

INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **117**

N.-O. HILBERT

**HULRUMSDIAGRAMMER
FOR TØRBLANDINGER
AF BETONMATERIALER**

Den polytekniske Lærestalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1976

FORORD

Mit arbejde med betonproportionering hovedsagelig på en betonelementfabrik har givet en række erfaringer vedr. tilslagsmaterialernes og blandingsforholdets betydning for betonens bearbejdelighed, styrke og elasticitetsmodul.

En erfaring er, at der er en øvre grænse for, hvor mange sten en beton må indeholde for at betonens bearbejdelighed skal være i orden.

Denne øvre grænse kan for forskellige stenmaterialer bestemmes ud fra prøveblandinger, men den kan ikke aflæses af materialernes kornkurver.

En anden erfaring er, at man med fastholdt stenmængde kan variere sand/cement-forholdet indenfor vide grænser, uden at betonens vandbehov ændres væsentligt.

Dette proportioneringsprincip gav to fordele. For det første, blev trykstyrken en retliniet funktion af cementmængden, og for det andet, blev betonens elasticitetsmodul konstant for beton med samme tilslagsmateriale og samme stenmængde.

Sandets egenskaber afgjorde, hvilke ydergrænser for sand/cement-forholdet der kunne anvendes.

De ovennævnte linearitetsfænomener åbner mulighed for såvel at udvikle en rationel proportioneringsteknik, som for en sikre forudsigelse af betonens egenskaber.

På denne baggrund har jeg taget hulrumsdiagrammer op til ny behandling, i håbet om, at disse diagrammer kan afspejle gylighedsområdet for mine erfaringsresultater.

Rapporten skal ses som et indledende arbejde, hvor konstruktion og anvendelse af hulrumsdiagrammer er behandlet tillige med en ny målemetode til bestemmelse af tørblandingers hulrumsindhold.

Den beskrevne målemetode er udviklet i forbindelse med mine undersøgelser af vacuumpakning af tørblandet cementmørtel. Disse undersøgelser indgår i instituttets projekt "Momentstive samlinger mellem præfabrikerede jernbetonbjælker og/eller -søjler", hvortil der er modtaget støtte fra Statens teknisk-videnskabelige Forskningsråd.

Instituttet for Husbygning
september 1976
N.-O. Hilbert

INDHOLD

SIDE

FORORD	I
INDHOLD	III
SYMBOLLISTE	IV
INDLEDNING	1
1.VACUUMMETODE TIL MÅLING AF HULRUMSINDHOLD	2
1.1 Fremstilling af vacuum- pakkede prøver	2
1.2 Vacuummetodens måledata	3
1.3 Hulrumsdiagrammers koordinater	4
1.4 Analyse af hulrumskurver	5
2.EKSEMPLER PÅ HULRUMSDIAGRAMMER	7
2.1 Eksempel 1: Hulrumsdiagram for blandinger af portlandscement og finharpet søsand.	7
2.2 Eksempel 2: Hulrumsdiagram for blandinger af rapidcement,fin- harpet søsand og søperlesten	11
2.3 Kornkurver for de tilslagsmate- rialer,der er anvendt i eksempel 1 og 2.	16
3.BETONPROPORTIONERING VED HJÆLP AF ET HULRUMSDIAGRAM	17
3.1 Beregning af delmængder ud- fra et hulrumsdiagramms koordi- nater	17
3.2 Betonproportionering udfra hul- rumsdiagrammet i eksempel 2.	18
4.AFSLUTTENDE BEMÆRKNINGER	20
5.LITTERATUR	21

SYMBOLLISTE

C	=	Prøvens cementmængde	(g)
S	=	Prøvens sandmængde	(g)
St	=	Prøvens stenmængde	(g)
P ₁	=	Prøvens vægt ekskl.pose	(g)
P ₂	=	Prøvens vægt under vand inkl.pose	(g)
P ₃	=	Opdrift på prøvens hulrumsvolumen	(g)
P _p	=	Plastposens vægt	(g)
V _t	=	Prøvens totalvolumen	(cm ³)
V _v	=	Prøvens hulrumsvolumen	(cm ³)
γ	=	Vægt pr. volumenenhed faststof	(g/cm ³)
v	=	$\frac{1}{\gamma}$ = Faststofvolumen pr. vægtenhed	(cm ³ /g)

Index til γ og v:

c for cement

p for plastpose

s for sand

st for sten

α_c og α_s = faktorer defineret ved

$$V_v = \alpha_c C v_c + \alpha_s S v_s$$

$$k = \frac{S v_s}{C v_c}$$

INDLEDNING

I denne rapport beskrives hulrumdiagrammer for tørblandinger af cement og tilslagsmaterialer, og en vacuummetode til måling af hulrumsindhold.

Bestemmelsen af tørblandingers hulrum sker normalt ved beregning udfra vægten af et bestemt volumen stampet tørblending og delmaterialernes massefylde.

I rapporten beskrives en vacuummetode, hvorved hulrumsindholdet bestemmes som følger:

En plastpose fyldes med en tørblending og anbringes i et vacuumkammer, hvor luften pumpes ud, hvorefter posen lukkes lufttæt. Når prøven tages ud af kammeret, presses posen sammen omkring prøven, som derved komprimeres med et ydre tryk på ca. 1 atm..

Prøven vejes nu over og under vand, hvorved vægt og rumfang bestemmes.

Der stikkes hul på posen under vand, hvorved der trænger vand ind i prøvens hulrum, og hulrumsvolumet måles som formindskelsen af opdriften på prøven.

Vacuummetodens fordele fremfor den gængse volumenmetode er, at den er hurtigere, hulrumsindholdet måles direkte, og prøvernes komprimering er reproducerbar.

Vacuummetoden kræver imidlertid et bekosteligt udstyr, en vacuumpakkemaskine koster ca. 15.000 kr. Metoden kan derfor kun komme på tale, hvor der skal udføres hulrumsbestemmelser i stort omfang.

1. VACUUMMETODE TIL MÅLING AF HULRUMSINDHOLD

1.1. Fremstilling af vacuumpakkede prøver

Til fremstilling af prøverne skal der bruges en vacuumpakkemaskine. En sådan maskine kan svejse en plastpose lufttæt sammen inde i et kammer med vacuum. Ved hjælp af maskinen kan man således få en lukket pose med f.eks. cement + sand, hvori lufttrykket er meget lavt.

Vacuumpakkemaskiner fremstilles til vacuumpakning af levnedsmidler. Til forsøgene her er anvendt en maskine med gennemsigtigt akryllåg og en pumpeydelse på 28 m³/time. Til måling af vacuumet i maskinens kammer er der anvendt et Leybold vacuummeter, type Diavac normal.

Vacuumpakkemaskiner kan normalt etablere 99,6% vacuum i kammeret, d.v.s. 0,4% af 760 Torr = 3 Torr. Ved forsøgene er poserne lukket ved et tryk på 3 Torr.

Plastposer til vacuumpakning fremstilles af plastlaminat i mange størrelser. Til forsøgene er anvendt en posestørrelse på 130 x 230 mm af laminat 70 µm polyethylen indvendig og 20 µm nylon udvendig. Idet massefylden af polyethylen er 0,92 g/cm³ og massefylden af nylon er 1,15 g/cm³, bliver posens massefylde

$$\gamma_p = \frac{0,92 \cdot 70 + 1,15 \cdot 20}{90} = 0,97 \text{ g/cm}^3$$

$$v_p = \frac{1}{0,97} = 1,03 \text{ cm}^3/\text{g} \approx 1.0 \text{ cm}^3/\text{g}.$$

Vacuumpakning af tørblandinger. Under etableringen af vacuum i prøven skal posen stå skråt, ca. 45°, for at fine partikler ikke skal trækkes ud med luften. Desuden skal materialerne være helt tørre, fordi trykket passerer mættede vanddampes tryk ved 20°C (17 Torr).

Selv med 0,5% fugt i sandet flyver sandet ud af posen, når koetrykket passerer.

Den her anvendte posestørrelse kan rumme ca. 400 cm³ store prøver.

Eksempel på trykforholdene i en prøve.

Prøvestørrelse	400 cm ³	hulrum	25%
Posevolumen	600 cm ³	lukket ved	3 Torr

Tilstand i lukkeøjeblikket:

Luftvolumen: $600 - 400 + 100 = 300 \text{ cm}^3$
 Tryk : 3 Torr

Tilstand ved normaltryk udvendig:

Luftvolumen: 100 cm^3
 Tryk : $\frac{300}{100} \cdot 3 \text{ Torr} = 9 \text{ Torr}$

Det udvendige tryk til komprimering af prøven er:

$$\text{ca. } \frac{760 - 9}{760} = 0,99 \text{ atm} \approx 0,1 \text{ MN/m}^2$$

Da posen lukkes ved et tryk på 3 Torr, vil der efter vandindtrængningen være en lille luftrest.

Luftrestens volumen ved normaltryk er:

$$\frac{3}{760} 300 = 1,2 \text{ cm}^3$$

Metodens fejlkilder

Der skulle efter ovenstående være en systematisk fejl i hulrumsbestemmelsen på 1,2%. Denne fejl er ikke verificeret på anden måde, og fejlen er muligvis noget mindre idet luftrestens vanddampindhold vil kondensere. Visuelt observeres der ingen luftrest ved vandindtrængningens afslutning.

Et andet forhold er, at hulrumsmålingen medtager hulrum i porøse korn.

Metodens tilfældige fejl er udregnet i eksempel 1, hvor spredningen på middelværdien af 3 uafhængige bestemmelser af hulrumsindholdet ligger mellem 1,1 og 3,4%. Denne fejl skyldes hovedsagelig uens blanding.

1.2 Vacuummetodens måledata

Udfra de vacuumpakkede prøver bestemmes følgende data ved vejning over og under vand:

P_p (g) = Posens vægt

$P_1 + P_p$ (g) = Vægt af prøve inkl. pose

P_2 (g) = Vægt af prøven under vand

P_3 (g) = Vægt af det vand, der erstatter prøvens hulrum, når der under vand stikkes hul i posen.
 P_3 måles direkte som opdriftsformindskelsen ved vandindtrængningen.

Udfra disse data kan følgende størrelser beregnes:

$$\text{Prøvens vægt} = (P_1 + P_p) - P_p = P_1$$

Volumen af prøve + pose:

$$(P_1 + P_p - P_2) v_v = P_p v_p + V_t$$

Prøvens volumen =

$$V_t = [P_1 - P_2 + P_p \left(1 - \frac{v_p}{v_v}\right)] v_v$$

$$\text{Prøvens hulrumsvolumen} = V_v = P_3 v_v$$

De poser, der er anvendt i de efterfølgende eksempler, har $v_p = 1,0 \text{ cm}^3/\text{g}$, og $P_p = 5 \text{ g}$.

Sættes $v_v = 1,0 \text{ cm}^3/\text{g}$, fås:

$$\text{Prøvens vægt} \quad P_1 = (P_1 + P_p) - 5 \text{ (g)}$$

$$\text{Prøven total-} \quad V_t = P_1 - P_2 \text{ (cm}^3\text{)}$$

volumen

$$\text{Prøvens hulrum-} \quad V_v = P_3 \text{ (cm}^3\text{)}$$

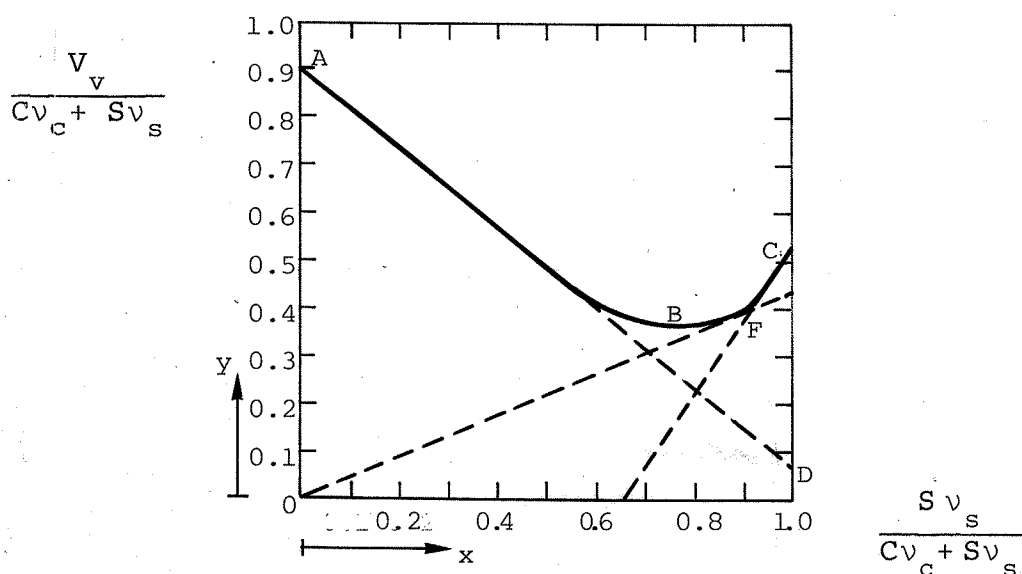
volumen

$$\text{Faststoffets masse-} \quad = \frac{P_1}{P_1 - P_2 - P_3} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

fylde

1.3 Hulrumsdiagrammers koordinater

T.C. Powers har i "The Properties of Fresh Concrete" (1968) vist, at hulrum som funktion af blandingsforhold med fordel kan afbildes som beskrevet nedenfor.



Figur 1. Hulrumsdiagram for blandinger af Cement (C) og Sand (S)

$$x = \frac{S v_s}{C v_c + S v_s}, \text{ d.v.s. sandets faststofvolumen i forhold til faststofvolumet af cement + sand.}$$

$$y = \frac{V_v}{C v_c + S v_s}, \text{ d.v.s. blandingens hulrum i forhold til faststofvolumet af cement + sand.}$$

Udfra prøver med ren cement ($x=0$) bestemmes cementens massefylde og ud fra prøver med rent sand ($x=1$) bestemmes sandets massefylde.

For en vilkårlig prøve bestemmes x ud fra vægtforholdet mellem sand og cement

$$x = \frac{S v_s}{C v_c + S v_s} = \frac{\frac{S}{C}}{\frac{v_c}{v_s} + \frac{S}{C}}$$

y -værdien bestemmes ud fra måleresultaterne

$$y = \frac{V_v}{C v_c + S v_s} = \frac{V_v}{V_t - V_v} = \frac{P_3}{P_1 - P_2 - P_3}$$

1.4 Analyse af hulrumskurver

Totalvolumen af en blanding af tørt sand og cement er lig cementens og sandets faststofvolumen plus et tillæg svarende til hulrumsvolumet.

Udtrykkes hulrumsvolumet som to bidrag, der er proportionale med cementens henholdsvis sandets faststofvolumen, får man:

$$V_v = \alpha_c C v_c + \alpha_s S v_s,$$

hvor faktorerne α_c og α_s er variable.

Ud fra

$$y = \frac{V_v}{C v_c + S v_s} \quad \text{og} \quad x = \frac{S v_s}{C v_c + S v_s}$$

og ovenstående udtryk for V_v fås:

$$y = \frac{\alpha_c C v_c + \alpha_s S v_s}{C v_c + S v_s} = \frac{\alpha_c (1-x) + \alpha_s x}{1}$$

Af udtrykket ses at hulrumskurven kan beskrives ved rette linier i områder, hvor α_c og α_s kan regnes konstante. For disse linier er $\alpha_c = y_{x=0}$ og $\alpha_s = y_{x=1}$.

Nedenfor vises, at hulrumskurven kan deles i tre områder, der hver for sig som en tilnærmelse kan beskrives ved en ret linie.

Område A - B. I dette område omsluttet sandkornene helt af cementkorn. Hulrumsindholdet bestemmes derfor primært af cementmængden. Sandmængdens bidrag til hulrumsindholdet afhænger af størrelsesforholdet mellem sandkorn og cementkorn. Jo mindre sandkornene er, des mere bidrager sandmængden til blandingens hulrumsindhold.

$$\alpha_c = Y_A \quad \alpha_s = Y_D$$

$$y = y_A (1-x) + y_D x$$

y_D 's placering må bestemmes af hældningen på hulrumskurven i A.

Hvor langt hulrumskurven følger denne linie afhænger af komprimeringen, som skal kunne overføre kræfter til cementkornene gennem en stadig tættere koncentration af sandkorn.

En hulrumskurve er således afhængig af den anvendte komprimeringsteknik.

Område B - F. Ved B har man den tætteste pakning. Forøges sandmængden med fastholdt cementmængde vil komprimeringen af cementkornene aftage i takt med forøgelsen af sandmængden. Hulrumsindholdet bliver derfor en funktion af sandmængden alene.

$$V_v = \alpha_s S v_s + \alpha_c C v_c = V_v \{S\}$$

d.v.s. $\alpha_c = 0$ og

$$\begin{aligned} y &= \alpha_c (1-x) + \alpha_s x = \alpha_s x \\ \alpha_s &= \frac{y_F}{x_F} \end{aligned}$$

Område F - C. I dette område kan cementkornene være i hulrummene mellem sandkornene. Totalvolumet af blandingen er derfor uafhængig af cementmængden.

$$V_t = (1+\alpha_c) C v_c + (1+\alpha_s) S v_s = V_t \{S\}$$

d.v.s., $\alpha_c = -1$, og da $\alpha_s = y_{x=1} = y_c$ fås

$$\begin{aligned} y &= \alpha_c (1-x) + \alpha_s x = \frac{(y_c + 1)x - 1}{y_c + 1} \\ y &= 0 \quad \text{for} \quad x = \frac{1}{y_c + 1} \end{aligned}$$

F-C-linien kan således bestemmes alene ud fra prøver med rent sand.

2. EKSEMPLER PÅ HULRUMSDIAGRAMMER

I det følgende beskrives bestemmelsen af hulrumdiagrammer dels for en blanding af Portland-cement og finharpet søsand (eksempel 1), dels for en blanding af Rapid cement, finharpet søsand og perlesten (eksempel 2).

2.1 Eksempel 1:

Hulrumdiagram for blandinger af Portland-cement (C) og finharpet søsand (S).

For hvert blandingsforhold er der udført 3 prøver, betegnet A, B og C.

Måledata

$\frac{C}{C + S}$	NR.	$P_1 + 5g$	P_2g^2	P_3g^3
0	A	812	344	152
	B	811	349	146
	C	800	340	152
0,05	A	840	378	141
	B	827	373	117
	C	827	372	139
0,15	A	820	389	123
	B	829	396	121
	C	854	404	123
0,30	A	807	397	115
	B	813	399	116
	C	827	409	115
0,50	A	703	337	116
	B	718	343	120
	C	724	344	125
0,75	A	600	261	135
	B	628	276	138
	C	610	265	138
1,00	A	542	212	155
	B	545	216	153
	C	553	219	157

Tabel 1. Måledata til eksempel 1.

Delmaterialernes
massefylde:

Finharpet sand ($\frac{C}{C+S} = 0$)

Sandets massefylde:

$$\gamma_s = \frac{P_1}{P_1 - P_2 - P_3} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{807}{311} = 2,60 \\ \frac{806}{311} = 2,59 \\ \frac{795}{303} = 2,62 \end{array} \right\} = 2,60 \text{ g/cm}^3$$

$$v_s = \frac{1}{\gamma_s} = \left\{ \begin{array}{l} 0,385 \\ 0,386 \\ 0,382 \end{array} \right\} = 0,384 \text{ cm}^3/\text{g}$$

Portland cement ($\frac{C}{C+S} = 1$)

Cementens massefylde:

$$\gamma_c = \frac{P_1}{P_1 - P_2 - P_3} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{537}{170} = 3,16 \\ \frac{540}{171} = 3,16 \\ \frac{548}{172} = 3,19 \end{array} \right\} = 3,17 \text{ g/cm}^3$$

$$v_c = \frac{1}{\gamma_c} = \left\{ \begin{array}{l} 0,317 \\ 0,317 \\ 0,314 \end{array} \right\} = 0,316 \text{ cm}^3/\text{g}$$

Hulrumskurvens koordinater

$$x = \frac{\frac{S}{C}}{\frac{v_c}{v_s} + \frac{S}{C}} \quad \text{og} \quad y = \frac{P_3}{P_1 - P_2 - P_3}$$

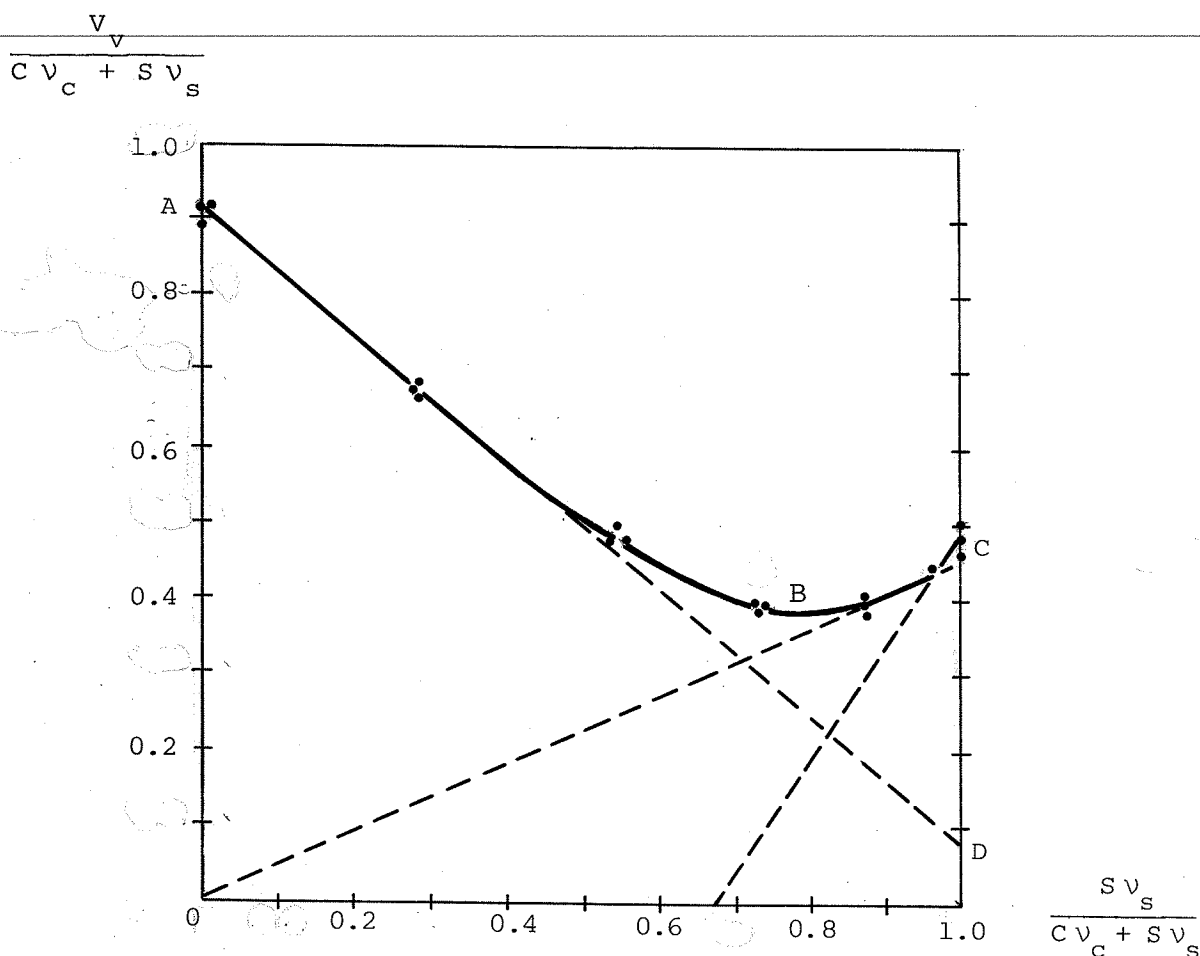
$$\frac{v_c}{v_s} = \frac{0,316}{0,384} = 0,823$$

I nedenstående tabel 2 er koordinaterne x og y svarende til tabel 1's måledata opført. Derudover er spredningen på middeltallet af de 3 uafhængige bestemmelser af y-værdien anført i procent af middeltallet.

$\frac{C}{C+S}$	$\frac{S}{C}$	x	P_3	$P_1 - P_2 - P_3$	Y	Variationskoefficient %
0	∞	1,000	152	311	0,489	3,4
			146	311	0,469	
			152	303	0,502	
0,05	19,00	0,958	141	316	0,446	fejl*
			117	332	0,352	
			139	311	0,447	
0,15	5,67	0,873	123	303	0,406	3,1
			121	307	0,394	
			123	322	0,382	
0,30	2,33	0,738	115	290	0,397	1,6
			116	293	0,396	
			115	298	0,386	
0,50	1,00	0,548	116	245	0,473	2,9
			120	250	0,480	
			125	250	0,500	
0,75	0,33	0,286	135	199	0,678	1,8
			138	209	0,660	
			138	202	0,683	
1,00	0,00	0	155	170	0,912	1,1
			153	171	0,895	
			157	172	0,913	

Tabel 2. Beregning af hulrumskurvens koordinater

*Fejlen skyldes, at posen ikke blev lukket lufttæt, idet der havde samlet sig lidt materiale på svejsestedet.



Figur 2. Hulrumsdiagram for blandinger af Portland-cement og finharpet søsand

Figur 2 viser, at de to materialer får den tætteste pakning for

$y_B = 0,38$ svarende til et hulrumindhold

$$V_v = 1000 \cdot \frac{y_B}{y_B + 1} = 275 \text{ l/m}^3$$

Det blandingsforhold, der svarer til hulrumdiagrammets x-værdier, er

$$\frac{S}{C} = \frac{v_c}{v_s} \cdot \frac{x}{1-x}$$

Blandingsforholdet, der svarer til den tætteste pakning, er, idet $x_B = 0,8$,

$$\frac{S}{C} = \frac{v_c}{v_s} \cdot \frac{x}{1-x} = 0,823 \cdot \frac{0,80}{1-0,80} = 3,3$$

2.2 Eksempel 2Hulrumsdiagram for blandinger af Rapid-cement (C), finharpet søsand (S) og søperlesten (St)Hulrumsdiagrammets parametre

Som koordinater vælges

$$y = \frac{V_v}{Cv_c + Sv_s + Stv_{st}}$$

d.v.s. hulrumsvolumen i forhold til blandingens faststofvolumen.

$$x = \frac{Stv_{st}}{Cv_c + Sv_s + Stv_{st}}$$

d.v.s. stenindholdets faststofvolumen i forhold til blandingens faststofvolumen.

Cement- og sandmængdens betydning for hulrumsindholdet klarlægges ved at optegne kurver for forskellige værdier af S/C forholdet. Her er valgt S/C = 0, 1,5, 2,0, 2,5 og 3,0. Hulrumsforholdene er undersøgt for $0 \leq x < 0,55$ og $x = 1$. I området $0,55 < x < 1$ er der overskud af sten, så der ikke kan laves en homogen blanding af tørre materialer.

Måledata:

$\frac{St}{C + S + St}$	$\frac{S}{C}$	$P_1 + 5g$	P_2g	P_3g
0	0	569	210	175
		559	204	170
		569	213	172
0	1,5	709	334	119
		707	334	118
		725	344	120
0	2,0	681	335	98
		681	334	99
		635	310	93
0	2,5	673	332	94
		673	334	91
		677	336	92
0	3,0	719	353	99
		670	329	93
		641	314	90
0,150	0	538	212	146
		568	223	156
		581	235	152
0,167	2,0	712	361	88
		688	346	88
		718	362	91
0,169	2,5	686	350	81
		740	376	89
		683	348	82
0,168	3,0	761	384	92
		760	382	95
		710	353	90
0,250	1,5	793	393	111
		775	383	104
		799	396	111
0,300	0	618	261	146
		619	268	137
		609	267	132
0,338	2,0	736	374	87
		680	347	80
		733	373	86
0,339	2,5	724	370	83
		686	359	81
		749	385	83
0,340	3,0	740	366	94
		867	445	97
		802	401	100
0,500	0	644	302	112
		623	309	91
		602	285	100

(skemaet fort-
sætter næste
side)

Måledata:
(fortsat)

St	S	P ₁ + 5	P ₂	P ₃
C + S + St	C	g	g	g
0,500	1,5	687	353	78
		716	364	84
		743	381	84
0,500	2,0	593	301	67
		707	361	80
		720	368	82
0,500	2,5	686	342	84
		722	370	80
		679	349	74
0,500	3,0	688	354	75
		667	331	83
		706	354	85
1,000	-	601	196	172
		587	189	170
		607	202	168

Tabel 3. Måledata til eksempel 2.

Delmaterialernes
massefylde

Finharpet sand

Fra eksempel 1 $v_s = 0,384 \text{ cm}^3/\text{g}$

Perlesten $\left(\frac{St}{C + S + St} = 1,00\right)$

Massefylde:

$$\gamma_{St} = \frac{P_1}{P_1 - P_2 - P_3} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{596}{228} = 2,61 \\ \frac{582}{223} = 2,61 \\ \frac{602}{232} = 2,59 \end{array} \right\} = 2,60 \text{ g/cm}^3$$

$$v_{St} = \frac{1}{\gamma_{St}} = 0,384 \text{ cm}^3/\text{g}$$

Rapid-cement $\left(\frac{St}{C + S + St} = 0, \frac{S}{C} = 0\right)$

Massefylde:

$$\gamma_c = \frac{P_1}{P_1 - P_2 - P_3} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{564}{179} = 3,15 \\ \frac{554}{180} = 3,08 \\ \frac{564}{179} = 3,15 \end{array} \right\} = 3,13 \text{ g/cm}^3$$

$$v_c = \frac{1}{\gamma_c} = 0,320 \text{ cm}^3/\text{g}$$

Hulrumskurvernes koordinater

$$y = \frac{V_v}{C v_c + S v_s + St v_{St}}$$

$$x = \frac{St v_{St}}{C v_c + S v_s + St v_{St}}$$

$$V_v = P_3$$

$$C v_c + S v_s + St v_{St} = P_1 - P_2 - P_3$$

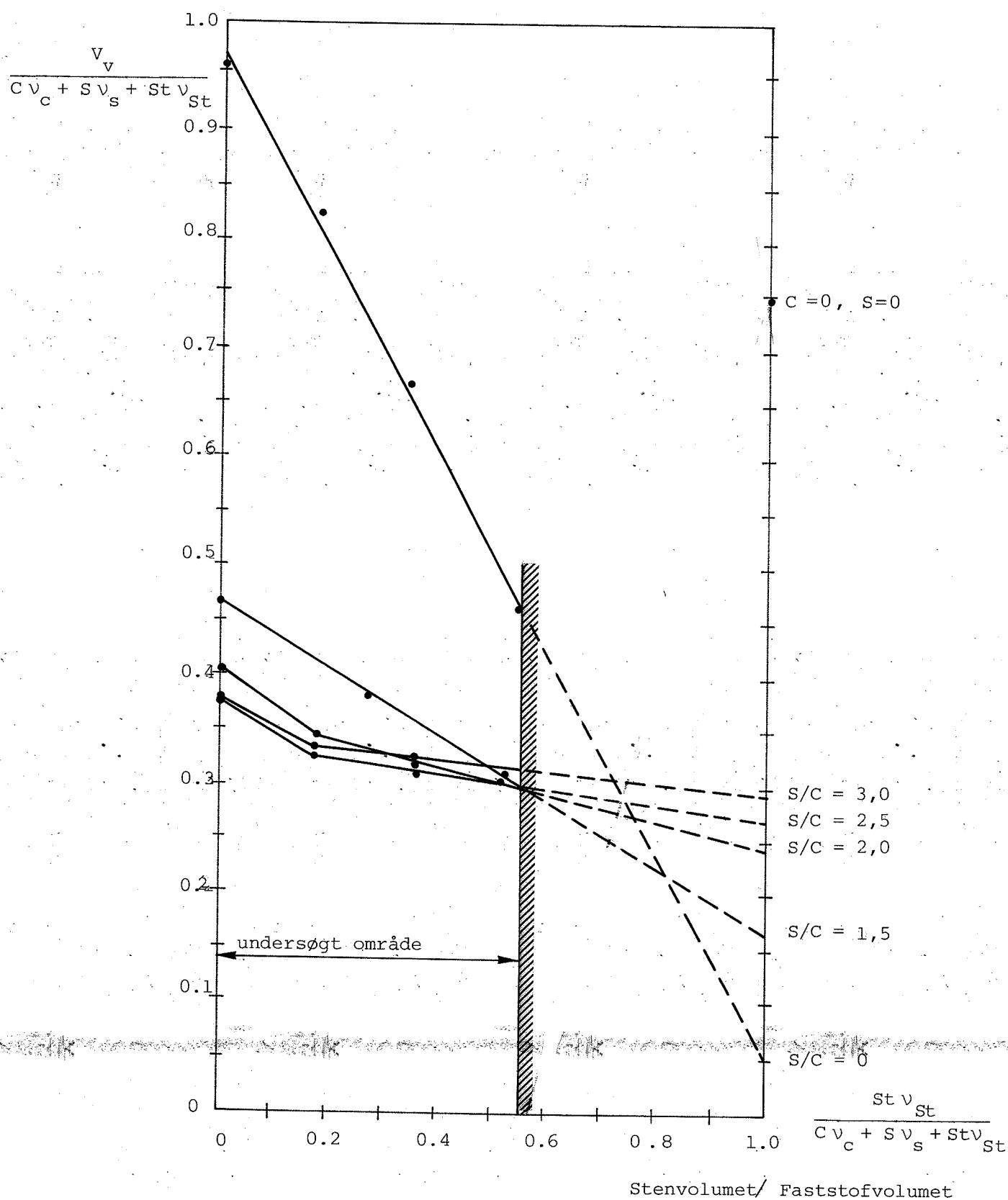
$$y = \frac{P_3}{P_1 - P_2 - P_3}$$

$$x = \frac{St}{C + S + St} \cdot \frac{P_1 v_{St}}{P_1 - P_2 - P_3}$$

$\frac{St}{C+S+St}$	$\frac{S}{C}$	P_1	P_2	P_3	$P_1 - P_2 - P_3$	x	y
1,000	-	593	196	170	227	1,000	0,749
0	0	561	209	172	180	0	0,956
0	1,5	709	337	119	253	0	0,470
0	2,0	661	326	97	238	0	0,408
0	2,5	669	335	92	253	0	0,379
0	3,0	672	332	94	246	0	0,382
0,150	0	557	223	151	183	0,175	0,825
0,167	8,0	701	356	89	256	0,176	0,348
0,169	2,5	698	358	84	256	0,177	0,328
0,168	3,0	739	373	92	274	0,174	0,336
0,250	1,5	784	391	109	284	0,265	0,384
0,300	0	610	265	138	207	0,340	0,667
0,388	2,0	711	365	84	262	0,352	0,321
0,339	2,5	715	371	82	262	0,355	0,313
0,340	3,0	798	404	97	297	0,351	0,327
0,500	0	618	299	101	218	0,544	0,463
0,500	1,5	710	376	82	262	0,520	0,313
0,500	2,0	668	343	76	249	0,515	0,305
0,500	2,5	691	354	79	258	0,514	0,306
0,500	3,0	682	346	81	255	0,514	0,318

Tabel 4. Beregning af hulrumskurvernes koordinater.

Hulrumsvolumet/ Faststofvolumet



Figur 3. Hulrumsdiagram for blandinger af Rapidcement, finharpet søsand og søperlesten

Kommentarer til eksempel 2

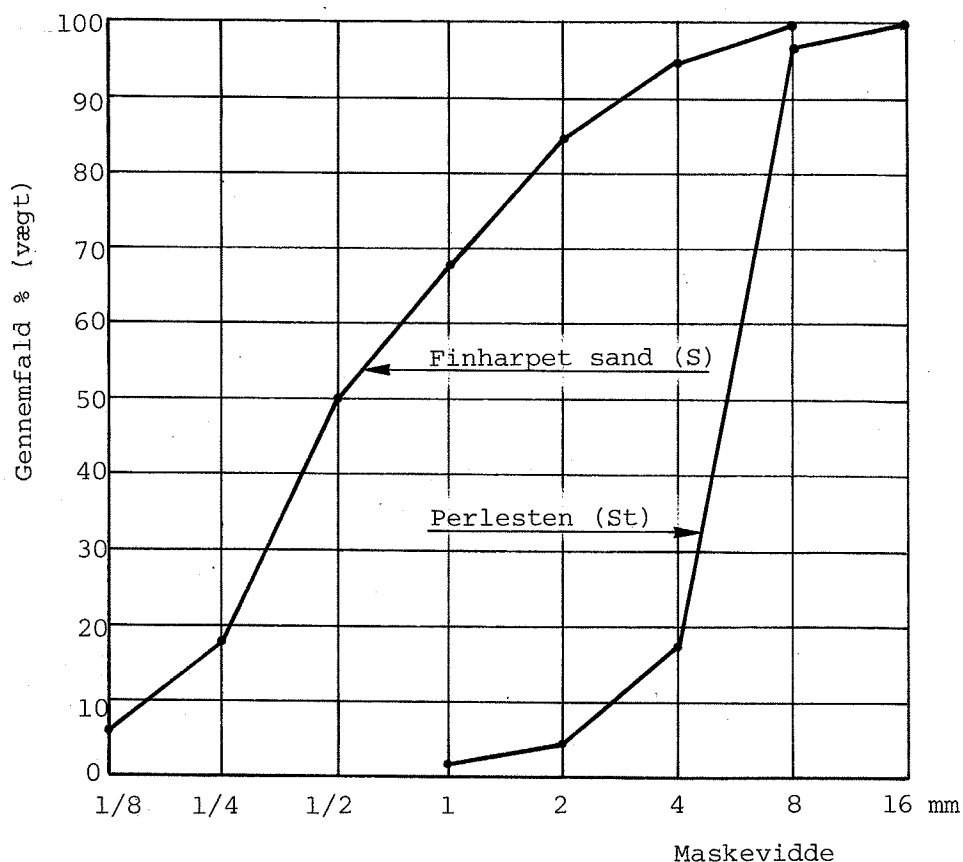
Figur 3 giver et overblik over hulrumsholdet som funktion af blandingsforholdet.

Hulrumsholdet er således her næsten konstant ($y \sim 0,32$) i området $0,2 < x < 0,5$ og $2,0 \leq S/C \leq 3,0$.

Ved betonfremstilling skal der være et vist mørteloverskud af hensyn til bearbejdéligheden. Der er derfor en øvre grænse for, hvor stort et stenindhold man kan anvende. I det aktuelle tilfælde har jeg fundet, at grænsen ligger ved $x \sim 0.42$.

2.3 Kornkurver for de tilslagsmaterialer, der er anvendt i eksempel 1 og 2

Til orientering er der medtaget sigteanalyser af de tilslagsmaterialer, der er anvendt i eksemplerne.



Figur 4. Kornkurver for finharpet søsand og søperlesten.

3. BETONPROPORTIONERING VED HJÆLP AF ET HULRUMSDIAGRAM

3.1. Beregning af delmængder udfra et hulrumdiagrams koordinater

Med betegnelserne fra eksempel 2 fås:

$$\begin{aligned} V_v \text{ pr. rumfangsenhed} &= \frac{V_v}{C v_c + S v_s + St v_{St} + V_v} \\ &= \frac{y}{1+y} \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} St v_{St} \text{ pr. rumfangsenhed} &= x(C v_c + S v_s + St v_{St}) \\ &= x(1 - \frac{y}{1+y}) = \frac{x}{1+y} \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned}$$

$$S v_s = k C v_c \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$\text{hvor } k = \frac{S}{C} \frac{v_s}{v_c} \text{ . D.v.s. } C v_c + S v_s = (1+k) C v_c$$

$$\begin{aligned} St v_{St} &= x(C v_c + S v_s + St v_{St}) \\ &= x[(1+k) C v_c + St v_{St}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C v_c \text{ pr. rumfangsenhed} &= \frac{(1-x) St v_{St}}{x(1+k)} \\ &= \frac{1-x}{(1+y)(1+k)} \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned}$$

Blandingsforholdet, udtrykt som forholdet mellem delmaterialernes faststofvolumener, bliver da:

$$C v_c : S v_s : St v_{St} = 1 : k : \frac{x}{1-x} (1+k)$$

Som udtryk for cementpastaens porøsitet fås:

$$\frac{V_v}{C v_c} = \frac{y(1+k)}{1-x}$$

Ved betonproportionering ved hjælp af et hulrumdiagram antages det, at hulrumsholdet, bestemt udfra tørblandinger, er proportional med betonens indhold af vand og naturligt indblandet luft.

Nytten af hulrumdiagrammer afhænger af, i hvor høj grad denne antagelse er opfyldt i brugsområdet (se i øvrigt afsnit 4).

3.2 Betonproportionering udfra hulrumsdiagrammet i eksempel 2.

Opgave:

Der skal laves en beton af materialerne fra eksempel 2, med $v/c = 0,50$ og sætmål 3-6 cm. (v/c -tallet er her vægtforholdet mellem betonens totale vandindhold og cementindholdet)

1. Prøveblanding

Af figur 3 ses, at $S/C \approx 2,5$ giver den tætteste blanding for et vilkårligt stenindhold. Den første prøveblanding laves med $v/c = 0,50$ og $S/C = 2,5$ ($C:S:V = 1:2,5:0,5$ vægtforhold). Under blandingen tilsættes sten, indtil konsistensen svarer til sætmål 3-6 cm. Denne stenmængde er f.eks. $St/C = 0,90$, hvilket med $v_c = 0,32$ og $v_s = v_{st} = 0,38$ giver:

$$x = \frac{St v_{st}}{C v_c + S v_s + St v_{st}} = \frac{St/C}{\frac{v_c}{v_{st}} + \frac{S}{C} \frac{v_s}{v_{st}} + \frac{St}{C}}$$

$$= \frac{0,90}{0,84 + 2,5 \cdot 1,0 + 0,90} = 0,21$$

Af figur 3 ses, at denne x -værdi ligger i det område, hvor hulrumsindholdet næsten er uafhængig af x , men blandingen er meget mørtelig.

Prøveblandingen fortsætter med tilsætning af sten indtil blandingen visuelt har et passende stenindhold. Undervejs må der tilsættes lidt vand for at holde konsistensen nogenlunde samme niveau. Den visuelt bestemte stenmængde er f.eks. $St/C = 2,3$ hvilket svarer til

$$x = \frac{2,3}{0,84 + 2,5 + 2,3} = 0,41$$

Justering af S/C -forhold og x -værdi

Af udtrykket for cementpastaens porøsitet

$$\frac{V_v}{C v_c} = \frac{y(1+k)}{1-x}$$

ses, at konstant porøsitet i et område med konstant y -værdi medfører, at

$\frac{1+k}{1-x}$ skal være konstant.

Med $v_c = 0,32$ og $v_s = 0,38$ fås:

$$\frac{1+k}{1-x} = \frac{1 + \frac{S v_s}{C v_c}}{1-x} = \frac{1 + 2,5 \cdot 1,2}{1 - 0,21} = 5,06 = \frac{1+k}{1 - 0,41}$$

hvoraf $k = 1,99$ $S/C = 1,99:1,2 = 1,65$

Forudsætningen om, $\bar{y} = \text{konstant}$, er ifølge figur 3 ikke opfyldt, når

$(S/C, x)$ ændres fra $(2,5, 0,21)$ til $(1,65, 0,41)$

S/C forholdet skønnes til 1,9 og en ny x -værdi beregnes:

$$\frac{1+k}{1-x} = 5,06 = \frac{1+1,9 \cdot 1,2}{1-x}, \quad x = 0,35$$

2. prøveblanding

Som kontrol udføres en ny prøveblanding med $x = 0,35$ og $S/C = 1,9$. Blandingsforholdet bliver så:

$$C v_c : S v_s : St v_{st} = 1:k : \frac{x}{1-x} (1+k)$$

med $v_c = 0,32$ og $v_s = v_{st} = 0,38$ fås

$$C : S : St = 1 : \frac{S}{C} : \left(\frac{x}{1-x} \frac{1+k}{1,2} \right) = 1 : 1,9 : 1,48$$

Der sættes vand til blandingen svarende til $v/c = 0,50$.

Giver denne blanding et sæt mål på 3-6 cm er blandingsforholdet i orden.

Af prøveblandingen bestemmes rumvægten af en vibreret prøve til f.eks. 2280 kg/m^3 .

Udregning af betonrecept

Betonrecepten beregnes af data fra 2. prøveblanding.

$$\text{Cement} = 1 \cdot C \quad \text{kg/m}^3$$

$$\text{Sand} = 1,9 \cdot C$$

$$\text{Sten} = 1,48 \cdot C$$

$$\text{Vand} = 0,5 \cdot C$$

$$\Sigma \quad 4,88 \cdot C = 2280 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Cement} = 467 \text{ kg/m}^3 \sim 149 \text{ l/m}^3 \quad (v = 0,32)$$

$$\text{Sand} = 888 \quad - \quad \sim 337 \quad - \quad (v = 0,38)$$

$$\text{Sten} = 691 \quad - \quad \sim 263 \quad - \quad (v = 0,38)$$

$$\text{Vand} = 234 \quad - \quad \sim 234 \quad - \quad (v = 1)$$

$$2280 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Luft} = \sim \frac{17}{1000} \text{ l/m}^3$$

Skal der senere korrigeres på v/c -tallet f.eks. efter trykprøvning af prøvecylindre, kan man igen bruge hulrumsdiagrammet til at afgøre, hvilke parametre man skal ændre for stadig at holde vandbehovet nede.

4. AFSLUTTENDE BEMÆRKNINGER

Ved betonproportionering støtter man sig som regel til grusmaterialernes kornkurver, og med godt resultat så længe materialernes kornkurver og deres petrografiske egenskaber er normale.

Ofte er sandet imidlertid ikke så groft, som man kunne ønske, og mange af stenkornene har ikke kompakt form. I sådanne tilfælde må proportionering udføres på grundlag af prøveblandinger.

Værdien af hulrumdiagrammer kommer frem i disse tilfælde, hvor man alligevel skal udføre prøveblandinger. Figur 3 side 15 viser eksempelvis et hulrumdiagram for blandinger af rapidcement, søsand og søperlesten med hulrumskurver for forskellige værdier af sand/cement-forholdet. Diagrammet viser, at der er et relativt stort område, hvor hulrumsindholdet næsten er konstant lavt, hvilket er første betingelse for at kunne fremstille en beton med stor kompakthed og dermed optimale betonegenskaber.

Man får altså et overblik over de blandingsforhold, der med den pågældende materialekombination kan give størst kompakthed. Friskbetonegenskaberne må derefter kontrolleres ved prøveblending.

Situationen i praksis er ofte den, at der skal laves beton med et givet v/c-tal og en given bearbejdelighed af forhåndenværende tilslagsmaterialer.

Hvis der proportioneres udfra et hulrumdiagram, kan man allerede efter en enkelt prøveblending se, om tilslagsmaterialerne egner sig til at fremstille beton med de stillede krav.

Man bliver således advaret mod at tvinge et krav til v/c-tallet igennem på bekostning af kompakheden.

Jeg håber at finde forståelse for, at de muligheder der ligger i at anvende hulrumdiagrammer som støtte ved betonproportionering og ved valg af tilslagsmaterialer, skal udforskes nøjere. Det videre arbejde skal bestå dels at bestemme hulrumdiagrammer for en række kombinationer af tilslagsmaterialer, dels ved betonforsøg at belyse betydningen af de informationer et hulrumdiagram giver.

5.LITTERATUR

- [1] T.C. Powers:
The Properties of Fresh Concrete 1968
John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [2] H.H. Bache:
Frisk og hærnet beton
BFL intern rapport nr. 210
Betonforskningslaboratoriet Karlstrup
1969