt ikke være lig prøvelegemets. Man må erkende, at disse virkninger er til stede, selv om de dækkes af en sikkerhedsfaktor, således som det er tilfældet ved trykstyrkerne.

#### *Den ækvivalente terningprøve*

Der bør nævnes endnu en prøve, nemlig den ækvivalente terningprøve, som er beskrevet i B. S. 1881 og udføres med dele af bjælker, som er blevet prøvet ved bøjning. Prøven gør det muligt at opnå både bøjnings- og trykstyrker af de samme prøvestykker, og på Building Research Station, Road Research Laboratory og andetsteds, har man fundet, at man til praktiske formål får samme resultater af ækvivalente terningprøver som

af prøver med terninger af tilsvarende størrelse. Resultaterne kan variere mere ved de enkelte ækvivalente terningprøver end ved egentlige terningprøver, men sammenligner man to målingsserier, hvoraf den ene omfatter middeltallene for parvist sammenhørende ækvivalente terningprøver på en serie bjælker, medens den anden omfatter trykstyrker af lige så mange enkelte terninger – da finder man mindst standardafvigelse i den første serie.

#### IKKE-DESTRUKTIV PRØVNING

##### *Ultralydimpulsmetoden*

Den metode, der lover bedst for betonprøvning på stedet, er baseret på måling af udbredelseshastigheden af en ultralydimpuls i betonen. Impulsen udbreder sig imellem et par lydtransmissionsled af kvartskrystal, som holdes på modstående flader af en bygningsdel; en modifikation af teknikken bruges, når kun den ene side er tilgængelig. Impulsens udbredelseshastighed, d. v. s. hastigheden af en længdebølge, beregnes ud fra impulsens gennemgangstid og vejlængden mellem krystallerne. Elektronisk udstyr, almindelig teknik og laboratorieanvendelser er blevet beskrevet andetsteds ([1], [5], [6], [7]), og følgende diskussion er forbeholdt anvendelsen deraf til prøvning af beton på stedet.

##### *Længdebølgers hastighed som kriterium for betonkvalitet*

Et grundlag for metoden blev skabt ved at sammenligne længdebølgehastigheden med vedtagne normer for kvalitet såsom tæthed, terningers trykstyrke og bjælkers brudstyrke.

Det er påvist, at hastigheden af længdebølger står i forbindelse med betonstyrken, forudsat at forholdet tilslag/cement, arten af tilslag og vandindholdet forbliver uændrede.

For en speciel slags beton med konstante blandingsforhold kan man nemt opdage forandringer i tæthed eller styrke som følge af varierende komprimering, forskelle i vand/cement-forhold, hærkning eller forvitring.

##### *Anvendelse ved betonprøvning på stedet*

En nøjagtig bestemmelse af betonkvaliteten på stedet kan man kun udlede fra målinger af længdebølgenes hastighed, såfremt man kender betonblandingen i enkeltheder. Der er imidlertid stor forskel mellem lyd-hastigheden i godt komprimeret og i slet komprimeret beton, uanset

sammensætningen, og den slags ydergrænser er lette at opdage. Leslie og Cheesman [8] i Canada har prøvet at inddele området ud fra resultatet af deres prøver på dæmninger. Resultater fra bygninger i Storbritannien har ikke stemt overens med den foreslåede inddeling, og man har fundet, at den mindste lyd hastighed i beton af acceptabel kvalitet varierede kendeligt med betontype og konstruktionstype.

KONSTRUKTIONER. Teknikken er velegnet til at studere variationer i betonkvaliteten i en konstruktion, ud fra variationer i længdebølgernes hastighed. Når f. eks. en del af et bygværk viser synlige tegn på forvitring, opstår spørgsmålet om den øvrige betons holdbarhed. Whitehurst [9] har berettet om den slags prøver, ved hvilke de ubeskadigede betonområder lokaliseredes i et bygværk, som var stærkt forvitret. Andersen og Nerenst [10] har udført lignende prøver, idet de brugte et apparatur med kondensator-kronograf til at studere ødelæggelsen af et betonbygværks overflade efter en ildebrand. Også en af forfatterne (R. Jones) har påvist, hvorledes omdannelse i alcement frembringer beton af varierende kvalitet, når den anbringes i lag, der er tykke nok til at lade en stærk temperaturforøgelse finde sted [7]. Blandt andre anvendelser af impulsteknikken kan nævnes, at man har lokaliseret et rumfang porøs beton i en forspændt bjælke og at man i en tunnel har opdaget beton, som var stærkt ødelagt.

Når man kender betonens blandingsforhold, kan hastigheden af længdebølger give yderligere oplysninger om betonkvaliteten, særlig hvis der findes prøvelegemer fra den gang, betonen blev støbt. Under sådanne gunstige betingelser kan man bestemme den ækvivalente styrke af betonen i bygværket. Man har brugt den forsøgsteknik at måle hastigheden af længdebølger og trykstyrken af terninger, udtaget af den udstøbte beton og prøvet ved forskellige aldre. På denne måde fandt man den grafiske sammenhæng mellem længdebølge-hastigheden og trykstyrken for den virkelige blanding, som blev brugt i bygningen. Efterfølgende målinger af lyd hastigheden i bygværket selv omregnedes til ækvivalent trykstyrke. Denne fremgangsmåde udelukker virkningen af alle faktorer, som påvirker forholdet mellem længdebølge hastigheden og styrken, bortset fra armeringen og fra, at bygværkets beton er udtørret. Armeringen medfører sjældent nogen vanskelighed, eftersom der sædvanligvis findes vej for lydbølgerne direkte gennem betonen undtagen i de sværest armerede konstruktioner. Når man ikke kender beliggenheden af svær

armering, bør krystallerne bevæges trinvis, ca. 2,5 cm ad gangen, så man kan opdage alle systematiske variationer i lyd hastigheden [7].

Fugtighedstabet fra betonen i bygværket forud for prøven udgør en alvorlig vanskelighed, når man skal fortolke hastighedsmålingerne. Ved et forsøg på at overvinde denne vanskelighed lagrede man terningerne under byggepladsforhold, før de blev prøvet. Men dette er ingen tilfredsstillende løsning, eftersom standardprøverne specielt angår vandlagrede terninger, og når man lader terningerne tørre ud, får man noget afvigende resultater [6]. Det er naturligvis muligt at korrigere for betonens udtørring, dersom man kender nedgangen i lyd hastighed. Forsøg tyder på, at virkningen sandsynligvis er ringe, siden nedgangen i lyd hastighed gennem  $80 \times 9,5 \times 9,5$  cm bjælker over en periode på 132 dage androg ca. 1 procent for en blanding med et tilslag/cement-forhold på 4 og et vand/cement-forhold på 0,39, og 4 procent ved tilslag/cement-forholdet 9 og vand/cement-forholdet 0,68 [6]. Et bygværk har sædvanligvis et meget mindre overfladeareal pr. rumfangsenhed end de prøvede bjælker og tørrer derfor langsommere ud.

En nøjagtigere fremgangsmåde, som aldrig er forsøgt i praksis, ville være at stable en tiloversbleven portion terninger op nær ved konstruktionen, så der fås god tilnærmelse til dennes overfladeareal pr. rumfangsenhed. Forholdet mellem lyd hastigheden i vandlagrede terninger, som bruges til kalibrering, og lyd hastigheden i terninger, som lagres under byggepladsvilkår, ville udgøre den faktor, hvormed den i bygværket målte lyd hastighed skulle korrigeres, førend man vurderer den ækvivalente styrke. Såfremt man ikke tager hensyn til, at bygningen tørrer ud, undervurderer man de ækvivalente styrker. Dette forklarer sandsynligvis de resultater, der er fundet i to tilfælde, da terninger, som var skåret ud af bygværker, gav 10 til 15 procent højere trykstyrker, end hvad der var forudsagt ud fra lyd hastighedsmålinger.

Proveresultaterne fra bygværker viser, at forholdet mellem den ækvivalente trykstyrke og trykstyrken af prøveterningerne varierer betydeligt – alt efter forskellige byggemåder. Under velkontrollerede betingelser, hvor betonen komprimeres godt, nærmer dens ækvivalente styrke sig til veludførte prøveterningers. Når kontrollen er ringe og komprimeringen mangelfuld, bliver den udstøbte betons kvalitet betydeligt lavere end prøveterningernes. Resultaterne fra en gennemsnitlig bygningstype gav ækvivalente styrker, der udgjorde fra 36 til 68 procent af prøveterningernes styrke [11].

VEJBELÆGNINGSPLADER AF BETON. Ved at variere afstanden mellem krystallerne kan man bruge ultralydimpulsteknikken til at bestemme både længdebølgehastigheden og pladetykkelsen ved at måle den tid, det tager ultralydimpulsen at nå ned til undersiden, reflekteres og vende tilbage til oversiden. I praksis er metoden svær at anvende, og først efter, at et nyt materiale, bariumtitanat, kunne fås til lydoverføring, har man fået held dertil. Foreløbige resultater har givet en nøjagtighed på ca. 10 procent i tykkelsesmålingen, når pladens underside er nogenlunde jævn. Hvor undersiden er meget ujævn, kommer der ingen veldefineret refleksion, og metoden kan ikke bruges.

En alternativ metode til at bestemme lyd hastigheden alene er at måle den tid, det tager impulsen at bevæge sig en kendt vejlængde langs betonens overflade. Denne metode er ikke tilfredsstillende, fordi målingerne kun vedrører overfladelaget og ikke angiver nogen dybdevariation i komprimeringen. Selv i velkomprimeret beton har målinger med transmissionsled, som holdes lodret mod betonen, givet en uoverensstemmelse på ca. 0-5 procent i forhold til cylindre, udskåret af pladerne. Uoverensstemmelsen synes knyttet til den øvre overflade, men hidtil har man ikke fundet en helt tilfredsstillende forklaring.

En anden prøvemåde, som er under udarbejdelse, grunder sig på udbredelsen af lavfrekvente vibrationer i pladen. En teori for spredningseffekter i en fri plade er givet af Lamb [13], og Pickett [14] har udvidet teorien ved at tage underlaget i betragtning. Der er nu udtænkt en tilfredsstillende forsøgsteknik, og man håber, metoden kan anvendes på plader, der er for ujævne til at måles med ultralydrefleks-teknikken.

#### LITTERATURHENVISNINGER

- [1] Jones, R. A method of studying the formation of cracks in a material subjected to stress. *British Journal of Applied Physics*. 1952. Vol. 3, No. 7. July. pp. 229-232.
- [2] Cowan, H.J. Inelastic deformation of reinforced concrete in relation to ultimate strength. *Engineering*. 1952. Vol. 174, No. 4518. 29th August. pp. 276-278.
- [3] Wright, P.J.F. The design of concrete mixes on the basis of flexural strength. London. Cement and Concrete Association. Symposium on mix design and quality control. May 1954.
- [4] Wright, P.J.F. The effect of the method of test on the flexural strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1952. Vol. 4, No. 11. October. pp. 67-76.

- [5] Gatfield, E.N. An apparatus for determining the velocity of an ultrasonic pulse in engineering materials. *Electronic Engineering*. 1952. Vol. 24, No. 295. September. pp. 390-395.
- [6] Jones, R. The non-destructive testing of concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1949. Vol. 1, No. 2. June. pp. 67-78.
- [7] Jones, R. Testing of concrete by ultrasonic-pulse technique. Washington. *Proceedings of the Highway Research Board*. 32nd annual meeting. 1953. Vol. 32. pp. 258-275.
- [8] Leslie, J. R. and Cheesman, W. J. An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures. *Journal of the American Concrete Institute*. 1949. Vol. 21. No. 1. September. pp. 17-36.
- [9] Whitehurst, E.A. Soniscope tests concrete structures. *Journal of the American Concrete Institute*. 1951. Vol. 22. No. 6. February. pp. 433-444.
- [10] Andersen, J. and Nerenst, P. Wave velocity in concrete. *Journal of the American Concrete Institute*. 1952. Vol. 23. No. 8. April. pp. 613-635.
- [11] Jones, R. Testing the quality of concrete in a thick wall. *Concrete and Constructional Engineering*. 1950. Vol. 45, No. 11. November. pp. 391-394.
- [12] Bradfield, G. and Woodroffe, E.P.H. Determination of thickness of concrete pavements using mechanical waves. Department of Scientific and Industrial Research. National Physical Laboratory Report. No. Phys./U5. 1953. February. pp. 6.
- [13] Lamb, H. On waves in an elastic plate. *Proceedings of the Royal Society*. 1917. Series A. Vol. 93, No. 648. 1st March. pp. 114-128.
- [14] Pickett, G. Dynamic testing of pavements. *Journal of the American Concrete Institute*. 1945. Vol. 16, No. 5. April. pp. 473-489.