

Særtrykk av «Betongen Idag», nr. 4, 1955.

Sandens korngradering og mørtelfasthet.

Sivilingeniør Henry Hansen, Norges byggforskningsinstitutt.

1. Innledning.

Norges byggforskningsinstitutt har i samarbeide med Direktoratet for økonomisk forsvarsberedskap foretatt en undersøkelse av norske sandtak for å se hvordan sanden egnet seg til fremstilling av betong og mørtel. For de fleste sandtaks vedkommende måtte man nøye seg med følgende undersøkelse:

Sikteanalyse.

Humusprøve.

Romvekt av tørr sammenpresset sand.

Slaminhold.

For en del sandsorters vedkommende ble det også foretatt mørtelprøver. Disse prøver ble foretatt i overensstemmelse med forskriftene i NS 429. Fastheten ble kun prøvet etter 28 døgns lagring, da man anså 7-døgnsfastheten for å være av mindre betydning for den undersøkelse det her dreiet seg om. Sandprøvningen ble utført ved flere forskjellige laboratorier, og det foreligger således også mørtelprøver fra forskjellige laboratorier.

ex 4 1/2cc

Da det imidlertid ved de fleste sandtak var nødvendig å foreta en bedømmelse av sandens brukbarhet til betong bare på basis av de fire innledningsvis nevnte undersøkelser, ble man stilt overfor problemet hvordan disse fire faktorer innvirker på betongfastheten. Man hadde imidlertid et ganske stort materiale med mørtelprøver, og det var da nærliggende at man ved hjelp av disse søkte å finne frem til generelle regler for hvordan betongfastheten avhang av sandens egenskaper. Det spørsmål man i første omgang stilte seg var da følgende: Kan en sands mørtelfasthet forutsies når man kjenner sandens kornfordelingskurve. Kunne man komme frem til et noenlunde fornuftig resultat her, så ville man lettere kunne unnvære mørtelprøvene. Man hadde dessuten det håp at undersøkelsene ville gi et bedre innblikk i hvordan sandens egenskaper influerte på betongfastheten.

2. *Prøvene som undersøkelsen bygger på.*

Av de mørtelprøver man hadde til disposisjon måtte man foreta et utvalg. Det viste seg nemlig at en del av mørtelprøvene ikke kunne tas med da man manglet oppgave over hvilken cementkvalitet som var brukt ved prøvene. Videre tok man ikke med i undersøkelsen de sandsorter som hadde en humusreaksjon «gul» eller mørkere. Virkningen av humus på mørtel er jo velkjent og det gjaldt derfor å rendyrke prøvematerialet mest mulig. Mange vil kanskje mene at det var en unødig streng fordring at sand med humusreaksjonen «gul» ikke ble tatt med, men det viste seg at i mange tilfelle vil også en slik humusreaksjon virke noe nedsettende på fastheten. Endelig kan nevnes at man bare tok med i undersøkelsen prøver som var utført ved ett laboratorium (Veglaboratoriet, da dette hadde utført det overveiende antall mørtelprøver), for på denne måten å eliminere virkningen av en eventuell forskjellig prøveteknikk.

Det utsorterte materiale omfattet da 55 sandsorter. Av disse 55 sandsortene hadde man 53 mørtelprøver i blandingsforholdet 1 : 3 og 35 prøver i blandingsforholdet 1 : 5, altså i alt 88 mørtelprøver. Når det gjaldt undersøkelse av mørtelens vannbehov omfattet undersøkelsen i alt 95 prøver, idet det her var tatt med noen sandsorter med humusreaksjonen «gul».

3. Mørtelfasthetens avhengighet av $\frac{c}{v}$ og andre faktorer.

For mørtel og betong finnes det et utall formler som angir sammenhengen mellom $\frac{c}{v}$ og fastheten. De mest kjente formler er:

Ferets formel
$$\sigma = \frac{A}{\left(1 + 3, 1 \frac{v}{c}\right)^n}$$
 (man angir ofte $n = 2,5$ for norsk cement)

Abrams formel
$$\sigma = A : B \frac{v}{c}$$

Grafs formel
$$\sigma = K : 8 \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

Bolomeys eller
Lyses formel
$$\sigma = A + B \frac{c}{v}$$

For denne undersøkelse har man valgt å bruke den enkleste av formlene, Bolomeys eller Lyses formel.

$$(1) \quad \sigma = A + B \frac{c}{v}$$

Til denne formel knyttes det vanlig den betingelse at konstantene A og B er avhengig av tilslagsmaterialet og cementkvaliteten. Da formålet med undersøkelsen nettopp var å unngå å foreta en mørtelprøve, måtte man her forutsette at A og B var uavhengig av tilslaget. De konstantene A og B man fant måtte gjelde for alle sandsorter. Hvor riktig denne forutsetning er vil, som vi senere skal se, vise seg i hvor nøyaktig formel (1) uttrykker de virkelige mørtelfastheter.

De mørtelprøver som ble foretatt strakte seg over et helt år, og i løpet av denne tiden ble det brukt i alt 10 forskjellige cementpartier til prøvene. Selv om all cement var norsk portlandcement, viste det seg at cementfastheten varierte betraktelig

fra parti til parti. Cementen ble her ikke prøvet etter den standardiserte prøvemethode, men etter en metode som brukes ved Veglaboratoriet. Ved denne prøvemethode lages cementprøvene i blandingen 1 del cement og 3 deler normalisert sveltvisk-sand, og man bruker en konstant vannmengde slik at man får

$\frac{v}{c} = 0,45 = \text{konstant}$. Resultatet av cementprøvene var at fastheten varierte fra 360 kg/cm² til 545,5 kg/cm². Dette var en uventet stor variasjon. Det er klart at resultatet av en mørtelprøve ikke kunne bli upåvirket av om man brukte en cement med fastheten 360 kg/cm² eller en med fastheten 545,5 kg/cm². Det ble derfor valgt å operere med korrigerede mørtelfastheter etter formelen

$$(2) \quad \sigma = \frac{\sigma_{\text{mørtel}} \cdot 400}{\sigma_{\text{cement}}}$$

Denne formel er analog med den beregningsmåte som foreskrives i NS 429 § 15.2, idet man rent vilkårlig fastsatte 400 kg/cm² som cementens normfasthet. (Da man nyttet en prøvemethode for cementen som ikke var standardisert, kunne man ikke bruke de standardiserte minimumsfastheter for cementen som normfasthet.) Skulle ligning (2) helt eliminere virkning av de forskjellige cementkvaliteter, så måtte ligningen for mørtelfastheten

kunne skrives med formelen $\sigma_{\text{mørtel}} = k(A + B\frac{c}{v})$ hvor k var den eneste konstant som var avhengig av cementen. Meget tyder imidlertid på at sammenhengen mellom cementkvalitet og mørtelfasthet ikke er så enkel som angitt ovenfor, og at vi dermed ikke har eliminert virkningen av forskjellig cementkvalitet helt ved hjelp av ligning (2). Svenske forsøk tyder på at det er vesentlig konstanten A som påvirkes av cementkvaliteten (1). Da man i det foreliggende prøvemateriale har brukt cementser med høyst varierende fasthetstall, vil dette bevirke at vi får en dårligere sammenheng mellom σ og $\frac{c}{v}$ enn vi ville ha fått om vi hadde nyttet en cementkvalitet til samtlige prøver. Man må imidlertid ikke glemme at selv om man foretar en

og c/v . Den korrelasjon man her får mellom c/v og σ kan således ikke skyldes varierende cementmengde. Man må med utgangspunkt i ligningene (3) og (4) kunne si at det er en sammenheng mellom c/v og σ .

Man kan også anta at selve prøvemethoden, altså bestemmelsen av σ er så unøyaktig at den nedsetter verdien på korrelasjonskoeffisienten vesentlig. Det er jo klart at en stor prøveteknisk feil vil ødelegge enhver lovmessighet. En nærmere undersøkelse av dette forhold viser at den prøvetekniske spredning her er ubetydelig i sammenligning med de andre unøyaktigheter.

Det er ganske nærliggende å forsøke å få frem en forbedret ligning for σ ved å ta hensyn til sandens kornkurve. Skal ikke ligningen for σ bli for innviklet, må man nøye seg med 2 uavhengig variable. Det gjelder således å kunne uttrykke det karakteristiske ved kornkurven med et enkelt tall, og her har man mange muligheter å velge mellom.

Det første man kanskje tenker på er at fillerinnholdet må være en karakteristisk egenskap ved sanden. Vi vil her med fillerinnholdet F forstå den sandmengde som passerer Tylersikt nr. 200. Vi kan da anta at følgende ligning gjelder:

$$(6) \quad \sigma = A + B \frac{c}{v} + C \frac{F}{v}$$

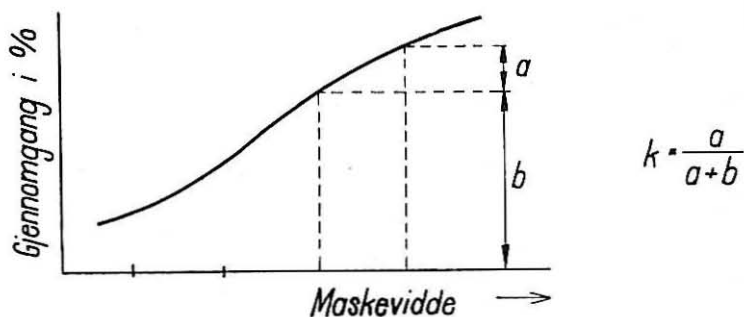


Fig. 1 Definisjon av Weymouth's tall.

Man kan også tenke seg at det såkalte Weymouths tall [1]k kunne karakterisere kornkruven. Definisjonen av dette tall er angitt på fig. 1.

Ved opptegning av kurven må man også ta hensyn til cementen, slik at det er for cement-sandblandingen man beregner tallet k . Egentlig skulle man også ha tatt hensyn til blandevannet, når man beregnet k , men dette er lite praktisk da det vil komplisere regningen. Man har derfor valgt å beregne k av cement-sandblandingen.

Den kurve man tegner opp for å beregne k skulle egentlig være en kurve som anga de enkelte siktefraksjoners absolutte volum, men da alle sandfraksjoner har samme spesifikke vekt, kan man like godt regne i vekt. For cementens vedkommende kan man da ikke regne med dennes vekt c , men må innføre

en korrigert vekt $c \cdot \frac{2,65}{3,1}$. Når man foretar en slik beregning av k -verdier, så vil man for hver maskevidde få en verdi på k . Da man må karakterisere kornkurven med ett bestemt tall, så er man nødt til å velge en bestemt av disse k -verdiene. Det vi nedenfor har kalt k er den maksimale k -verdi.

Man kan nå anta at følgende ligning gjelder:

$$(7) \quad \sigma = A + B \frac{c}{v} + Ck^2$$

$$(8) \quad \sigma = A + B \frac{c}{v} + Ck^3$$

Av disse tre ligninger (6, 7 og 8) viste det seg at bare ligning (7) ga et noenlunde antagelig resultat. Her fikk man

$$(9) \quad \sigma = -45 + 211 \frac{c}{v} - 170k^2$$

$$n = 88 \quad r = 0,94 \quad r_p = -0,28$$

Her er r_p den partielle korrelasjonskoeffisient mellom σ og k^2 . Som man ser av korrelasjonskoeffisienten r , så er denne formel noe nøyaktigere enn formel (5). Det man vinner i nøyaktighet ved å bruke den mere kompliserte formel (9) i forhold til formel (5), er imidlertid så lite at det knapt er bryet verdt. Man må også huske på at formel (9) er en rent empirisk formel som

ikke er begrunnet teoretisk. Skal man summere opp årsakene til at formel (5) og formel (9) ikke er blitt mere nøyaktige enn de er, kommer man til følgende:

- a) Virkningen av de forskjellige cementkvaliteter er ikke helt eliminert i og med at mørtelfastheten er korrigerert ved ligning (2). Var virkningen av cementkvaliteten eliminert, så skulle når vi betrakter en del mørtelprøver støpt av samme cement, den beregningsmessige fasthet snart ligge over, snart under den virkelige fasthet. Det viser seg imidlertid at for enkelte cementkvaliteter ligger den beregningsmessige fasthet overveieende over den virkelige, for andre cementkvaliteter ligger den overveieende under.
- b) Sandens kornform vil ofte øve en ganske stor innflytelse på mørtelfastheten. Særlig synes sand som består av skifrige korn å få en lav mørtelfasthet. Dessverre finnes det ingen enkel metode som kan gi et tallmessig uttrykk for sandens skifrihet. Det er mulig at man ved å sikte sanden gjennom et stavsikt kan få brukbare resultater, men denne metode ble ikke anvendt i denne undersøkelse.
- c) Sandens kornkurve. Selv om man har forsøkt å ta hensyn til karakteristiske trekk ved sandens kornkurve slik som det er gjort i ligningene (6), (7) og (8), så kan man ikke utelukke at det kan finnes andre karakteristiske tall hos kornkurven enn de som er brukt her, som vil gi et bedre resultat enn det vi er kommet til. Det heter jo at i formel (1) så er A og B avhengig av tilslagsmaterialet. I og med formel (9) så har man latt A variere med tilslagsmateriale, mens B fremdeles er holdt konstant for alle sandsortene.

4. Mørtelens vannbehov.

For å kunne beregne mørtelfastheten etter formel (5) må man kjenne $\frac{c}{v}$ og for å kunne beregne $\frac{c}{v}$ må man kjenne mørtelens vannbehov. Da mørtelen ved mørtelprøver alltid skal ha samme konsistens, må vannbehovet kun være avhengig av sandens egenskaper.

På tross av at mørtelens konsistens er gitt i forskriftene, vil nok denne variere en del fra prøve til prøve. Dette skyldes i første rekke at de målemetoder man bruker (slumpmål ved hjelp av den lille slumpkonus) er nokså unøyaktige. Dessuten kan det ved grove sandsorter og magre blandinger ofte være vanskelig i det hele tatt å få til det slumpmål som er angitt i standarden, idet blandingen har lett for å separere.

På grunnlag av mørtelprøvene ble vannforbruket pr. m³ mørtel utregnet. Ved denne beregning ble det forutsatt at det ikke var noe luft i mørtelen.

Mørtelens vannbehov V kg/m³ ble så satt som en funksjon av sandens finhetsmodul og den foran nevnte kvotient k . Man stilte opp følgende ligninger:

$$(10) \quad V = A + B \cdot FM$$

$$(11) \quad V = A + B \cdot FM + Ck^2$$

$$(12) \quad V = A + B \cdot FM + Ck^3$$

Etter at koeffisientene var bestemt ved de minste kvadraters metode, fikk man følgende ligninger:

Blanding 1 : 3

$$(13) \quad \begin{aligned} V &= 382 - 25,6 FM \\ n &= 58 \quad r = -0,755 \end{aligned}$$

$$(14) \quad \begin{aligned} V &= 351 - 21,7 FM + 120k^2 \\ n &= 58 \quad r_p = -0,578 \quad r = 0,925 \end{aligned}$$

$$(15) \quad \begin{aligned} V &= 360 - 22,3 FM + 176,5k^3 \\ n &= 58 \quad r_p = -0,53 \quad r = 0,79 \end{aligned}$$

Blanding 1 : 5

$$(16) \quad \begin{aligned} V &= 402 - 26,3 FM \\ n &= 37 \quad r = -0,587 \end{aligned}$$

$$(17) \quad V = 354 - 22,3 FM + 150k^2$$

$$n = 37 \quad r_p = 0,460 \quad r = 0,71$$

$$(18) \quad V = 380 - 24,9 FM + 130k^3$$

$$n = 37 \quad r_p = 0,350 \quad r = 0,635$$

Blanding 1 : 3 og 1 : 5

$$(19) \quad V = 390 - 25,9 FM$$

$$n = 95 \quad r = 0,607$$

$$(20) \quad V = 340,5 - 21,3 FM + 184 k^2$$

$$n = 95 \quad r_p = 0,75 \quad r = 0,82$$

$$(21) \quad V = 365 - 23,1 FM + 179 k^3$$

$$n = 95 \quad r_p = 0,542 \quad r = 0,745$$

Vi ser her at man ved å bruke 2 uavhengige variable FM og k^2 får et noenlunde brukbart resultat.

Som ventet er det blanding 1 : 5 som har gitt det dårligste resultat. Sluppmålet for de enkelte blandinger er ikke angitt i prøverapporten, men man må anta at for enkelte grove sandsorter har det i blanding 1 : 5 vært vanskelig å oppnå det foreskrevne sluppmål p.g.a. separasjon.

5. Beregning av mørtelfastheten.

Skal man på grunnlag av ovenstående beregne sandens mørtelfasthet på basis av sandens kornkurve, blir fremgangsmåten følgende:

Av kornkurven beregner man finhetsmodulen FM og Weymouth's tall k. Man bestemmer så mørtelens vannbehov etter ligningen

$$V = 340,5 - 21,3 FM + 184 k^2$$

Dette vannbehov gjelder da for en mørtel med den konsistens som Norsk standard foreskriver.

For en mørtel uten luft kan man for blandingsforholdet 1 : 3 sette opp ligningen

$$1000 = \frac{c}{3,1} + \frac{3c}{2,65} + v$$

$$1000 - v = c \left(\frac{1}{3,1} + \frac{3}{2,65} \right) = c \cdot 1,452$$

$$\frac{c}{v} = \frac{\frac{1000}{v} - 1}{1,452}$$

Tilsvarende kan $\frac{c}{v}$ for blandingsforholdet 1 : 5 finnes. Når man nå har funnet $\frac{c}{v}$ kan σ finnes av ligningen:

$$\sigma = -108 + 233,5 \frac{c}{v}$$

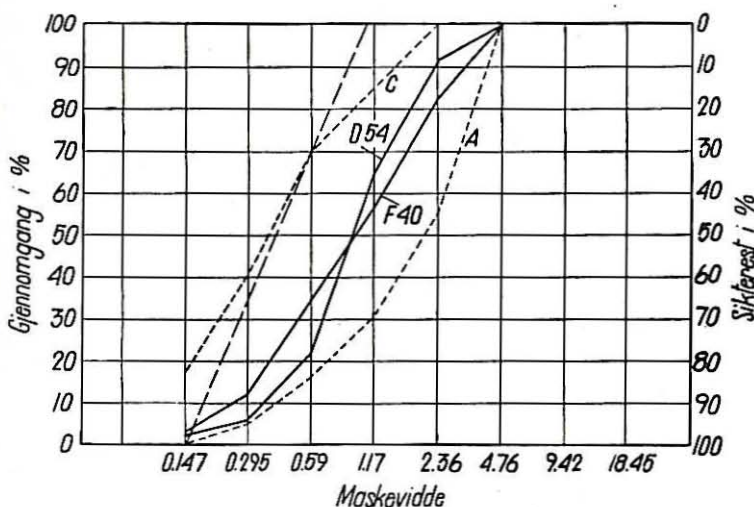


Fig. 2 D 54 og F 40 har samme finhetsmodul (grovhetsstall).

Brukes en cement til mørtelprøven som har et fasthetstall som avviker fra 400 kg/cm² (fasthetstallet refererer seg her til den foran beskrevne cementprøvemethode) så finnes mørtelfastheten

$$\sigma_{\text{mørtel}} = \frac{\sigma_{\text{cement}}}{400} \cdot \sigma$$

For nærmere å belyse anvendelsen av de foranstående formler, vil vi regne gjennom et eksempel med 2 sandsorter som har den samme finhetsmodul (grovhetstall). Kornkurvene for de 2 sandsorter F40 og D54 er gjengitt på fig. 2.

Dataene for de 2 sandsorter er:

D54	F40
FM = 3,14	FM = 3,14
k = 0,472	k = 0,349
k ² = 0,22	k ² = 0,12

Mørtelprøven i blanding 1 : 3 ga følgende resultat:

D54	F40
$\sigma^* = 193$	$\sigma^* = 271$
c/v = 1,51	c/v = 1,63
V = 313	V = 298

Bruker man nå de formlene som er utviklet foran, fåes

$$D \ 54 \quad V = 340,5 - 21,3 \cdot 3,14 + 184 \cdot 0,22 = \underline{\underline{314 \text{ kg/m}^3}}$$

$$\frac{c}{v} = \frac{\frac{1000}{314} - 1}{1,452} = \underline{\underline{1,50}}$$

$$\sigma = -108 + 233,5 \cdot 1,50 = \underline{\underline{242 \text{ kg/cm}^2}}$$

* Dette er verdier som er korrigert for cementkvalitetens innflytelse etter formel (2).

$$F \ 40 \quad V = 340,5 - 21,3 \cdot 3,14 + 184 \cdot 0,12 = 295,8 \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{c}{v} = \frac{\frac{1000}{295,8} - 1}{1,452} = \underline{1,64}$$

$$\sigma = -108 + 233,5 \cdot 1,64 = 275 \text{ kg/cm}^2$$

Vi ser således at det utregnede vannbehov stemmer ganske bra, mens den utregnede trykkfasthet for D54 er blitt noe for høy. Hva som er årsak til den dårlige mørtelfasthet for D54 har ikke kunnet bringes på det rene. Det eneste som avviker noe fra det normale for denne sandsort er at den har noe liten romvekt og følgelig stort porevolum.

6. Konklusjon.

Som man ser av foregående er de funne formler en del unøyaktige, og det er særlig formel (5) som uttrykker sammenhengen mellom c/v og mørtelfastheten som er utilfredsstillende. Skal man kunne skaffe seg noen bedre formel for mørtelens trykkfasthet, synes det som om det er nødvendig å ta hensyn til følgende:

- a) Sandens kornform. Man må her søke å utvikle en prøvemethode som gir et tallmessig uttrykk for sandkornenes skifrighet. Det er også kjent at sand med nåleformede korn gir en dårlig mørtelfasthet, så en eventuell prøvemethode må også gi utslag for slike korn. Inntil en slik prøvemethode foreligger, må man nøye seg med en skjønnsmessig bedømmelse av sanden på dette punkt.
- b) Cementkvalitetens innflytelse. Det ser ut som at skal man kunne eliminere virkningen av de forskjellige cementkvaliteter, så må cementprøvingen foregå med et c/v forhold som ligger i nærheten av det man bruker ved mørtelprøvene.
- c) Konsistensmålingene ved mørtelprøver synes å være noe unøyaktige. Særlig vil vel denne unøyaktighet ved konsistens-

målingen gjøre seg gjeldende når man skal sammenligne prøver fra forskjellige laboratorier. En bedre metode her vil gi bedre jevnførbare resultater.

Etter dette er det klart at det ikke har lykket helt å erstatte mørtelprøven med en ren beregning på grunnlag av sandens kornkurve. Man må imidlertid være klar over at de unøyaktigheter som kommer av de under b) Cementkvalitetens innflytelse, nevnte årsaker heller ikke lar seg fjerne ved en mørtelprøve. Når det gjelder virkningen av eventuell humus i sanden, er jo også mørtelprøven den sikreste indikator. Skal man overføre de funne resultater til betong, må man gå ut fra at de samme lovmessigheter som er funnet ved mørtel også gjelder for betong (de funne formler kan selvsagt ikke brukes uten videre). I betong består tilslaget av en blanding av sand og singel (eller pukk). Det er klart at man ved slik blanding kan regulere tilslagets finhetsmodul innen vide grenser. Det er gunstig at finhetsmodulen er så høy som mulig. Imidlertid må man passe på å ikke blande så mye grovt materiale i tilslaget at k blir for stor, da dette vil gjøre blandingen trå og følgelig vannkrevende. Ved en gitt sand og en gitt singel er det alltid et bestemt blandingsforhold mellom disse som gir det gunstigste tilslag.

Når man har en sand og skal bedømme hvordan denne er egnet til betongfremstilling, skal man se mere på hvilken k -verdi sanden har enn på hvilken finhetsmodul den har. Tilslagets finhetsmodul lar seg innen visse grenser regulere ved å tilsette mere eller mindre singel, mens tilslagets k -verdi som regel kun lar seg regulere ved å tilsette mere cement eller filler. Man ser videre at jo magrere en blanding blir, desto mere kritisk blir sandens k -verdi. Det har vært kjent at filler virker gunstig i magre betongblandinger. Etter det som er anført foran ser det ut som det ikke er filleren i seg selv som virker gunstig, men filleren virker indirekte gunstig i og med at den forbedrer sandens k -tall. (I meget ustabile blandinger virker selvsagt filleren i seg selv gunstig i og med at den hindrer separasjon.) Et gunstig tilslagsmateriale for betong skulle etter dette ha en kornkurve som var slik at cement-sand-singel-blanding hadde tilnærmet den samme k -verdi for alle sikt.

Hvis kornkurven inneholder kornsprang, så må ovenstående modifieres, idet den k-verdi man beregner for sikten umiddelbart etter kan være større enn om kornspranget ikke hadde vært [2].

Litteraturfortegnelse.

- [1] Hellström, Bo, Hjalmar Granholm og Axel Erikson. Betong. Stockholm, 1945.
- [2] Plum, Niels. The Predetermination of Water Requirement and optimum Grading of Concrete. Copenhagen, 1950.

S u m m a r y.

A statistical study of the correlation between mortar strength and c/w has been made based on a series of mortar tests. It was concluded that this correlation may be expressed by the formula $\sigma \text{ kg/cm}^2 = -108 - 233.5(c/w) \pm 30$. The water content of the mortar is given by the regressing equation:

$$V \text{ kg/m}^3 = 340.5 - 21.3 FM + 184 k^2,$$

where k is further defined in the article. It appears that a number of factors, such as the quality of the cement, the shape of the sand particles and possibly certain features of the grading curve which have not been considered in the above equations, considerably effect the strength of the mortar. As a result there is a slight inaccuracy in the above equations.
