LUND UNIVERSITY

Boverkets BBK-materialgrupp Konstruktionsregler -94 : Revidering av BBK79 till BBK94 : Teoretisk bakgrund till ändringsförslag

Fagerlund, Göran

1993

Link to publication

Citation for published version (APA):
Fagerlund, G. (1993). *Boverkets BBK-materialgrupp Konstruktionsregler -94 : Revidering av BBK79 till BBK94 : Teoretisk bakgrund till ändringsförslag*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7044). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:
1

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Download date: 17. Dec. 2025

BYGGNADSMATERIAL

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

Boverkets BBK-materialgrupp
Konstruktionsregler -94. Revidering av BBK79 till BBK94

TEORETISK BAKGRUND TILL ÄNDRINGSFÖRSLAG

I Inverkan av lufthalt på betongens E-modul

II Samband mellan spräckhållfasthet och enaxiell draghållfasthet

III Samband mellan tryckhållfasthet och spräckhållfasthet resp draghållfasthet

IV Mineraliska tillsatsmaterial

Göran Fagerlund

Rapport TVBM-7044

Lund, februari 1993

CODEN:LUTVDG/(TVBM-7044)/1-43/1993

ISSN 0348-7911

Boverkets BBK-materialgrupp
Konstruktionsregler -94. Revidering av BBK79 till BBK94

TEORETISK BAKGRUND TILL ÄNDRINGSFÖRSLAG

I Inverkan av lufthalt på betongens E-modul

II Samband mellan spräckhållfasthet och enaxiell draghållfasthet

III Samband mellan tryckhållfasthet och spräckhållfasthet resp draghållfasthet

IV Mineraliska tillsatsmaterial

Göran Fagerlund

Rapport TVBM-7044

Lund, februari 1993

Innehåll

Sid

Förord		2
Sammanfattning		3
I	Inverkan av lufthalt på betongens E-modul	4
II	Samband mellan spräckhållfasthet och enaxiell draghållfasthet	8
III	Samband mellan tryckhållfasthet och spräckhållfasthet resp draghållfasthet	12
IV	Mineraliska tillsatsmaterial	19

Förord

Under 1991 genomförde en arbetsgrupp, som tillsatts av Svenska Betonföreningen, en analys av de olika betongbestämmelsernas regler när det gäller betongens beständighet. Resultatet publicerades i rapporten "Beständiga Betongkonstruktioner". Betongrapport nr 1, 1991. Utgiven av Svenska Betongföreningen. I detta arbete påvisades att nuvarande regler inte är helt tillfredsställande. Boverket tillsatte därför under 1991 en arbetsgrupp med syfte att vidta de förändringar i bla BBK79 som erfordrades för att reglerna skulle bättre överensstämma med Betongföreningens rekommendationer. Arbetet vidgades dock till att omfatta en generell översyn av BBK79:s regler för material och utförande. Dessutom har arbetsgruppen bidragit till arbetet med betongkapitlet i Boverkets Konstruktionsregler-94.

Jag deltar i Boverkets arbetsgrupp. I föreliggande rapport ger jag de teoretiska överväganden som ligger bakom några av mina förslag till arbetsgruppen.

Lund den 23 februari 1993

Göran Fagerlund

Sammanfattning

I: E-modul
Genom en beräkning med Hashin´s kompositformel visas att de föreslagna E-modulerna är av rätt storleksordning men att den föreslagna E-modulreduktionen med 6 procent för varje procentenhet ökad lufthalt är för stor och bör vara 3 %.

II: Spräck- versus draghållfasthet
Genom att använda en brottmekanisk analys genomförd av Modéer ges ett samband mellan spräckhållfasthet bestämd på 10 cm resp 15 cm cylindrar. Därvid används värden på den karakteristiska längden bestämda av Per-Erik Petersson och Haghpassand. Relationen drag/spräck är ca 0,65 för 10 cm cylindrar och ca 0,85 för 15 cm cylindrar. De senare är standardiserade i Sverige. Den i BBK föreslagna relationen 0,67 för 15 cm cylindrar ger således alldeles för låg draghållfasthet. Detta framgår också av en litteratursammanställning.

III: Drag- versus tryckhållfasthet
Spräck- och tryckprovningar, som genomfördes för ca 70 olika betonger i samband med min undersökning vid CBI av betongens slaghållfasthet år 1979 har analyserats. Därur har ett samband mellan spräckhållfastheten hos normenliga 15 cm cylindrar och kubhållfastheten kunnat uppställas. Detta samband överensstämmer väl med medelsambandet från en litterarurundersökning gjord i Tyskland. En omräkning enligt II ovan till enaxiell draghållfasthet gar gjorts. Resultatet visar att de i BBK föreslagna draghållfastheterna är alldeles för låga. Skillnaden är ofta >1 MPa dvs mer än 50 %.

IV: Mineraliska tillsatsmaterial
Ett förslag till text att använda i BBK94 presenteras. I texten ingår två viktiga storheter för tillsatsmaterialet:

1: Max tillåten mängd tillsatsmaterial räknat på portlandcementet.
2: Effektivitetsfaktorn; dvs, den mängd portlandcement som en given mängd tillsatsmaterial kan ersätta med bibehållna egenskaper hos betongen.

För att dessa båda storheter skall gå att bedöma genomförs teoretiska beräkningar i tre bilagor:
BILAGA 1: Beräkning av hur stor mängd tillsatsmaterial man kan använda innan en viss andel av den av portlandcementet producerade kalciumhydroxiden ("basreserven") konsumerats. Preliminärt sätts denna andel till 50 %.
BILAGA 2: Beräkning av hur mycket sk cementgel som produceras av en viss typ och mängd av ett tillsatsmaterial.
BILAGA 3: Totalporositeten hos betong med olika tillsatsmaterial i olika mängder.

Analysen visar att följande maxmängder och effektivitetsfaktorer kan vara rimliga:

Silikasoft:	Max 10 %, Effektivitet 1.
Flygaska:	Max 35 %, Effektivitet 0,3.
Mald granulerad masugnsslagg:	Max 100%, Effektivitet 1.

Boverket: Konstruktionsregler -94. Revidering av BBK 79 till BBK 94.

I: Inverkan av lufthalt på betongens E-modul

Karakteristiska värden, E_{ck}, för betongens elasticitetsmodul anges i Konstruktionsregler -94 avsnitt 4:6223. Värdena gäller för måttligt snabb pålastning av normalbetong utan luftinblandning. Vid luftinblandning föreslås värdena minskas med 6% för varje procentenhet ökad lufthalt utöver 2% naturlig lufthalt.

Exempel på angivna E-moduler är:

K25: 28,5 GPa
K40: 32,0 GPa
K60: 36,0 GPa

Nedan genomräknas två exempel ,vilka visar att E-modulreduktionen på grund av luftinblandning är lägre än de föreslagna 6 procenten. Dessutom visas att de angivna E-modulerna för "luftfri" betong är av rätt storleksordning.

1: Antag:K40, vct=0,50, W=170, C=340

<u>a: Enbart naturlig luft (2%)</u>

Volymandel pasta: $V_p = (170+0{,}32\cdot 340+20)/1000=30\%$

Volymandel ballast: $V_b= 1-Vp$

Ballastens E-modul: $E_b=70$ GPa

Pastans E-modul: $E_p=70(1-P_p)^3$ (Helmuth&Turk /1/)

$$P_p=\frac{C\cdot vct-0{,}19\cdot\alpha\cdot C+20}{0{,}32\cdot C+C\cdot vct+20} = \frac{340\cdot 0{,}5-0{,}19\cdot 0{,}8\cdot 340+20}{0{,}32\cdot 340+340\cdot 0{,}5+20} = 0{,}462$$

(α=hydratationsgraden≈0,80)

$E_p=70(1-0{,}462)^3=10{,}9$ GPa

$K=E_b/E_p=70/10{,}9=6{,}4$

Hashins formel: $$E_{btg}=\frac{(1-V_b)+(1+V_b)K}{(1+V_b)+(1-V_b)K}E_p = \frac{0{,}30+1{,}70\cdot 6{,}4}{1{,}70+0{,}30\cdot 6{,}4}\,10{,}9 = \mathbf{33{,}7\ GPa}$$

Konstruktionsregler -94 anger 32 GPa.

b: Med 4% extra luft

$f=f_0 \cdot \exp(-0{,}08 \cdot \Delta l)$ (där Δl=lufthaltsökningen i procentenheter)

$f_{6\%} = f_{2\%} \cdot \exp(-0{,}08 \cdot 4) = 0{,}726 \cdot f_{2\%}$

Där $f_{2\%}$ och $f_{6\%}$ är hållfastheten vid 2% resp 6% lufthalt i betongen.

Hållfastheten sänks således med 27% dvs med 10,8 MPa .

$f_{6\%}=0{,}73 \cdot 40=29{,}2$ MPa.

Hållfasthetsminskningen motsvarar 10,8/5=2,2 hållfasthetsklasser.

Cementhaltsökningen för att kompensera detta är:

$30 \cdot 2{,}2=66$ kg/m^3 (ca 30 kg/m^3 per hållfasthetsklass)

Nytt vct=170/(340+66)=170/406=0,42

Ny cementpastahalt $V_p=(170+0{,}32 \cdot 406+60)/1000=$ 36 %

$$P_p=\frac{406 \cdot 0{,}42-0{,}19 \cdot 0{,}8 \cdot 406+60}{0{,}32 \cdot 406+406 \cdot 0{,}42+60}=0{,}468$$

$E_p=70(1-0{,}468)^3=10{,}5$ GPa

K=70/10,5=6,7

$$E_{btg}=\frac{0{,}36+1{,}64 \cdot 6{,}7}{1{,}64+0{,}36 \cdot 6{,}7}\ 10{,}5 = \mathbf{29{,}4\ GPa}$$

E-modulminskningen är 5,7 GPa, dvs 5,7/4=1,4 GPa per procentenhet ökad luthalt.

SLUTSATS: E-modulen minskas med ca 4% för varje extra procentenhet luft utöver 2% i betongen.

2: Antag: K60, vct=0,40, W=170, C=425

a: Enbart naturlig luft (2%)

$V_p = (170+0{,}32 \cdot 425+20)/1000=32{,}6\%$

$V_b=67{,}4\ \%$

$$P_p = \frac{425 \cdot 0{,}40-0{,}19 \cdot 0{,}7 \cdot 425+20}{0{,}32 \cdot 425+425 \cdot 0{,}40+20} = 0{,}41$$

Hydratationsgraden antas vara 70% pga det lägre vct.

$E_p = 70(1-0{,}41)^3 = 14{,}4$ GPa

$K=E_b/E_p = 70/14{,}4=4{,}9$

$$E_{btg}= \frac{0{,}33+1{,}67 \cdot 4{,}9}{1{,}67+0{,}33 \cdot 4{,}9}\ 14{,}4 = \mathbf{37{,}3\ GPa}$$

Konstruktionsregler-94 anger 36,0 GPa.

b: Med 4% extra luft

Hållfastheten sänks med 27% motsvarande 16,2 MPa.

Hållfasthetssänkningen motsvarar 16,2/5=3,2 hållfasthetsklasser.

Cementhaltsökningen är $30 \cdot 3{,}2=96$ kg/m^3.

Nytt vct=170/(425+96)=170/521=0,33

Ny cementpastahalt är; $V_p=(170+0{,}33 \cdot 521+60)/1000=40{,}2\%$.

Vb=59,8%

$$P_p= \frac{521 \cdot 0{,}33-0{,}19 \cdot 0{,}65 \cdot 521+60}{0{,}33 \cdot 521+521 \cdot 0{,}33+60} = 0{,}415$$

Hydratationsgraden antas vara 65%

$E_p=70(1-0{,}415)^3=14{,}0$ GPa

K=70/14,0=5

$$E_{btg} = \frac{0{,}40+1{,}60\cdot 5}{1{,}60+0{,}40\cdot 5}\ 14{,}0 = \mathbf{32{,}7\ GPa}$$

E-modulminskningen är 4,6 GPa, dvs 4,6/4=1,2 GPa per procentenhet ökad lufthalt.

SLUTSATS: E-modulen minskas med ca 3% för varje extra procentenhet luft utöver 2% i betongen.

Litteratur

/1/ R.A. Helmuth; D.H.Turk: Elastic Moduli of Hardened Portland Cement and Tricalcium Silicate Pastes: Effect of Porosity. Highway Research Board Special Report 90, 1966.

Boverket: Konstruktionsregler-94. Revidering av BBK 79 till BBK 94

II: Samband mellan spräckhållfasthet och enaxiell draghållfasthet

I BBK 79 avsnitt 7.3.3.1 anges att draghållfastheten är 2/3 (67%) av spräckhållfastheten. Denna relation bibehålls i förslag till BBK 94. Nedan visar att detta är en mycket konservativ regel. Den verkliga proportionalitetskonstanten är av storleksordningen 0,85 à 0,9 vid 15 cm spräckprover medan det lägre värdet 0,65 möjligen stämmer bättre för 10 cm spräckprover.

1. Teoretiskt

Sambandet mellan spräck- och draghållfastheterna har studerats av Modéer /1/ genom användning av Hillerborgs brottmekaniska teori.
Sambandet är beroende av relationen mellan provets storlek W och betongens karakteristiska längd l_{ch} vilken definieras:

$$l_{ch}=E\cdot G_f/f_t^2$$

där G_f=brottenergin.

Resultatet av Modéers analys visas i Fig 1. Spräckhållfastheten är alltid högre än den enaxiella draghållfastheten. Vid ett förhållande W/l_{ch} som närmar sig 1 blir de bägge hållfastheterna lika höga.
l_{ch} beror på betongens hållfasthetsnivå. Exempel på sambandet mellan tryckhållfasthet och l_{ch} ges i Fig 2 som tagits ur /2/. Ungefär följande värden gäller enligt denna rapport:

f_c=44 MPa; l_{ch}= 0,47 m
f_c=62 MPa; l_{ch}= 0,42 m
f_c=75 MPa; l_{ch}= 0,37 m
f_c=92 MPa; l_{ch}= 0,27 m

Andra undersökningar, tex /3/ visar att l_{ch} är av storleksordningen 0,3 m för vct 0,4 á 0,5 och 0,5 m för vct 0,7.

a: Om ett generellt värde på l_{ch}=0,4 m väljs fås följande samband mellan draghållfasthet och spräckhållfasthet för olika provkroppsstorlekar (SS 13 72 13 tillåter 15 cm kuber, Φ15 cm cylindrar och 10 cm prismor):

10 cm: W/l_{ch}= 0,1/0,4 =0,25.	Draghållf/spräckhållf=	**0,70**
15 cm: W/l_{ch}= 0,15/0,4=0,37.	-"-	**0,85**

b: Om man låter l_{ch} vara vct-beroende enligt l_{ch}=0,04+0,65·vct fås följande värden:

10 cm: vct=0,4: W/l_{ch}=0,1/0,3= 0,33. Draghållfasthet/spräckhållfasthet=**0,80**
vct=0,5: W/l_{ch}=0,1/0,37=0,27. -"- **0,70**
vct=0,7: W/l_{ch}=0,1/0,5= 0,2. -"- **<0,5**

15 cm: vct=0,4: W/l_{ch}=0,15/0,3= 0,50. Draghållfasthet/spräckhållfasthet=**0,90**
vct=0,5: W/l_{ch}=0,15/0,37=0,41. -"- **0,85**
vct=0,7: W/l_{ch}=0,15/0,5= 0,30. -"- **0,75**

Exakt vilken relation som skall användas sammanhänger alltså med den aktuella betongens sprödhet; Ju högre sprödhet, desto lägre värde på l_{ch} och desto lägre draghållfasthet i relation till spräckhållfastheten. Provstorlekar understigande 10 cm bör uppenbarligen aldrig användas för bestämning av spräckhållfasthet.

Följande generella samband kan möjligen användas:

10 cm spräckprov: Draghållfasthet/spräckhållfasthet≈ 0,65
15 cm spräckprov: -"- ≈ 0,85

2. Empiriskt

Exempel på samband mellan drag-och tryckhållfasthet visas i Fig 3 /4/.

Flera forskare har som synes funnit ett relativt linjärt samband mellan drag- och spräckhållfastheterna:

$$f_{drag} = A + B \cdot f_{spräck}$$

Proportionalitetskonstanten B varierar mellan ca 0,9 och ca 1.
En författare har funnit ett krökt samband där draghållfastheten minskar med ökad spräckhållfasthet. Detta samband gäller dock cementbruk.

Enligt CEB-FIP Model Code gäller proportionalitetskonstanten 0,9 generellt för all betong oavsett dess hållfasthetsnivå.

Litteratur:

/1/ Matz Modéer: A fracture mechanics approach to failure analyses of concrete materials. Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-1001, 1979.

/2/ Akbar Haghpassand: Brottmekaniska parametrar hos normal och högpresterande betong. Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-5024, 1992.

/3/ Per-Erik Petersson: Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials. Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-1006, 1981.

/4/ Betonghandbok, Del Material, Svensk Byggtjänst 1980.

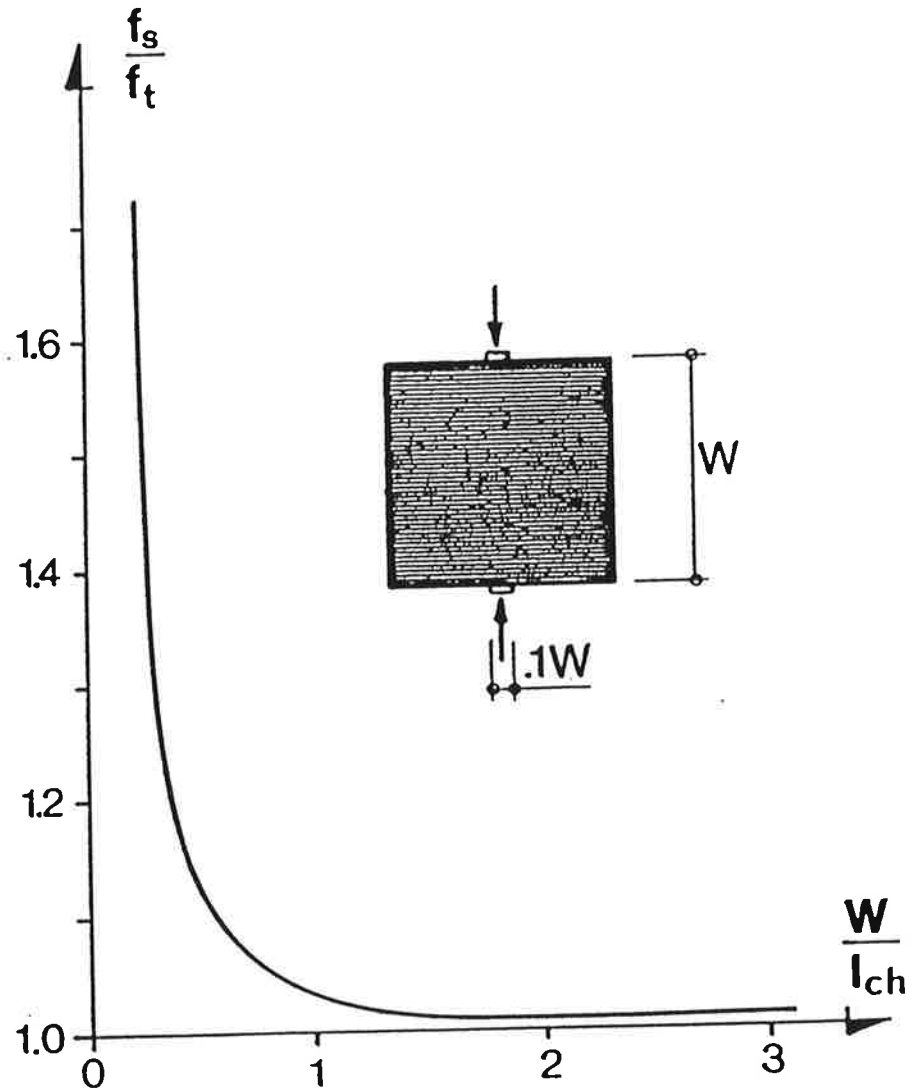


Fig 1: Relationen mellan spräckhållfasthet (f_s) och draghållfasthet (f_t) som funktion av spräckprovets storlek /1/.

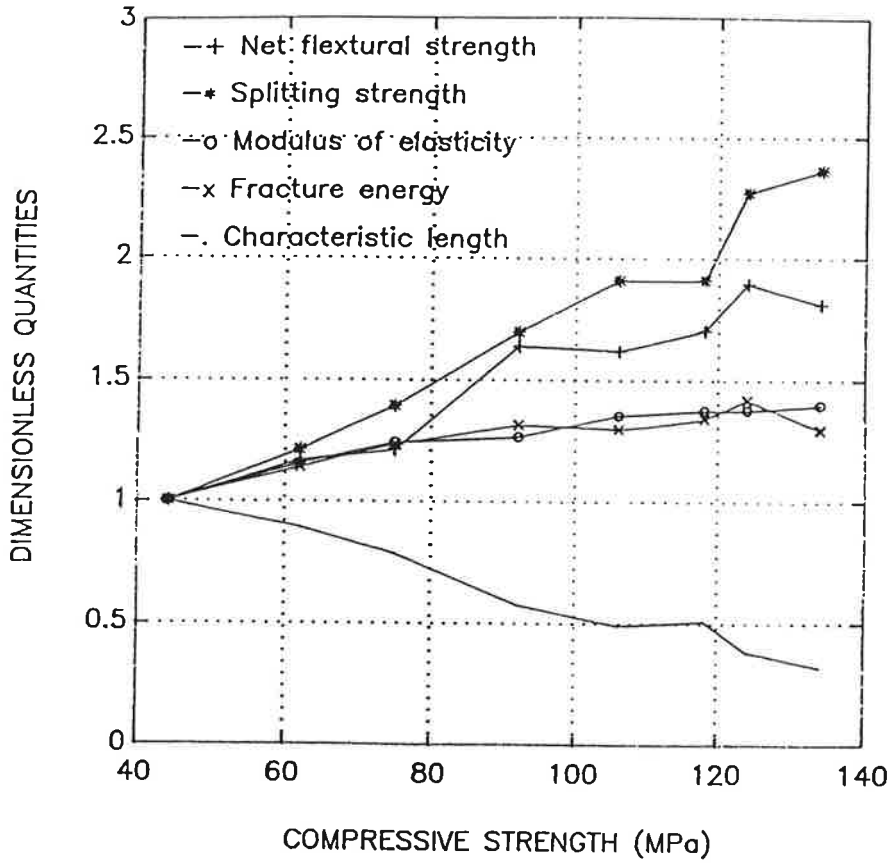


Fig 2: Samband mellan tryckhållfasthet och karakteristisk längd /3/

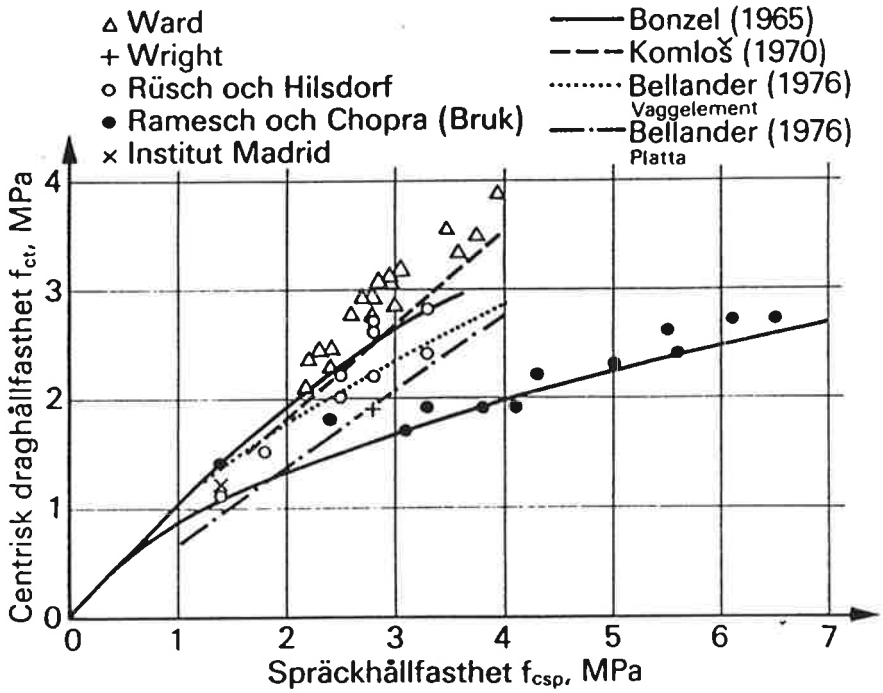


Fig 3: Samband mellan centrisk draghållfasthet och spräckhållfasthet enligt en sammanställning i /4/.

Boverket: Konstruktionsregler-94.Revidering av BBK 79 till BBK 94

III: Samband mellan tryckhållfasthet och spräckhållfasthet resp draghållfasthet

1. Spräckhållfasthet versus tryckhållfasthet

I rapport /1/ redovisas mätningar av cylindertryckhållfasthet och spräckhållfasthet för 70 olika betonger med följande variationsområde:

* Cylindertryckhållfasthet mellan ca 30 MPa och 55 MPa
* Vct mellan 0,35 och 0,60
* Ballasthalt mellan 62% och 72%
* Stenandel (>8 mm) mellan 40 och 60%
* Cementhalt mellan 280 kg/m3 och 537 kg/m3
* Flera olika grusgraderingar
* Ålder mellan 8 och 400 dygn

Provkroppsstorleken var Φ10x20 cm för spräckprovning och Φ15x30 cm för tryckprovning. Proverna var torra vid provningen.

Mätvärdena med variationskoefficienter redovisas i BILAGA som hämtats från /1/. Variationskoefficienten är ungefär dubbelt så hög vid bestämning av spräckhållfasthet som vid bestämning av kubhållfasthet.

Följande regressionssamband erhölls:

$$\mathbf{f_{spräck,10\ cm}/f_{cylinder,15\ cm} = 0{,}139 - 8{,}75\cdot 10^{-4}\cdot f_{cylinder,15\ cm}} \qquad r^2 = -0{,}44 \qquad (1)$$

Detta innebär att spräckhållfastheten minskar något med ökad tryckhållfasthet.

(ett potensuttryck av typen $f_{spräck}/f_{cylinder}=A\cdot[f_{cylinder}]^B$ ger inte högre korrelationskoefficient. Sambandet blir:

$$f_{spräck,10\ cm}/f_{cylinder,15\ cm} = 0{,}41\cdot[f_{cylinder,\ 15\ cm}]^{-0{,}37}$$

Eller:

$$f_{spräck,\ 10\ cm} = 0{,}41\cdot[f_{cylinder,\ 15\ cm}]^{0{,}63} \qquad (1')$$

En 10 cm spräckprovkropp har ca 15 % högre spräckhållfasthet än en 15 cm provkropp. Då gäller följande samband ur (1):

$$\mathbf{f_{spräck,15\ cm}/f_{cylinder,15\ cm} = 0{,}121 - 7{,}61\cdot 10^{-4}\cdot f_{cylinder,15\ cm}} \qquad (2)$$

Följande relation mellan kub- och cylindertryckhållfasthet för torra prover råder:

$$f_{kub,15\ cm} = 1{,}17 \cdot f_{cylinder,15\ cm} \qquad (3)$$

Samband (1) och (2) övergår då till:

$$\mathbf{f_{spräck,10\ cm}/f_{kub,15\ cm} = 0{,}119 - 6{,}39 \cdot 10^{-4} \cdot f_{kub,15\ cm}} \qquad (4)$$

$$\mathbf{f_{spräck,15\ cm}/f_{kub,15\ cm} = 0{,}103 - 5{,}56 \cdot 10^{-4} \cdot f_{kub,15\ cm}} \qquad (5)$$

Uttryckt som potensfunktion enligt Ekv (1´) fås:

$$\mathbf{f_{spräck,15\ cm} = 0{,}33 \cdot [f_{kub,15\ cm}]^{0{,}63}} \qquad (5')$$

Petersons /2/ anger nästan exakt samma relation:

$$\mathbf{f_{spräck,15\ cm} = 0{,}27 \cdot [f_{kub,15\ cm}]^{0{,}66}} \qquad (5'')$$

Samband mellan cylindertryckhållfasthet och spräckhållfasthet enligt sambanden ovan tabelleras i Tabell 1 och 2. Tabellvärden markerade med fet stil är de enda som verkligen uppmätts. Övriga värden är omräknade.

I Fig 1 visas en litteratursammanställning över samband mellan spräckhållfasthet baserad på 15 cm cylindrar och kubhållfasthet. Överensstämmelsen mellan Tabell 2 och medelvärdena ur Fig 1 är god.

Tabell 1: Samband mellan spräckhållfasthet och cylindertryckhållfasthet enligt ekv (1) och (2)

$f_{cylinder,15\ cm}$ (MPa)	**$f_{spräck,10\ cm}$ (MPa)** Ekv(1)	$f_{spräck,15\ cm}$ (MPa) Ekv(2)
20	**2,43**	2,11
25	**2,93**	2,55
30	**3,38**	2,95
35	**3,79**	3,30
40	**4,16**	3,62
45	**4,48**	3,90
50	**4,76**	4,15
55	**5,00**	4,35
60	**5,19**	4,52
65	**5,34**	4,65
70	**5,44**	4,74
75	**5,50**	4,79
80	**5,52**	4,81

Tabell 2: Samband mellan spräckhållfasthet och kubhållfasthet enligt ekv (4) och (5)

$f_{kub,15\ cm}$ (MPa)	$f_{spräck,10\ cm}$ (MPa) Ekv(4)	$f_{spräck,15\ cm}$ (MPa) Ekv(5)	$f_{spräck,15\ cm}$ (MPa) Ekv(5´)
20	2,12	1,84	2,18
25	2,58	2,23	2,51
30	2,99	2,59	2,81
35	3,38	2,92	3,37
40	3,74	3,23	3,37
45	4,06	3,51	3,63
50	4,35	3,76	3,88
55	4,61	3,98	4,12
60	4,84	4,18	4,35
65	5,03	4,35	4,58
70	5,20	4,49	4,80
75	5,33	4,60	5,01
80	5,43	4,68	5,22

2. Enaxiell draghållfasthet versus tryckhållfasthet

Den enaxiella draghållfastheten är ca 15 % lägre än spräckhållfastheten hos 15 cm cylindrar; se avsnitt II ovan.

Då gäller enligt ekv(5):

$$f_{drag}/f_{kub,15\ cm} = 0{,}088 - 4{,}73 \cdot 10^{-4} \cdot f_{kub,15\ cm}$$
(6)

Denna ekvation har tabellerats i Tabell 3.

Tabell 3: Samband mellan draghållfasthet och kubhållfasthet enligt ekv (6)

$f_{kub,15\ cm}$ (MPa)	f_{drag} (MPa)	Enligt förslag till Konstr.regler 94
20	1,57	1,20
25	1,90	1,40
30	2,21	1,60
35	2,50	1,80
40	2,76	1,95
45	3,00	2,10
50	3,22	2,25
55	3,41	2,40
60	3,58	2,50
65	3,72	
70	3,84	2,60
75	3,94	
80	4,01	2,65

Konstruktionsreglerna ger alltså betydligt lägre draghållfastheter. Detta beror främst på att relationen spräck- till draghållfasthet överskattas.

Litteratur:

/1/ Göran Fagerlund; Bo Larsson: Betongs slaghållfasthet. CBI Forskning Fo 4:79, 1979

/2/ Nils Petersons: Hållfasthetssamband. Bidrag till revidering av BBk 79 till BBK 94. 1993.

/3/ Betonghandbok del "Material", Kapitel "Hållfasthet". Svensk Byggtjänst, 1980.

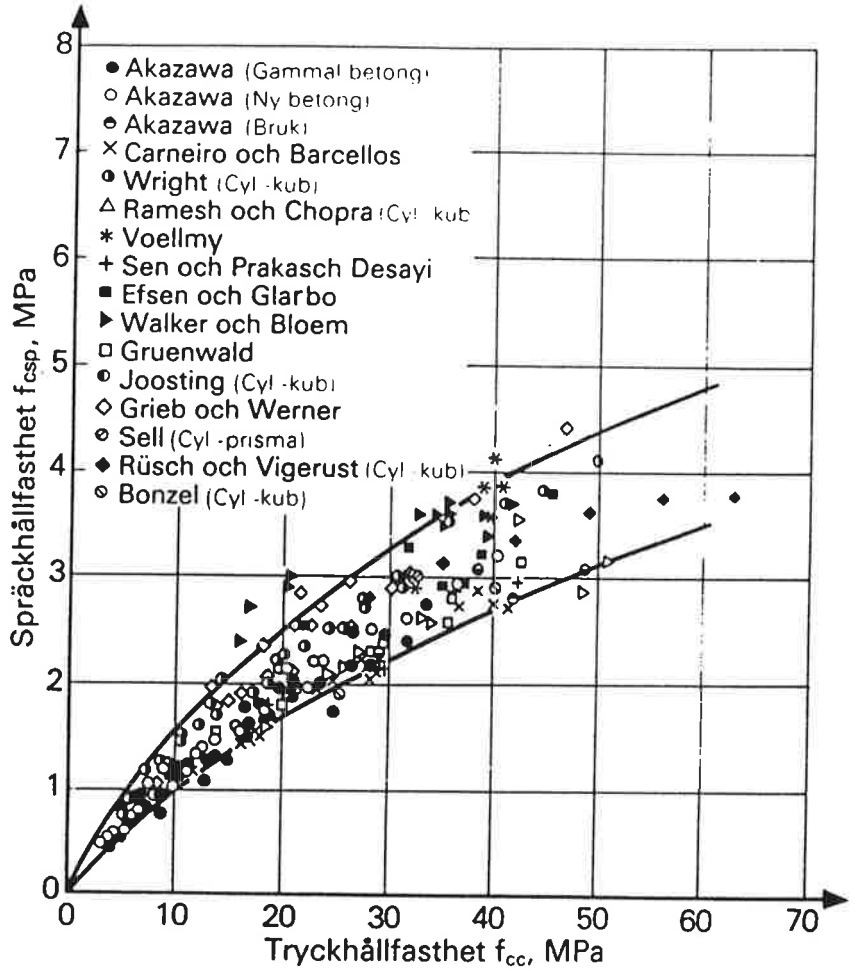


Fig 1: Samband mellan spräck- och kubhållfasthet /3/.

BILAGA: Udrag ur rapport /1/.

Delstudie litt	Btg-serie litt	Spräckhållfasthet		Tryckhållf. cylinder		Tryckhållf. kub		σ_{SPR}/σ_{TR}	Proport.gräns tryck-cylinder absolutvärde		Proport.gräns tryck-cylinder σ_P/σ_{BR}		Studshammarvärde 6)	
		$\bar{x}$ 1) MPa	v 2) %	$\bar{x}$ MPa	v %	$\bar{x}$	v %	$\bar{x}$	$\bar{x}$ MPa	v %	$\bar{x}$	v %	$\bar{x}$	v %
1;2	11	-	-	44,5	7/	53,0	0,8	-	-	-	-	-	-	-
	12			34,9		41,5	8,4							
	21			43,2		51,4	2,7							
	22			36,1		43,0	0,5							
3;4;4a	11A	4,33	1,2	45,2	1,5	-	-	0,096	-	-	-	-	-	-
	12A	3,77	13,3	38,7	5,2			0,097						
	21A	3,92	15,3	47,5	2,9			0,083						
	22A	3,64	13,7	33,1	1,2			0,110						
5	5-1	4,38	3,9	51,5	5,2	-	-	0,085	43,4	4,9	0,84	0,7	38,5	7,9
	5-2	4,62	13,0	48,4	3,9			0,095	39,3	7,4	0,81	4,4	36,3	6,6
	5-3	4,01	13,0	46,4	3,0			0,086	37,1	7,7	0,80	5,4	37,3	7,4
	5-4	4,27	13,6	44,0	4,8			0,097	34,4	4,5	0,78	3,7	37,3	7,0
	5-5	4,29	4,2	48,7	0,6			0,088	42,8	0,4	0,88	0	37,5	10,4
	5-6	3,75	5,6	40,8	4,2			0,092	32,8	0,2	0,81	4,4	35,3	8,6
	5-7	3,86	6,2	40,3	5,2			0,096	32,3	5,1	0,80	0	34,9	7,4
	5-8	3,74	16,3	38,6	7,8			0,097	31,2	10,3	0,81	2,9	34,8	7,9
7	7-1	4,50	5,1	48,6	1,6	-	-	0,093	39,3	3,4	0,81	4,5	38,7	8,9
	7-2	4,31	3,2	46,8	6,4			0,092	39,3	10,2	0,83	1,7	37,0	6,4
	7-2A	4,66	7,5	43,8	5,0			0,106	36,8	8,7	0,84	4,5	36,9	7,9
	7-3	4,45	3,4	46,6	0,6			0,095	37,2	4,0	0,80	4,3	34,7	9,4
8	8-1	4,00	10,8	43,9	4,1	-	-	0,091	36,0	5,9	0,83	0,7	37,1	8,2
	8-1A	5,24	0,9	45,0	0,2			0,116	37,5	1,2	0,83	2,4	36,6	6,4
	8-2	4,29	10,3	47,8	0,8			0,090	37,3	7,3	0,78	7,4	36,7	7,8
	8-3	4,60	2,4	43,2	7,9			0,106	35,0	7,9	0,81	0	37,3	6,0
	8-3A	4,73	2,1	45,5	3,5			0,104	37,6	1,5	0,83	2,1	36,6	9,6
9	9-1 3)	4,29	10,3	47,8	0,8	-	-	0,090	37,3	7,3	0,78	7,4	36,7	7,8
	9-2	4,05	10,1	45,3	4,4			0,089	37,8	5,8	0,84	1,4	35,7	10,8
	9-3	5,05	2,6	45,7	2,6			0,111	37,8	2,3	0,83	1,2	36,8	5,4
	9-4	4,56	6,1	47,4	1,5			0,096	38,9	3,9	0,82	2,5	36,6	8,0
10	10-0	5,47	0,5	54,5	5,1	-	-	0,100	41,2	10,2	0,76	9,2	39,2	7,2
	10-1 4)	4,29	4,2	48,7	0,6			0,088	42,8	0,4	0,88	0	37,5	10,4
	10-2	3,88	14,9	39,1	0,5			0,099	33,1	0,3	0,85	0,8	36,9	8,6
	10-3	4,53	4,4	54,6	1,6			0,083	39,3 9)	17	0,72 9)	17!	39,9	5,3
	10-4 5)	4,38	3,9	51,5	5,2			0,085	43,4	4,9	0,84	0,7	38,5	7,9
	10-5	3,46	2,9	41,8	2,4			0,083	33,8	17,4	0,81 9)	14,0	34,7	11,3
	10-6	3,47	8,9	34,2	6,4			0,101	27,6	10,2	0,81	9,6	32,1	14,6
	10-7	4,34	8,5	51,7	2,7			0,084	40,5	6,9	0,76	8,0	40,0	5,1
	10-8	4,17	1,7	49,8	4,0			0,084	42,2	4,6	0,85	2,5	36,7	4,6
	10-9	4,18	2,9	43,1	2,6			0,097	37,1	0,9	0,86	1,6	33,7	5,6
	10-9A	4,33	3,7	40,6	3,4			0,107	36,5	3,4	0,90	0	34,9	4,5
	10-10	3,07	2,3	29,6	4,1			0,104	26,5	4,4	0,89	1,3	30,1	7,8
	10-11	4,23	3,1	54,0	6,3			0,078	46,9	5,1	0,87	1,1	41,0	8,0
	10-12	4,35	7,8	49,0	3,3			0,089	42,8	5,1	0,87	2,4	39,9	6,0
	10-13	4,55	13,2	46,5	6,2			0,098	41,2	0,1	0,86	1,6	37,1	7,1
13	13-1	4,76	5,0	45,3	2,4	-	-	0,105	34,7	0,9	0,77	3,0	39,8	4,9
		$\bar{x}$ =	6,9	$\bar{x}$ =	3,5				$\bar{x}$ =	5,5	$\bar{x}$ =	3,6	$\bar{x}$ =	7,7

1) Medelvärde
2) Variationskoefficient; $v=(s/\bar{x})\cdot 100$ där s är standardavvikelsen

Delstudie litt	Btg-serie litt	Ekviv. test-ålder	Lagrings-metod 1)	Spräckhållf. $\bar{x}$ 2) MPa	Spräckhållf. v 3) %	Tryckhållfasthet cylinder $\bar{x}$ MPa	Tryckhållfasthet cylinder v %	σ_{SPR}/σ_{TR} $\bar{x}$	Studshammar värde 4) $\bar{x}$	Studshammar värde 4) v %
15	15-1	8	1	5,13	5,8	43,1	4,9	0,119	30,1	6,8
		16	1	5,03	4,8	47,2	2,8	0,107	34,1	6,2
		29	1	4,11	20,4	47,5	4,4	0,087	33,7	6,3
			2	5,67	3,0	55,3	9,4	0,103	-	-
		90	1	5,02	7,2	52,4	6,3	0,096	39,7	6,0
	15-2	8	1	4,62	8,0	40,2	4,2	0,115	31,4	5,1
		16	1	5,20	5,2	43,5	1,1	0,120	32,9	8,1
		29	1	4,59	11,1	46,9	4,5	0,098	33,1	7,7
			2	5,55	15,3	52,5	3,6	0,106	-	-
		90	1	5,38	10,0	49,5	2,8	0,109	39,5	6,6
	15-3	8	1	4,89	10,4	41,0	3,7	0,119	30,5	8,9
		16	1	5,33	5,4	43,9	3,2	0,123	28,4	12,1
		29	1	5,12	12,9	47,8	3,6	0,107	32,1	11,0
			2	5,12	7,0	50,1	5,8	0,102	-	-
		90	1	4,77	14,3	48,9	7,0	0,098	37,9	6,7
16	16-1	8	1	4,49	4,0	39,8	3,0	0,113	27,2	11,1
		16	1	4,77	5,2	42,3	0,7	0,113	27,1	7,0
		29	1	4,82	5,2	48,1	3,7	0,100	29,5	9,9
			2	5,51	8,0	50,8	13,6	0,108	-	-
		90	1	5,71	11,6	54,2	10,9	0,105	39,2	4,7
	16-2	8	1	4,37	4,8	37,3	1,9	0,117	25,8	12,8
		16	1	3,89	10,0	41,5	2,7	0,094	24,9	10,1
		29	1	4,89	3,1	47,3	0,6	0,103	29,5	10,1
			2	4,99	10,8	54,8	1,2	0,091	-	-
		90	1	5,07	6,7	55,0	0,8	0,092	37,5	5,4
	16-3	8	1	4,23	1,2	36,0	1,7	0,118	25,8	9,4
		16	1	4,56	6,1	38,4	5,7	0,119	27,4	11,5
		29	1	4,85	6,4	43,7	4,1	0,111	31,6	5,4
			2	4,62	11,5	47,5	3,4	0,097	-	-
		90	1	5,10	3,5	49,1	5,3	0,104	37,9	6,8
				$\bar{x}$ =	8,0	$\bar{x}$ =	4,2		$\bar{x}$ =	8,2

1) Se BILAGA 2, Fig B2.13
2) Medelvärde
3) Variationskoefficient; $v=(s/\bar{x})\cdot 100$ där s är standardavvikelse
4) 27 värden för varje betongprov.

Boverket: Konstruktionsregler-94. Revidering av BBK79 till BBK94

IV: Avsnitt i BBK 94 om Mineraliska tillsatsmaterial

Förslaget till text som presenteras nedan bygger på Boverkets "Förslag till remissutgåva BBK94 Tredje utkastet" daterat 1993-02-01. Text som är oförändrad skrivs kursivt. I **BILAGA 1 och 2** görs beräkningar för bedömning av rimliga maxnivåer på inblandning. Nivåerna baseras på de olika tillsatsmaterialens innehåll av kiselsyra och kalciumhydroxid.

TEXTFÖRSLAG

"7.2.3 Mineraliska tillsatsmaterial

Följande mineraliska tillsatsmaterial får användas i betong:

1: Silikastoft som avskiljs från processgaser som bildas vid produktion av kiseljärn eller metallisk kisel.

2: Flygaska från storskalig förbränning av stenkol. Askan skall vara avskild i rökgasfilter och får inte innehålla svavel- eller ammoniumhaltiga produkter från rökgasavsvavling.

3: Mald granulerad masugnsslagg.

Tillsats av mineraliska tillsatsmaterial får endast ske i betong med cement av typ P.

Mineraliska tillsatsmaterial indelas med hänsyn till reaktivitet och användningssätt i två klasser, A och B. Tillsatsmaterial i klass A jämställs med bindemedel medan tillsatsmaterial i klass B jämställs med ballast. Silikastoft och granulerad masugnsslagg är nästan undantagslöst av Klass A.

Ett tillsatsmedels reaktivitet bedöms genom en jämförande provning av hållfastheten av cementbruk med olika sammansättning. Provningsprinciper och bedömningskriterier ges i Bilaga.

Provningsomfattningen för mineraliska tillsatsmaterial skall vara minst lika hög som för cement. Vid risk för stora variationer i egenskaperna skall provningsfrekvensen ökas i erforderlig grad.

Tillsatsmaterialets fysikaliska egenskaper och dess kemiska sammansättning liksom variationsområdet för dessa egenskaper redovisas i en särskild egenskapsdeklaration. Fysikaliska egenskaper som alltid skall deklareras är:

* Specifik area och/eller kornstorleksfördelning
* Glashalt (gäller i första hand masugnsslagg. Glashalten har dock även stor betydelse för flygaskans reaktivitet)

Egenskaper som alltid skall deklareras anges i Tabell 7-1. Dessutom bör halten reaktiva oxider (CaO, SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, Na_2O, K_2O) anges. Detta är särskilt viktigt för flygaska

och granulerad masugnsslagg.

Variationer i tillsatsmaterialens kemiska och fysikaliska sammansättning bör begränsas så att inte onormala och svårkontrollerbara variationer i betongens egenskaper uppträder.

För att uppfylla kraven i avsnitt 7.2.1 bör de i Tabell 7-1 angivna gränsvärdena inte överskridas. De angivna gränsvärdena gäller under förutsättning att de har bestämts med samma provningsmetoder som de som *tillämpas vid analys av cement.*

Tabell 7-1: Gränsvärden (viktprocent av torkat material) för vissa kemiska föroreningar i tillsatsmaterial

	Silikastoft	*Flygaska*	Masugnsslagg
Cl	*0,20*	*0,10*	0,10
SO_3	*4*	*4*	4
CaO (fri kalk)	*2*	*2*	3)
MgO	*5*	*5*	3)
Glödförlust	*5*	*5*	inget krav
Ekv. alkalihalt[1)]	0,6[2)]	0,6[2)]	0,6[2)]
Glashalt	4)	4)	5)

1) $Na_2O+0,66 \cdot K_2O$
2) Detta värde gäller enbart när risk för alkali-ballastreaktioner föreligger.
3) Tillåtna mängder baseras på en provning av volymbeständighet hos en blandning av 65 % slagg och 35 % portlandcement. Resultat bedöms enligt B1- Utgåva 2.
4) Inga krav. Silikastoft består normalt av 100 % glas. Flygaskans glashalt kan vara starkt varierande. Ju högre glashalt desto reaktivare flygaska. Låg glashalt innebär dessutom att halten kristallin kvarts är hög viket innebär hälsorisker.
5) Glashalten bör normalt överstiga 90 %. Lägre glashalter innebär att granuleringen är bristfällig vilket leder till minskad reaktivitet.

Tillverkning av betong med tillsatsmaterial bör ske vid betongfabrik som uppfyller fordringarna för tillverkningsklass I enligt avsnitt 8.3.1.2.

Vid användning av tillsatsmaterial förutsätts att man genom förundersökning kontrollerar att tillsatsmaterialet tillsammans med övriga delmaterial och aktuell utrustning ger avsedd effekt och att övriga egenskaper hos betongen inte påverkas menligt. Särskilt bör betongens hållfasthetsutveckling, konsistens, arbetbarhet och i förekommande fall frostbeständighet studeras. Förundersökningen bör utföras enligt avsnitt 9.2.1 enligt samma principer som de som *gäller för andra delmaterial.*
Förundersökningen bör utföras vid minst två olika betongtemperaturer svarande mot den högsta och lägsta temperatur som kan förekomma i betongmassan under och efter gjutningen.

Betongens vattenbindemedelstal, vbt, beräknas enligt följande formel

$$vbt = \frac{w}{c + \beta \cdot s}$$

där
w vattnets vikt
c cementets vikt
β effektivitetsfaktor som sätts till 1 för silikastoft och granulerad masugnsslagg och till 0,3 för flygaska i klass A.
För alla tillsatsmaterial i klass B sätts $\beta = 0$.
s tillsatsmaterialets vikt

Den totala mängden tillsatsmaterial i betongen bör inte överstiga följande värde räknat i procent av vikten cement:

* Silikastoft ,10% (Max 5 % i Miljöklass A4, "Extremt armeringsaggressiv miljö".
* Flygaska, 35 %. (0 % i Miljöklass B4, "Mycket betongaggressiv miljö")
* Granulerad masugnsslagg, 100 %. (Före användning av granulerad masugnsslagg i miljöklasser A4 och B4 måste särskild utredning genomföras med syfte att dokumentera effekten på livslängden).

Vid sammanställning av resultat från den fortlöpande provningen redovisas hållfasthetsvärden och resultat från frysprovning *för betong med och utan tillsatsmaterial var för sig. Vid bedömning av antalet uttagna* hållfasthetsprover *behandlas betong med och utan tillsatsmaterial som om de tillhörde olika hållfasthetsklasser.*

Vid härdning av nygjuten betong med inblandning av tillsatsmaterial bör det ökade *behovet av en riklig tillgång till fukt* i jämförelse med betong utan tillsatsmaterial *särskilt beaktas.*
Inblandning av tillsatsmaterial kan leda till långsammare värmeutveckling och hållfasthetstillväxt än hos betong utan tillsatsmaterial. *Detta förhållande bör särskilt beaktas vid låg gjuttemperatur med risk för tidig frysning och vid bedömning av lämplig tidpunkt för formrivning.*

Ett mineraliskt tillsatsmaterial som är typgodkänt och tillverkningskontrollerat enligt reglerna i typgodkännandet bedöms *vara ett lämpligt delmaterial under förutsättning av att det används enligt den produktredovisning varpå typgodkännandet baseras.*

För typgodkännande och tillverkningskontroll av mineraliska tillsatsmaterial utfärdas särskilda regler.

Bilaga: Regler för reaktivitetsprovning av mineraliska tillsatsmaterial. Bedömningskriterier.

Ett mineraliskt tillsatsmaterials reaktivitet dokumenteras genom en provning av dess bidrag till hållfastheten hos cementbruk. Metoden innebär att hållfastheten för minst tre av de i Tabell 2 angivna kombinationerna av tillsatsmaterial och cement ställs i relation till hållfastheten hos ett rent cementbruk. Vid provning används följande kombinationer:

* Silikastoft: (A), (B) och (C)
* Flygaska: (A), (C) och (D)
* Masugnsslagg: (A), (D) och (E)

Provningen utförs med ett i Sverige vanligen förekommande Standard Portlandcement om inte annat överenskommits.

Kravnivåer för att tillsatsmaterialet skall godtas som klass A framgår av Tabell 2.

Tabell 2: Bindemedelskombinationer och erforderliga hållfasthetsvärden för klassificering av tillsatsmaterial.

Kombination	Tillsatsmaterial Vikt-%	Cement Vikt-%	Relativ hållfasthet i % efter[1)] 3 dygn	28 dygn	91 dygn
(A)	0	100	(100)	100	100
(B)	5	95	(95)	95	100
(C)	10	90	(85)	90	95
(D)	30	70	(60)	70	85
(E)	70	30	(30)	60	80

1) Angivna värden motsvarar förutsatta lägsta värden på den relativa hållfastheten för ett tillsatsmaterial i klass A. Värdena inom parentes tjänar endast som information och motsvarar vad som uppnås med ett icke reaktivt (inert) material.

BILAGA 1: Bedömning av maximalt tillåten mängd tillsatsmaterial baserat på max tillåten reduktion av kalciumhydroxidhalten

Den maximala mängden tillsatsmaterial kan ev överslagsmässigt bestämmas av villkoret att enbart en viss andel av den av cementet frigjorda portlanditen ($Ca(OH)_2$) får bindas genom puzzolanreaktionen med tillsatsmaterialet. Denna bundna mängd beräknas approximativt genom en stökiometrisk beräkning av enkel typ för de ingående cement- och puzzolanreaktionerna.

Beteckningar:

Mineral	Formel	Molvikt
C_3S	$3CaO \cdot SiO_2$	228
C_2S	$2CaO \cdot SiO_2$	172
C_4AF	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	486
S	SiO_2	60
H	H_2O	18
CH	$Ca(OH)_2$	74
$C_3S_2H_3$	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ (Cementgel)	342

1: C_3S-reaktioner:

<u>Cementreaktion</u>: $2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$

<u>Puzzolanreaktion</u>: $3CH + 2S \rightarrow C_3S_2H_3$

All CH konsumeras när relationen S/C_3S = 1 mol/1 mol

Dvs, viktförhållandet $S/C_3S = SiO_2 / 3CaO \cdot SiO_2$ vid fullständig reaktion av all CH är:

60 / 228 = 0,26

2: C_2S-reaktioner:

<u>Cementreaktion</u>: $2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$

<u>Puzzolanreaktion</u>: $3CH + 2S \rightarrow C_3S_2H_3$

All CH konsumeras när relationen S/C_2S=2 mol/6 mol.

Viktförhållandet S/C_2S är då:

$2 \cdot 60 / 6 \cdot 172 = 0,116$

3: C_4AF-reaktion:

<u>Cementreaktion</u>: $C_4AF+2CH+10H \rightarrow C_3AH_6+C_3FH_6$

Dvs C_4AF undandrar CH från systemet. 1 mol C_4AF konsumerar 2 mol CH.

Molförhållandet S/C4AF blir enligt puzzolanreaktionen -1 mol/1,5 mol.

Viktförhållandet S/C4AF är då:

-60/1,5·486=-0,082

4: CS-reaktion inom tillsatsmaterialet själv:

$3C + 3H + 2S \rightarrow C_3S_2H_3$

Dvs 3 mol C reagerar med 2 mol S.

Reaktionens viktförhållande C/S blir då:

3·56 /2·60 = 1,40

5: Typiska portlandcement.

Ett typiskt portlandcement har följande viktandelar kalciumsilikater räknat på cementklinkern (återstoden är C_3A och C_4AF):

C_3S: ca 65 %
C_2S: ca 20 %
C_4AF: ca 10 %

Puzzolanreaktionens viktförhållande räknat på klinkervikten är då enligt 1:, 2: och 3: ovan vid fullständig reaktion av all CH:

S / cementklinker= 0,26·0,65 + 0,116·0,20 -0,082·0,1= 0,184 = 18,4 %.

Dvs en inblandning av ca 18 % ren kiselsyra i en normal portlandcementklinker innebär att i stort sett all portlandit kan reagera.

6: Inblandning av silikastoft:

Mängder C resp S är:

C (Dvs CaO) : ca 0 %
S (Dvs SiO_2) : ca 95 %.

Max dosering av silikastoft för fullständig reaktion av all portlandit är då ca:

18,4 /0,95 = 19,4 %.

Vid en inblandning av ca 19 vikt-% silikastoft räknat på portlandklinkern konsumeras alltså all portlandit vilket är riskabelt ur beständighetssynpunkt.

En rimlig maxdosering α motsvarar en 50-procentig reduktion av portlanditen i förhållande till portlanditmängden i en betong med samma mängd portlandcementklinker som summan av cementklinker och silikastoft i blandningen. Då fås:

$0{,}5\cdot(1-\alpha)\cdot 18{,}4/0{,}95=\alpha\cdot 100$ dvs, $\alpha=0{,}088=9$ %

Ett normalt portlandcement innehåller ca 90 vikt-% portlandklinker. Resterande ingredienser är ca 5 % gips och ca 5 % kalkstensfiller. Vissa portlandcement saknar kalkstensfiller varvid klinkerandelen ökar till ca 95 %. Maximal dosering av silikastoft räknat på cementvikten blir då 9/0,90=10 % à 9/0,95=9,5 %. Dvs:

Max 10 vikt-% silikastoft räknat på cementvikten.

Maximala halten silikastoft i bindemedlet (portlandcement+silikastoft) är då 10/110=9 %.

Max 9 vikt-% silikastoft räknat på totala bindemedlet.

(Vid fullständig reaktion av all portlandit blir maxdoseringen 19,4/0,9=21 vikt-% av cementet och 21/121=17 vikt-% av totala bindemedlet).

6: Inblandning av flygaska:

Mängder C resp S är:

S: ca 55 vikt-%
C: ca 4 vikt-%

Egenreaktionen konsumerar därför ca 4/1,4 = 3 % S.

Resterande halt S efter egenreaktionen är 52 %.

Max dosering för fullständig reaktion av all portlandit är ca:

18,4/0,52 = 35,4 %.

Vid en max tillåten reduktion av portlanditen av 50 % i förhållande till den rena cementklinkern fås följande maxdosering α i förhållande till cementklinkerns vikt:

$0{,}5\cdot(1-\alpha)\cdot 18{,}4/0{,}52=\alpha\cdot 100$ dvs $\alpha=0{,}15=15$ %

Flygaska är mindre reaktiv än silikastoft. Om man antar att enbart 50 % reagerar på lång sikt fås i stället maxdoseringen 15/0,5=30 vikt-% flygaska.

Om hänsyn tas till andra komponenter i cementet (ca 5 à 10 vikt-%) fås vid en maximal tillåten portlanditreduktion av 50 % följande maxdosering:

Max 33 vikt-% flygaska räknat på cementvikten.

Maximala halten flygaska i bindemedlet (portlandcement+flygaska) är då 33/133=25 %.

Max 25 vikt-% flygaska räknat på totala bindemedlet.

(Vid fullständig reaktion av all portlandit blir maxdoseringen 35/0,9=39 vikt-% av cementet och 39/139=28vikt-% av totala bindemedlet).

7: Inblandning av granulerad masugnsslagg

Mängder C resp S är:

C: ca 40 vikt-%
S: ca 35 vikt-%

Egenreaktionen konsumerar därför ca 40/1,4 = 28 % S.

Resterande halt S efter egenreaktionen är 7 vikt-%.

Max dosering av slagg räknat på vikten cementklinker för fullständig reaktion av all portlandit är:

18,4/0,07 = 263 %. Dvs, 263 % mer slagg än cementklinker kan användas.

Vid en max tillåten reaktion av enbart 50% av portlanditen i förhållande till den rena cementklinkern fås följande maxdosering α i förhållande till cementklinkerns vikt:

$0{,}5\cdot(1-\alpha)\cdot 18{,}4/0{,}07=\alpha\cdot 100$ dvs $\alpha=0{,}57=57$ %

Flygaska är mindre reaktiv än portlandklinker. Om man antar att max hydratationsgrad är 75 % fås maxdoseringen 57/0,75=76 %

När hänsyn tas till andra komponenter i cementet och vid 50 % tillåten reaktion av portlanditen gäller:

Max 85 vikt-% mald granulerd masugnsslagg räknat på cementvikten.

Maximala halten slagg i bindemedlet (portlandcement+slagg) är då 85/185=46 %:

Max 45 vikt-% mald granulerad masugnsslagg räknat på totala bindemedlet.

(Vid fullständig reaktion av all portlandit blir maxdoseringen 260/0,9=290 vikt-% av cementet eller 290/390=75 vikt-% av totala bindemedlet).

Analys av mätresultat (se avsnitt 8: nedan) visar att maxinblandningen kan vara lägre; ca 45 % räknat på cementvikten.

8. Jämförelse med mätningar

Silikastoft:

I Fig 1 visas en mätning av mängden portlandit i cementpasta som funktion av mängden inblandad silikastoft; /1/. Extrapolering av det linjära sambandet i området 0-12 % silikastoft visar att all portlandit konsumerats när silikastoftmängden är ca 20 vikt-%. Dvs, det teoretiska värdet som beräknats ovan överensstämmer nästan exakt med det uppmätta.

Flygaska:

Några exempel på den resterande portlandithalten (CH) vid hydratisering av flygaskacement i relation till potlandithalten (CH_0) i det portlandcement varpå flygaskacementet baseras visas i Fig 2; /2/. Relationen beror starkt på härdningstiden eftersom flygaskan har en mycket långsam hydratation. Följande värden gäller vid 180 dygn (OBS, flygaskahalten i figuren räknas på den totala bindemedelshalten. 10 % resp. 25 % av totala bindemedlet motsvarar således 0,1/0,9=11 % resp. 0,25/0,75=33 % av portlandcementvikten):

vct=0,5:	11% flygaska:	$CH/CH_0 = 0,85$
	33 % flygaska:	$CH/CH_0 = 0,56$
vct=0,7:	11 % flygaska:	$CH/CH_0 = 0,80$
	33 % flygaska:	$CH/CH_0 = 0,47$

Flygaskans kemiska sammansättning är okänd men den torde någorlunda väl överensstämma med de värden som användes ovan. Om man antar att total reaktion av all portlandit motsvarar en flygaskahalt av 35 vikt-% räknat på portlandcementet (se ovan) så motsvarar de uppmätta värdena på resterande portlandithalt att reaktionsgraden hos flygaskan är:

<u>11 % flygaska i bindemedlet</u>:

Fullständig reaktion av all flygaska ger $(CH_0-CH)/CH_0=1-CH/CH_0=1-11/35=0,69$

Flygaskans reaktionsgrad:	(1-0,85)/(1-0,69)=0,48	vid vct=0,5
	(1-0,80)/(1-0,69)=0,64	vid vct=0,7

<u>33 % flygaska i bindemedlet</u>:

Fullständig reaktion av all flygaska ger $1-CH/CH_0=1-33/35=0,06$

Flygaskans reaktionsgrad:	(1-0,56)/(1-0,06)=0,47	vid vct=0,5
	(1-0,47)/(1-0,06)=0,56	vid vct=0,7

De teoretiska värdena är fullt rimliga. Den teoretiskt beräknade reaktionsgraden är dessutom i stort sett lika hög oavsett flygaskahalten vilket stöder den teoretiska

beräkningen. Reaktionsgraden ökar med ökat vct vilket kan bero på att man då har ett större vattenöverskott i betongen vilket gynnar puzzolanreaktionen.

Mätningarna stöder således de teoretiska beräkningarna av max tillåten flygaskahalt.

Masugnsslagg:

I Tabell 1 visas uppmätta halter portlandit i slaggcement med olika slagghalt; /3/.

Tabell 1: Inverkan av cementets innehåll av mald granulerad masugnsslagg på betongens innehåll av portlandit; /3/.

Slagghalt, vikt-% av bindemedlet	Slagghalt, vikt-% av portlandcementet	Relativ CH-halt vid 28 dygn CH/CH_0 (%)
0	0	100
30	43	59
65	185	21

Slaggen i Tabell 1 har just den sammansättning som användes i den teoretiska beräkningen, dvs för fullständig reaktion av all CH erfordras en slagghalt av 290 % av portlandcementvikten.

Fullständig reaktion av all slagg ger följande resterande andel CH:

43 % slagg: $CH/CH_0=(290-43)/290= 0,84$

185 % slagg: $CH/CH_0=(290-185)/290=0,36$

De uppmätta värdena överensstämmer således rätt dåligt med de teoretiska. Vid bägge slagghalterna är reaktionsgraden högre än den teoretiska vilket enbart kan förklaras av att den antagna egenreaktionen i slaggen är felaktig. I verkligheten reagerar kalken i slaggen inte enbart med silikan i slaggen utan också med aluminater och ferriter. Den verkliga halten silika som kan reagera med portlanditen är således högre än det beräknade värdet 7 %. En resterande CH-halt av 59 % vid slagghalt 43 % av bindemedlet (uppmätt värde) skulle ha erhållits vid 75%-ig slaggreaktion om den reaktiva silikahalten i slaggen varit 14 %, dvs om enbart 40 % av silikan i slaggen reagerar med slaggens egna kalkinnehåll. Den maximala slagghalten för 75%-ig reaktion är då 18,4/0,14=130 % av klinkervikten. Det teoretiska värdet på CH vid 185 % slagghalt blir då vid fullständig slaggreaktion: $CH/CH_0=(130/0,9 -185)/130/0,9<0$. Det uppmätta värdet 21 % är således för högt.

Teoretiskt beräknad maxdosering av slagg är därför osäker beroende på att slaggen själv innehåller stora mängder kalk och kiselsyra. Små variationer i halterna av dessa ämnen och deras reaktivitet ger stora effekter på maximaldoseringen. Om man för säkerhets skull antar att total portlanditreaktion erhålls vid 130 % slagg räknat på klinkervikten fås följande maxdoseringar α vid max accepterad portlanditreaktion av 50 % i förhållande till ren portlandklinker:

$0,5(1-\alpha)130=\alpha\cdot 100$ dvs $\alpha=0,39$

Max 45 vikt-% mald granulerad masugnsslagg räknat på cementvikten.

Maximala halten slagg i bindemedlet (portlandcement+slagg) är då 45/145=31 %:

Max 30 vikt-% mald granulerad masugnsslagg räknat på totala bindemedlet.

(Vid fullständig reaktion av all portlandit blir maxdoseringen 130/0,9=145 vikt-% av cementet eller 145/245=60 vikt-% av totala bindemedlet).

Litteratur

/1/ Erik Sellevold m fl: Silica fume cement paste-hydration and pore structure. Ingår i "Condensed silica fume in concrete". Inst Bygningsmateriallære, NTH, Trondheim 1982.

/2/ Inger Meland: Artikel i FCB-rapport STF 65A 83063, Trondheim, 1983.

/3/ Olof Petersson; B Warris: Reaction between blast furnace slag and lime. Cementa CM Rapport T81018,1981.

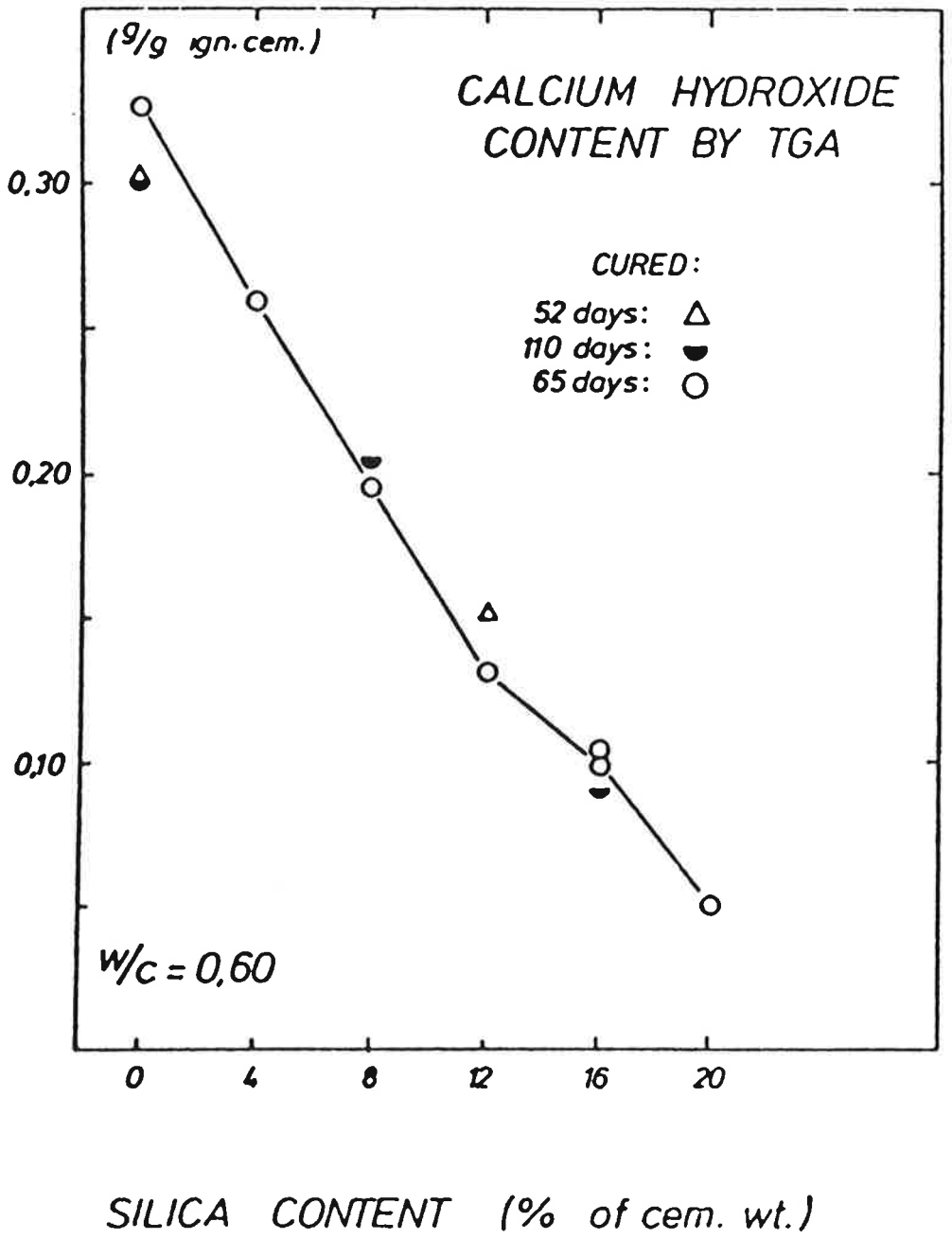
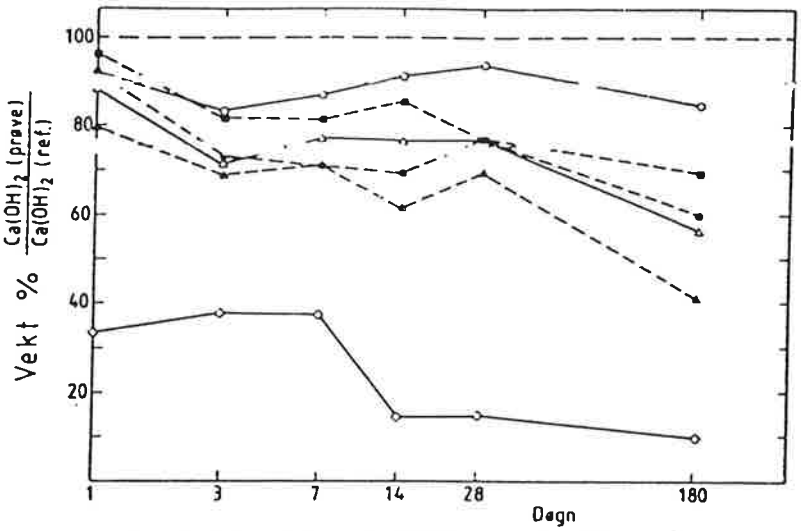
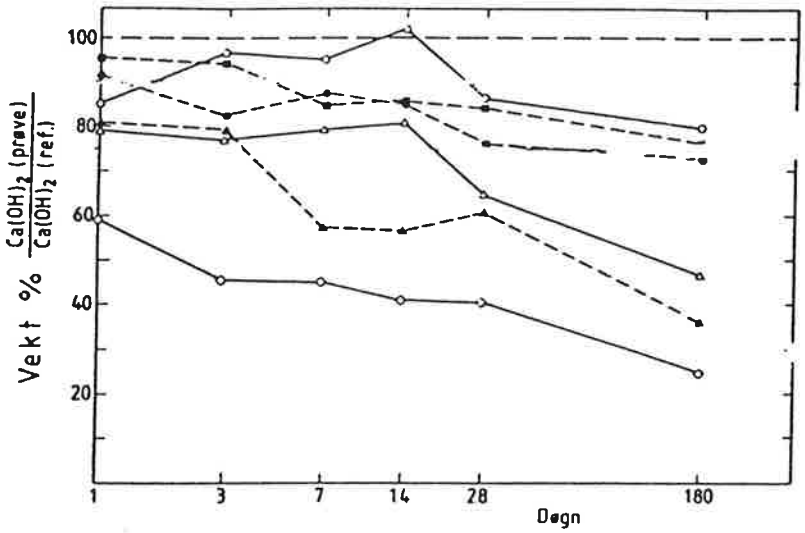


Fig 1: Kalciumhydroxidreduktionen av silikastoft; /1/.



Forhold mellom $Ca(OH)_2$-innhold i pasta av blandingsementene og Standard Portlandsement som funksjon av tid. v/(c+s) = 0,5



Forhold mellom $Ca(OH)_2$-innhold i pasta av blandingsementer og Standard Portlandsement som funksjon av tid. v/(c+s) = 0,7

○ MP-30 (10% FA)
△ MP-30 (25% FA)
◇ 70% SP-30 + 30% silika
■ 95% SP-30 + 5% silika
● 95% MP-30 (10% FA)+ 5% silika
▲ 95% MP-30 (25% FA)+ 5% silika

Fig 2: Kalciumhydroxidreduktion av flygaska eller flygaska+silikastoft; /2/.

BILAGA 2: "Cementgelbildande förmåga"

Genom tillsats av mineraliska tillsatsmaterial omvandlas kalciumhydroxid till cementgel. Nedan genomförs en överslagsmässig beräkning av den totala mängden cementgel vid olika halter av olika tilsatsmaterial och vid olika reaktionsgrad hos detta.

Reaktionsformler enligt BILAGA 1 används.

1: C_3S-reaktionens gelbildning

$2C_3S + 6 \cdot H_2O \rightarrow 1 \cdot \text{cementgel} + 3CH$

456 g + 108 g → 342 g + 222 g

1Kg C_3S skapar 342/456 = 0,75 kg cementgel

2: C_2S-reaktionens gelbildning

$2C_2S + 4 \cdot H_2O \rightarrow 1 \cdot \text{cementgel} + 1 \cdot CH$

344 g + 72 g → 342 g 74 g

1 kg C_2S skapar 342/344 = 1kg cementgel

3: Tillsatsmaterialets egenreaktion

$3 \cdot CaO + 3 \cdot H_2O + 2SiO_2 \rightarrow 1 \cdot \text{cementgel}$

168 g + 54 g + 120 g → 342 g

1 kg CaO i tillsatsmaterialet skapar 342/168 = 2,04 kg cementgel och förbrukar därvid 0,71 kg SiO_2

4: Puzzolanreaktionen

$3 \cdot CH + 2SiO_2 \rightarrow 1\text{Cementgel}$

270 g + 120 g → 342 g

1 kg SiO_2 i tillsatsmaterialet skapar 342/120 = 2,85 kg cementgel.

5: Tillämpning

a) Ren portlandklinker: 65%C_3S +20% C_2S

1 kg cementklinker vid hydratationsgrad 80 % ger:

$(0{,}65 \cdot 0{,}75 + 0{,}20 \cdot 1) \cdot 0{,}80 =$ **0,55 kg cementgel**

b) Andel portlandklinker är α; andel tillsatsmaterial är $(1-\alpha)$

Klinkerns kemiska sammansättning är densamma som i a). Tillsatsmaterialets CaO-halt är β. Dess SiO_2-halt är γ.

Klinkerns hydratationsgrad är 80 %. Tillsatsmaterialets reaktionsgrad är δ.

1kg av blandningen av cementklinker och tillsatsmaterial ger:

$$\alpha \cdot 0{,}55 + (1-\alpha)\cdot\{\beta\cdot 2{,}04 + (\gamma - \beta/1{,}4)\cdot 2{,}85\}\cdot\delta \quad \textbf{kg cementgel}$$

Erforderlig hydratationsgrad för att erhålla lika stor mängd cementgel som vid samma mängd ren portlandklinker blir:

$$\delta_{erf} = \frac{0{,}55}{\beta\cdot 2{,}04 + (\gamma - \beta/1{,}4)2{,}85}$$

6: Exempel 1: silikastoft

$\beta = 0$
$\gamma = 0{,}95$

Mängden cementgel hos 1 kg av blandningen blir densamma som vid 1 kg ren portlandklinker när följande reaktionsgrad hos silikastoftet uppnåtts:

$$\delta_{erf} = \frac{0{,}55}{0{,}95\cdot 2{,}85} = 0{,}20 \quad \text{ger 0,55 kg cementgel per kg blandning}$$

I verkligheten torde silikastoftets reaktionsgrad på sikt bli lika hög som portlandcementets.

Vid **10 %** inblandat silikastoft och δ=0,8 och fås följande mängd cementgel:

$0.55\cdot 0{,}9 + 0{,}1\cdot 0{,}95\cdot 2{,}85\cdot 0{,}8 = 0{,}71$

1 kg av bindemedelsblandningen ger ca **0,71 kg cementgel.**

Vid **20 %** inblandat silikastoft och δ=0,8 fås följande mängd cementgel:

$0{,}55\cdot 0{,}8 + 0{,}2\cdot 0{,}95\cdot 2.85\cdot 0{,}8 =$ **0,87 kg cementgel**

Inblandning av 10 % resp 20 % silikastoft ökar mängden cementgel med ca 30 % resp ca 60 %. Inblandningar däröver ger minskad mängd cementgel eftersom all CH konsumerats.

7: Exempel 2: flygaska

$\beta = 0{,}04$
$\gamma = 0{,}55$

Mängden cementgel hos 1 kg av blandningen blir densamma som vid 1 kg ren portlandkinker när följande villkor är uppfyllt:

$$\delta_{erf} = \frac{0{,}55}{0{,}04 \cdot 2{,}04 + (0{,}55 - 0{,}04/1{,}4)2{,}85} = 0{,}35$$

I verkligheten torde flygaskans reaktionsgrad på sikt att bara kunna uppgå till ca 50 %. Då fås följande mängd cementgel vid 25 % flygaska:

$0{,}75 \cdot 0{,}55 + 0{,}25\{0{,}04 \cdot 2{,}04 + (0{,}55 - 0{,}04/1{,}4)2{,}85\}0{,}5 = 0{,}60$

1 kg av bindemedelsblandningen ger **0,60 kg cementgel.**

Inblandning av 25 % flygaska ökar mängden cementgel med ca 10 %.

8: Exempel 3: masugnsslagg

$\beta = 0{,}40$
$\gamma = 0{,}35$

Mängden cementgel hos 1 kg av blandningen blir densamma som vid 1 kg ren portlandkinker när följande villkor är uppfyllt:

$$\delta_{erf} = \frac{0{,}55}{0{,}40 \cdot 2{,}04 + (0{,}35 - 0{,}40/1{,}4)2{,}85} = 0{,}55$$

I verkligheten kan man förvänta sig något högre reaktionsgrad hos slaggen. Vid 75 % reaktionsgrad och 60 % slagg gäller:

$0{,}4 \cdot 0{,}55 + 0{,}6\{0{,}40 \cdot 2{,}04 + (0{,}35 - 0{,}40/1{,}4)2{,}85\}0{,}75 = 0{,}67$

1 kg av bindemedelsblandningen ger **0,67 kg cementgel.**

Inblandning av 60 % slagg ökar mängden cementgel med ca 20 %. Inblandningar utöver ca 75 % ger minskad mängd cementgel eftersom all CH konsumerats.

9: Slutsats

All inblandning av ett mineraliskt tillsatsmaterial ökar normalt den totala mängden cementgel genom att den av cementklinkern skapade kalciumhydroxiden omvandlas till cementgel. Detta förutsätter att doseringen inte är högre än att hela mängden tillsatsmaterial kan reagera; se BILAGA 1.
Tillsatsmaterial skapar således alltid en finporösre struktur: kapillärporer omvandlas till gelporer.

BILAGA 3: Totalporositet

Porvolymen hos cementpastan (utan extra luft) är:

$V_p=w_o-k_c \cdot w_{n,c}-k_t \cdot w_{n,t}+\Delta V_{puzz}$

där,
k_c och k_t är de specifika volymerna hos vatten som binds kemisk till cementet resp vid tillsatsmaterialets egenreaktion (reaktion mellan det egna kalk- och kiselinnehållet).
$w_{n,c}$ och $w_{n,t}$ är mängden vatten som binds kemiskt till cementet resp tillsatsmaterialet vid dess egenreaktion.
w_o är mängden blandningsvatten.
ΔV_{puzz} är volymkontraktionen hos fast fas när resterande (efter egenreaktionen) kiselsyra i tillsatsmaterialet reagerar med den av portlandcementet frigjorda kalciumhydroxiden.

$k_c \approx k_t \approx 0{,}75$ (Xu (1992), Persson (1992))

Totalt bunden vattenmängd per kg fullständigt reagerat material antas vara 0,25 för portlandcement och 0,45 räknat på "egenreagerande" kiselsyra i tillsatsmaterialet (kiselsyra som reagerar med tillsatsmaterialets egna kalk) ; se BILAGA 1. Då fås:

$w_{n,c}=0{,}25 \cdot \delta_c \cdot c$

$w_{n,t}=0{,}45 \cdot \delta_t' \cdot \gamma' \cdot t$

där,
δ_c är reaktionsgraden hos cementet.
δ_t' är reaktionsgraden hos den andel av silikan i tillsatsmaterialet som kan "egenreagera".
γ' är halten egenreaktiv kiselsyra i tillsatsmaterialet (en andel av totala kiselsyrahalten)
c är mängden cement.
t är mängden tillsatsmaterial

$c/(c+t)=\alpha$ dvs $t=c(1-\alpha)/\alpha$

ΔV_{puzz} beräknas på två sätt:

Alt 1: ger stor porositet
Puzzolanreaktionen antas skapa samma typ av cementgel som den vanliga cementreaktionen dvs med en gelporositet av 28 % och en kompaktdensitet av 2,46 kg/liter hos gelpartiklarna. Vid puzzolanreaktionen reagerar 2 mol SiO_2(120 g) med 3 mol $Ca(OH)_2$ (222 g) dvs 342 g cementgel skapas med en kompaktvolym av 342/2,46=139 cm^3 och en porvolym av $139 \cdot 0{,}28/(1-0{,}28)= 54\ cm^3$. 1 kg SiO_2 skapar således ca 54/120=0,45 liter porvolym. Då gäller:

$\Delta V_{puzz,1}=0,45\cdot(\gamma-\gamma')\cdot\delta_t''\cdot t$

där
γ är totala halten kiselsyra i tillsatsmaterialet.
δ_t'' är reaktionsgraden hos den andel av kiselsyran som är tillgänglig för puzzolanreaktionen.

Om $dt' = dt'' = dt$ dvs kiselsyrans reaktionsgrad är oberoende av om reaktionen skett inom tillsatsmaterialet självt eller genom puzzolanreaktion fås följande uttryck för porvolymen:

$V_{p,1}=w_o-0,75\cdot0,25\cdot\delta_c\cdot c-0,75\cdot0,45\cdot\delta_t\cdot\gamma'\cdot c(1-\alpha)/\alpha+0,45\cdot(\gamma-\gamma')\cdot\delta_t\cdot c(1-\alpha)/\alpha$

Dvs

$V_{p,1}=vct-0,19\cdot\delta_c+0,45\cdot\delta_t[\gamma+0,25\gamma']\cdot(1-\alpha)/\alpha$

<u>Alt 2;</u> <u>ger låg porositet</u>:
Puzzolanreaktionen ger ingen porositetsökning. Dvs, hydratationsprodukternas specifika volym är lika hög som medelvärdet av de reagerande ämnenas specifika volym. Då fås:

$\Delta V_{puzz,2} = 0$

Dvs porvolymen blir:

$V_{p,2}=w_o-0,75\cdot0,25\cdot\delta_c\cdot c-0,75\cdot0,45\cdot\delta_t\cdot\gamma'\cdot c(1-\alpha)/\alpha$

Dvs

$V_{p,2}= vct-0,19\cdot\delta_c-0,34\cdot\delta_t\cdot\gamma'\cdot(1-\alpha)/\alpha$

Totala pastavolymen är:

$V=w_o+c/\rho_c+t/\rho_t$

där,
ρ_c och ρ_t är cementets resp tillsatsmaterialets kompaktdensiteter. $\rho_c\approx3,1$ kg/liter; $\rho_t\approx2,4$ kg/liter.

Insättning ger:

$V=vct+0,32\cdot c+0,42(1-\alpha)/\alpha$

Porositeten $P_{t,1}$ hos en betong med tillsatsmaterial blir:

$$P_{t,1} = \frac{vct-0{,}19\cdot\delta_c+0{,}45\cdot\delta_t[\gamma-1{,}75\cdot\gamma']\cdot(1-\alpha)/\alpha}{vct+0{,}32+0{,}42\cdot(1-\alpha)/\alpha}$$

$$P_{t,2} = \frac{vct-0{,}19\cdot\delta_c-0{,}34\cdot\delta_t\cdot\gamma'(1-\alpha)/\alpha}{vct+0{,}32+0{,}42\,(1-\alpha)/\alpha}$$

Man kan nu jämföra med en betong utan tillsatsmaterial men med exakt samma totala bindemedelsmängd c_o som i betongen med tillsatsmaterial och med samma vattenhalt w_o.

$c_o=c+t=c/\alpha$

Vattencementtalet vct_o i betongen utan tillsatsmaterial blir:

$vct_o=w_o/c_o=vct\cdot\alpha$

Porositeten P_o blir:

$$P_o = \frac{vct_o-0{,}19\cdot\delta_c}{vct_o+0{,}32} = \frac{vct\cdot\alpha-0{,}19\cdot\delta_c}{vct\cdot\alpha+0{,}32}$$

Man kan med hjälp av dessa båda porositetsekvationer jämföra "effektiviteten" hos ett tillsatsmaterial jämfört med ett rent portlandcement. Två betonger som har samma porositet har i flera avseenden ungefär samma egenskaper. Den mängd tillsatsmaterial som erfordras för att ge kompensera en given minskning av mängden portlandcement kallas tillsatsmaterialets **effektivitetsfaktor**.

Exempel 1: Silikastoft.

$\alpha=0{,}9$ $[(1-\alpha)/\alpha=0{,}11]$

$\delta_c=0{,}8$

$\delta_t=0{,}8$

$\gamma=0{,}95$

$\gamma'=0$

$$P_{t,1} = \frac{vct-0,19\cdot 0,8+0,45\cdot 0,8\cdot 0,95\cdot 0,11}{vct+0,32+0,42\cdot 0,11} = \frac{vct-0,114}{vct+0,366}$$

$$P_{t,2} = \frac{vct-0,19\cdot 0,8}{vct+0,32+0,42\cdot 0,11} = \frac{vct-0,152}{vct+0,366}$$

$$P_o = \frac{vct\cdot 0,9-0,19\cdot 0,8}{vct\cdot 0,9+0,32} = \frac{vct\cdot 0,9-0,152}{vct\cdot 0,9+0,32}$$

vct=0,40:	$P_{t,1}$ =0,373
-"-	$P_{t,2}$ =0,324
(vct_o=0,36):	P_o=0,306

vct=0,80:	$P_{t,1}$=0,588
-"-	$P_{t,2}$ =0,556
(vct_o=0,72):	P_o=0,546

Porositeten är således något högre i en betong med silikastoft men med konstant total bindemedelshalt. Detta gäller framförallt om puzzolanreaktionen skapar ett porutrymme.

Man kan beräkna vilket vct=vct´ hos betong med silikastoft som ger samma porositet som betong utan silikastoft. Ur detta vct kan sedan effektivitetsfaktorn beräknas.

vct_o=0,36:

Puzzolankontraktion alt 1: $0,306 = \frac{vct'-0,114}{vct'+0,366}$ dvs, vct´= 0,33 i stället för 0,40

Puzzolankontraktion alt 2: $0,306 = \frac{vct'-0,152}{vct'+0,366}$ dvs, vct´= 0,38 i stället för 0,40

Antag att den erforderliga cementhalten för oförändrad porositet är c´. Erforderlig cementhalt vid effektivitetsfaktor 1 hos silikastoftet är c. Om vattenhalten är konstant fås då:

Alt 1: c´/c=0,40/0,33=1,21

Alt 2: c´/c=0,40/0,38=1,05

Dvs, cementhalten måste ökas med ca 21 à 5 % vid användning av silikastoft.
Effektivitetsfaktorn ε fås ur:

Alt 1: $1,21\cdot c[1+\varepsilon(1-\alpha)/\alpha]=c[1+(1-\alpha)/\alpha]$

I aktuellt fall är $(1-\alpha)/\alpha=0,11$

Dvs, $\varepsilon=$ **-0,75**

Alt 2: $1,05 \cdot c[1+\varepsilon \cdot 0,11]=c \cdot 1,11$

Dvs, $\varepsilon=$**0,6**

Vct_o=0,72

Puzzolankontraktion alt 1: $0,546=\frac{vct'-0,114}{vct'+0,366}$ dvs vct´= 0,69 i stället för 0,80

Puzzolankontraktion alt 2: $0,546=\frac{vct'-0,152}{vct'+0,366}$ dvs vct´= 0,77 i stället för 0,80

Alt 1: $c'/c=0,80/0,69=1,16$

$1,16 \cdot c[1+\varepsilon \cdot 0,11)=c \cdot 1,11$

Dvs, $\varepsilon=$ **-0,4**

Alt 2: $c'/c=0,80/0,77= 1,04$

$1,04 \cdot c[1+\varepsilon \cdot 0,11]=c \cdot 1,11$

Dvs, $\varepsilon=$**0,6**

Effektivitetsfaktorn beror alltså starkt på hur stor den kemiska kontraktionen vid puzzolanreaktionen är. Det är mycket osannolikt att effektivitetsfaktorn är lägre än 1, dvs någon så stor kontraktion vid puzzolanreaktionen som antas i Alt 1 ovan torde inte ske. Det är också osannolikt att den fasta volymen skulle öka. Alt 2 vilket motsvarar fullständigt oförändrad volym är således mest sannolik. Detta innebär att:

Silikastoftets effektivitetsfaktor map totalporositet är ca 0,6. Den torde kunna vara något lägre men knappast högre.

Exempel 2: Flygaska

$\alpha=0,65$ $[(1-\alpha)/\alpha=0,54]$

$\delta_c=0,8$

$\delta_t=0,6$

$\gamma=0,55$

$\gamma'=0,05$

$$P_{t,1} = \frac{vct-0{,}19\cdot 0{,}8+0{,}45\cdot 0{,}6[0{,}55-1{,}75\cdot 0{,}05]0{,}54}{vct+0{,}32+0{,}42\cdot 0{,}54} = \frac{vct-0{,}084}{vct+0{,}547}$$

$$P_{t,2} = \frac{vct-0{,}19\cdot 0{,}8-0{,}34\cdot 0{,}6\cdot 0{,}05\cdot 0{,}54}{vct+0{,}32+0{,}42\cdot 0{,}54} = \frac{vct-0{,}158}{vct+0{,}547}$$

$$P_o = \frac{vct\cdot 0{,}70-0{,}19\cdot 0{,}8}{vct\cdot 0{,}70+0{,}32} = \frac{vct\cdot 0{,}70-0{,}152}{vct\cdot 0{,}70+0{,}32}$$

vct=0,60:	$P_{t,1}$ =0,450
-"-	$P_{t,2}$ =0,385
(vct_o=0,39):	P_o=0,335
vct=1,10:	$P_{t,1}$ =0,616
-"-	$P_{t,2}$ =0,572
(vct_o=0,71):	P_o=0,542

vct_o=0,39:

Puzzolankontraktion alt 1: $0{,}335 = \frac{vct'-0{,}084}{vct'+0{,}547}$ dvs vct´=0,40 i stället för 0,60

Puzzolankontraktion alt 2: $0{,}335 = \frac{vct'-0{,}158}{vct'+0{,}547}$ dvs vct´=0,51 i stället för 0,60

Alt 1: c´/c=0,60/0,40=1,50

$1{,}50\cdot c[1+\varepsilon\cdot 0{,}54)=c\cdot 1{,}54$

Dvs **ε=0**

Alt 2: c´/c=0,60/0,51=1,18

$1{,}18\cdot c[1+\varepsilon\cdot 0{,}54)=c\cdot 1{,}54$

Dvs, **ε=0,5**

vct_o=0,71:

Puzzolankontraktion alt 1: $0{,}542 = \frac{vct'-0{,}084}{vct'+0{,}547}$ dvs vct´= 0,83 i stället för 1,10

Puzzolankontraktion alt 2: $0{,}542 = \frac{vct'-0{,}158}{vct'+0{,}547}$ dvs $vct' = 0{,}99$ i stället för 1,10

Alt 1: $c'/c = 1{,}10/0{,}83 = 1{,}33$

$1{,}33 \cdot c[1+\varepsilon \cdot 0{,}54] = c \cdot 1{,}54$

Dvs ε=**0,3**

Alt 2: $c'/c = 1{,}10/0{,}99 = 1{,}11$

$1.11 \cdot c[1+\varepsilon \cdot 0{,}54] = c \cdot 1{,}54$

Dvs ε=**0,7**

Flygaskans effektivitetsfaktor map totalporositet varierar mellan ca 0 och ca 0,7. Det senare värdet förutsätter att puzzolanreaktionen inte skapar några porer.

Exempel 3: Granulerad masugnsslagg

$\alpha = 0{,}3$ $[(1-\alpha)/\alpha = 2{,}33]$

$\delta_c = 0{,}8$

$\delta_t = 0{,}7$

$\gamma = 0{,}35$

$\gamma' = 0{,}28$

$$P_{t,1} = \frac{vct-0{,}19 \cdot 0{,}8+0{,}45 \cdot 0{,}7[0{,}35-1{,}75 \cdot 0{,}28]2{,}33}{vct+0{,}32+0{,}42 \cdot 2{,}33} = \frac{vct-0{,}254}{vct+1{,}30}$$

$$P_{t,2} = \frac{vct-0{,}19 \cdot 0{,}8-0{,}34 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}28 \cdot 2{,}33}{vct+0{,}32+0{,}42 \cdot 2{,}33} = \frac{vct-0{,}307}{vct+1{,}30}$$

$$P_o = \frac{vct \cdot 0{,}3-0{,}19 \cdot 0{,}8}{vct \cdot 0{,}3+0{,}32} = \frac{vct \cdot 0{,}3-0{,}152}{vct \cdot 0{,}3+0{,}32}$$

vct=1,30:	$P_{t,1} = 0{,}402$
-"-	$P_{t,2} = 0{,}382$
(vct_o=0,39):	$P_o = 0{,}335$

vct= 2,30: $P_{t,1} = 0{,}568$

-"- $P_{t,2} = 0{,}554$

(vct_o=0,69): $P_o = 0{,}533$

vct_o=0,39:

Puzzolanreaktion alt 1: $0{,}335=\frac{vct'-0{,}254}{vct'+1{,}30}$ dvs vct´=1,04 i stället för 1,30

Puzzolanreaktion alt 2: $0{,}335=\frac{vct'-0{,}307}{vct'+1{,}30}$ dvs vct´= 1,12 i stället för 1,30

Alt 1: c´/c=1,30/1,04=1,25

$1{,}25 \cdot c[1+\varepsilon \cdot 2{,}33]=c \cdot 3{,}33$

Dvs ε = **0,7**

Alt 2: c´/c=1,30/1,12=1,16

$1{,}16 \cdot c[1+\varepsilon \cdot 2{,}33]=c \cdot 3{,}33$

Dvs ε = **0,8**

vct_o=0,69:

Puzzolanreaktion alt 1: $0{,}533=\frac{vct'-0{,}254}{vct'+1{,}3}$ dvs vct´=2,03 i stället för 2,30

Puzzolanreaktion alt 2: $0{,}533=\frac{vct'-0{,}307}{vct'+1{,}3}$ dvs vct´= 2,14 i stället för 2,30

Alt 1: c´/c=2,30/2,03=1,13

$1{,}13 \cdot c[1+\varepsilon \cdot 2{,}33]=c \cdot 3{,}33$

Dvs ε = **0,9**

Alt 2: c´/c=2,30/2,14=1,07

$1{,}07 \cdot c[1+\varepsilon \cdot 2{,}33]=c \cdot 3{,}33$

Dvs ε = **0,9**

Masugnsslaggens effektivitetsfaktor med avseende på totalporositet är ca 0,7 à 0,9

Litteratur:

Xu Aimin: Structure of hardened cement-fly ash systems and their related properties. Avd byggnadsmaterial, Chalmers. Publ P-92:7, 1992

Persson Bertil: Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet. Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-1009, 1992.