LUND UNIVERSITY

Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet

Persson, Bertil

1992

Link to publication

Citation for published version (APA):
Persson, B. (1992). *Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet*. [Licentiatavhandling, Avdelningen för Byggnadsmaterial]. 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

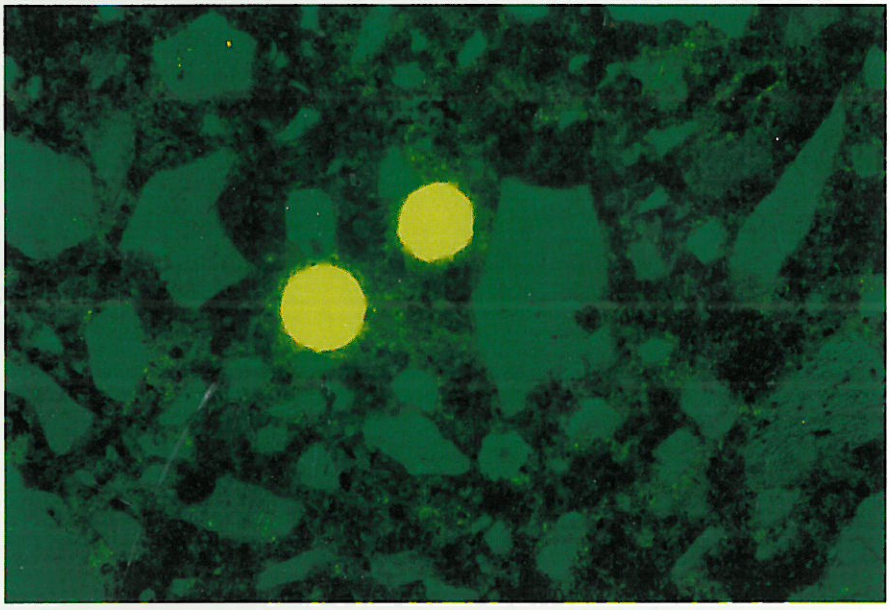
Download date: 18. Dec. 2025

Avdelning Byggnadsmaterial

Lunds Tekniska Högskola, Box 118, 221 00 Lund

HÖGPRESTERANDE BETONGS HYDRATATION, STRUKTUR OCH HÅLLFASTHET

Bertil Persson



Rapport TVBM-1009

Lund 1992

Avdelning Byggnadsmaterial

Lunds Tekniska Högskola, Box 118, 221 00 Lund

HÖGPRESTERANDE BETONGS HYDRATATION, STRUKTUR OCH HÅLLFASTHET

Bertil Persson

Rapport TVBM-1009

Lund 1992

CODEN: LUTVDG / (TVBM-1009) / 1-380 / (1992)

BTJ Tryck AB, Lund 1992

ISSN 0348-7911

Till Eva

FÖRORD

Projektet har i huvudsak utförts i Avdelning Byggnadsmaterials laboratorium vid Lunds Tekniska Högskola, LTH, under tiden 1989-06-01-- 1991-04-01. Betongen vid tillämpningarna platta på mark och slakarmerad balk har tillverkats industriellt dels vid Sydsten AB, Hardeberga, dels vid Skanska Prefab AB, Staffanstorp. Forskningen har varit möjlig tack vare att Styrelsen för Teknisk Utveckling (nuvarande NUTEK) ställt medel till förfogande inom projekten "Makrodefektfria lågtemperaturbundna keramer" och "Långtidsegenskaper hos högpresterande betongkonstruktioner-inledande studier".

Cementa AB har skänkt allt cement, silikastoft och tillsatsmedel till försöken utförda i LTH:s laboratorium. Vidare har Sydsten AB, Hardeberga skänkt kvartsitisk makadam, Skånska Makadamfabriken AB i Åstorp, grus, PLM AB i Malmö, förvaringskärl i aluminium samt Rockwool AB, Skövde, isoleringsmaterial till kalorimeter och platta på mark. Cementa AB, Slite, har kostnadsfritt utfört vissa hållfasthetsprovningar av betong samt utfört kemiska analyser av cement. Leif Tjällden AB, Arlöv har skänkt kantelement. Fundia Bygg AB, Halmstad, har skänkt armeringsnät. Sydsten AB, Hardeberga, har kostnadsfritt tillverkat en platta på mark. Skanska Prefab AB, Staffanstorp har kostnadsfritt tillverkat 16 st betongbalkar. VTT, Helsingfors, Finland, har kostnadsfritt utfört och fotograferat tunnslip. Till alla dessa riktas ett varmt tack.

Ett varmt tack även till professor Göran Fagerlund som initierat och strukturerat försöken, lämnat väsentliga bidrag till rapporten samt hjälp till att lösa en mängd problem under "resans gång". Ett stort tack till professor Arne Hillerborg som i detalj följt balkförsöken och underhand kommenterat dessa, samt till professor Lennart Elfgren, som kommenterat resultaten av balkförsöken.

Hjärtligt tack till Britt Andersson och Ingvar Larsson, vilka ritat figurerna, till Anni-Britt Nilsson som stått för en första textutskrift, till Richard Fisher som språkgranskat rapportens engelska avsnitt samt till Sture Sahlén, Lars Andersson, Bo Johansson, Ingemar Larsson, Bengt Linné, Agneta Nilsson, Bengt Nilsson och Per-Olof Rosenkvist, vilka stått för en stor del av det praktiska utförandet av försöken. Britt Andersson har monterat figurerna på ett förtjänstfullt sätt.

Ett hjärtligt tack, slutligen, till min familj, Eva (som korrekturläst rapporten), Ulrika och Madeleine, för stor tålmodighet under försökets gång samt under den tid då rapporten avfattades.

Lund 1992-09-22

Bertil Persson

ANVISNINGAR TILL LÄSAREN

En utförlig sammanställning av data avseende delmaterial och blandningsrecept, rådata från mätningar i laboratorium och i fält samt vissa resultatdiagram och statiska beräkningar ges i rapporten HÖGPRESTERANDE BETONGS HYDRATATION, STRUKTUR OCH HÅLLFASTHET- RÅDATA OCH BERÄKNINGAR, TVBM-7011, Avdelning Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, Lund 1992 (278 sidor). Denna rapport benämnes fortsättningsvis "DATARAPPORT TVBM-7011".

För att underlätta för läsaren har samma kapitelindelning bibehållits i DATARAPPORT TVBM-7011 som i denna rapport. I löpande text nedan görs ofta hänvisningar till DATARAPPORTEN.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING SIDA

FÖRORD I
ANVISNINGAR TILL LÄSAREN III
INNEHÅLLSFÖRTECKNING V
SYMBOLER XIII
SAMMANFATTNING XVII
SUMMARY XXIII
-XXIX

1. BEGREPPET HÖGPRESTERANDE BETONG, TIDIGARE FORSKNING

1.1 Begreppsförklaring 1
1.2 Tidigare forskning 2
1.2.1 Internationellt 2
1.2.2 I Sverige 2

2. PROBLEMSTÄLLNINGAR, MÅLSÄTTNING, AVGRÄNSNINGAR OCH ALLMÄN UPPLÄGGNING AV FÖRSÖKEN 3

2.1 Generella problemställningar i samband med högpresterande betong 3
2.2 Målsättning med förliggande arbete 10
2.3 Avgränsningar 11
2.4 Allmän uppläggning av försöken 12
2.4.1 Pastaskala 12
2.4.2 Bruksskala 12
2.4.3 Betongskala 13
2.4.4 Kronologi 14
2.4.5 Delmaterial 14

3. KEMISK KRYMPNING 15

3.1 Teori 15
3.2 Tidigare mätningar av kemisk krympning 18
3.3 Förstudier 24
3.3.1 Förförsök med betong 24
3.3.2 Förförsök med cementbruk 27
3.3.3 Slutsatser av förförsök 31
3.4 Huvudförsök 31
3.4.1 Allmänt 31
3.4.2 Metodik 32
3.4.3 Felkällor 35
3.4.4 Resultat 37
3.4.5 Noggrannhet 40
3.4.5 Diskussion 43
3.4.6 Slutsatser 49

4. SJÄLVUTTORKNING OCH DESORPTIONSISOTERM 51

4.1 Teori 51
4.2 Desorptionsisotermer enligt Nilsson (1980) 53
4.3 Egna mätningar 55
4.3.1 Mätprincip 55
4.3.2 Mätmetod 57
4.3.3 Resultat 60
4.3.4 Noggrannhet i mätningar 67
4.3.5 Diskussion 68
4.4 Slutsatser 73

5. BETONGPROPORTIONERING. TILLVERKNING AV BETONGSKIVOR 75

5.1 Teori 75
5.1.1 Allmänt 75
5.1.2 Receptbestämning 75
5.1.3 Uppvägning 75
5.1.4 Blandning 76
5.1.5 Komprimering 76
5.1.6 Efterbehandling 76
5.2 Andras erfarenheter 77
5.3 Förförsök (förblandningar) 82
5.3.1 Recept 82
5.3.2 Fuktkontroll 83
5.3.3 Slutsatser av förförsök 83
5.4 Tillverkning av betongskivor 83
5.4.1 Provkroppsutformning 83
5.4.2 Recept 86
5.4.3 Blandning 86
5.4.4 Gjutbarhet och lufthalt 90
5.4.5 Gjutning av betongskivor 92
5.4.6 Härdningsförhållande 92
5.4.7 Ekonomi 93
5.5 Slutsatser 97

6. RELATIV FUKTIGHET OCH SJÄLVUTTORKNING HOS BETONGSKIVOR 99

6.1 Allmänt 99
6.2 Tidigare mätningar av relativ fuktighet vid självuttorkning 99
6.3 Egna mätningar 102
6.3.1 Provade betonger 102
6.3.2 Mätmetod 103
6.3.3 Felkällor och noggrannhet 105
6.3.4 Resultat av mätningar i glaskolvar 107
6.3.5 Resultat av mätningar i betongskivor 107
6.3.6 Kommentar till resultat 114
6.4 Slutsatser 116
6.5 Uppföljning av RF vid 450 dygns betongålder 116
6.5.1 Allmänt 116
6.5.2 Mätresultat 117
6.5.3 Kommentarer 123

7. HÅLLFASTHETSUTVECKLING 125

7.1 Faktorer som påverkar resultaten av en hållfasthetsprovning 125
7.2 Tidigare hållfasthetsmätningar på högpresterande betong 127
7.3 Provningsmetoder i föreliggande rapport 132
7.3.1 Allmänt 132
7.3.2 Kubprovning 132
7.3.3 Tryckprovning på utborrade cylindrar 133
7.3.4 Spräckprovning 134
7.3.5 Felkällor och noggrannhet vid tryckprovning 135
7.3.6 Felkällor och noggrannhet vid spräckprovning 135
7.4 Förförsök 136
7.4.1 Betongrecept och genomförande 136
7.4.2 Resultat av förförsök 136
7.4.3 Slutsatser av förförsök 137

7.5 Huvudförsök; Betongskivor- Allmänt 140
7.5.1 Målsättning 140
7.5.2 Kubprovningar 140
7.6 Huvudförsök; Betongskivor- Allmänna hållfasthets-egenskaper och relationer 144
7.6.1 Allmänt 144
7.6.2 Spräckbrottandel och spräckhållfasthet 144
7.6.3 Tryckhållfasthet 147
7.7 Huvudförsök; Betongskivor- Tryckhållfasthetens beroende av härdningsförhållanden och avstånd till exponerad kant 156
7.7.1 Inverkan av provets RF och av gjuttekniken 156
7.7.2 Resultat 157
7.7.3 Slutsatser 160
7.8 Huvudförsök; Betongskivor- Tryckhållfasthetens beroende av uttorkning samt av uttorkning och upp-fuktning 161
7.8.1 Försöksmetodik 161
7.8.2 Resultat 162
7.8.3 Kommentarer 166
7.9 Huvudförsök; Betongskivor- Långtidsuppföljning av hållfastheten 167
7.9.1 Allmänt 167
7.9.2 Mätresultat 167
7.9.3 Slutsatser 174
7.10 Sammanfattande slutsatser av hållfasthetsprovning-arna 179

8. HYDRATATION 181

8.1 Hydratationsprodukter 181
8.2 Tidigare mätningar av hydratationen vid låga vct 183
8.3 Försök med cementpasta 188
8.3.1 Allmänt 188
8.3.2 Mätmetod 188
8.3.3 Felkällor och noggrannhet 189
8.3.4 Resultat 192
8.3.5 Slutsatser 195
8.4 Huvudförsök med betongskivor 195
8.4.1 Målsättning 195
8.4.2 Provade betonger 195
8.4.3 Provtagning 196
8.4.4 Mätmetod 197
8.4.5 Felkällor och noggrannhet 198
8.4.6 Resultat 199
8.4.7 Diskussion 206
8.5 Långtidsuppföljning av hydratationsutvecklingen hos betongskivor 210
8.5.1 Allmänt 210
8.5.2 Mätresultat 210
8.5.3 Slutsatser 224

9. FUKTDIFFUSIVITET OCH KAPILLARITET 225

9.1 Teori 225
9.1.1 Diffusivitet 225
9.1.2 Kapillaritet 229
9.2 Tidigare undersökningar av diffusivitet och kapillaritet 232
9.2.1 Diffusivitet 232
9.2.2 Kapillaritet 233
9.3 Mätningar av diffusivitet och kapillaritet 233
9.3.1 Allmänt- provberedning 233
9.3.2 Mätmetod för diffusivitet och felkällor 235
9.3.3 Mätmetod för kapillaritet och felkällor 237
9.3.4 Resultat av diffusivitetsmätningar med diskussion 237
9.3.5 Resultat av kapillaritetsmätningar med diskussion 241
9.4 Långtidsuppföljning; diffusivitet och kapillaritet 247
9.4.1 Allmänt 247
9.4.2 Resultat av diffusivitetsmätningar med diskussion 247
9.4.3 Resultat av kapillaritetsmätningar med diskussion 251

10. VÄRMEUTVECKLING 255

10.1 Allmänt 255
10.2 Tidigare mätningar 255
10.3 Egna mätningar 258
10.3.1 Allmänt- provade betonger 258
10.3.2 Kalorimeter- provningsteknik 259
10.3.3 Resultat 260
10.3.4 Diskussion 264
10.4 Slutsatser 268

REFERENSER 269

BILAGOR 1-12 277

ALFABETISKT REGISTER 375

SYMBOLER		Sort
a_1	förskjutning av dragkraftskurva	m
b_{fukt}	$=w_n/w_e$. Förhållandet mellan kemiskt bundet vatten (hydratvatten) och förångningsbart vatten	kg/kg
b_{statik}	balkbredd	m
c_1	avstånd från armeringsstång till underkant form	m
c_2	horisontellt avstånd från armering till formsida	m
c_s	avstånd mellan armeringsstänger	m
d	avstånd tryckt kant till armeringens tyngdpunkt	m
d'	avstånd tryckarmering till utsida betongtryckzon	m
f_1	tryckhållfasthet för standardkub 150 mm	MPa
f_3	tryckhållfasthet för utborrad cylinder Φ 40 mm	MPa
f_b	vidhäftningshållfasthetens grundvärde	MPa
f_c	tryckhållfasthet, "compressive" för betong	MPa
f_{cc}	dimensionerande tryckpåkänning för betong	MPa
f_{cck}	karaktäristisk tryckhållfasthet för betong	MPa
f_{ct}	dimensionerande dragpåkänning för betong	MPa
f_{ctk}	karaktäristisk draghållfasthet för betong	MPa
f_{spl}	spräckhållfasthet för utborrad cylinder Φ 40 mm	MPa
f_{st}	dimensionerande dragpåkänning för armering	MPa
f_{sc}	dimensionerande tryckpåkänning för armering	MPa
h	balkhöjd	m
k	specifika volymen av hydratvatten, $k=1-\delta w_n/w_n$	cm^3/g
k_1	1-k	cm^3/g
k_2	w_n/C vid fullständig hydratation	kg/kg
k_3	$k_1 \bullet k_2$	
l_b	förankringslängd	m
p	$=RF/x_{fukt}$. Fiktiv enhet för att erhålla ett samband mellan RF/x_{fukt} och x_{fukt} som innehåller förhållandet mellan kemiskt bundet vatten (hydratvatten) och förångningsbart vatten; se nedan	%
q	fukttransport	kg/m^2s
q_w, $q_å$	fukttransport i vattenfas respektive i porluft	kg/m^2s
$s_{hållf.}$	spräckbrottandel	%
s_{statik}	horisontell delning mellan vertikala byglar	m

u	fuktkvot	kg/kg
vct	vattencementtal= w_0/C. Förhållandet mellan mängd inblandat vatten i provet och mängd cement	kg/kg
vbt	vattenbindetal= $w_0/(C+S)$. Förhållandet mellan mängd inblandat vatten i provet och mängd bindemedel (cement och silikastoft)	kg/kg
vbt_{eff}	"effektivt" vattenbindetal= $w_0/(C+2 \bullet S)$. Förhållandet mellan mängd inblandat vatten i provet och mängd bindemedel (cement och silikastoft), varvid mängden silikastoft dubblerats	kg/kg
w^{105}	vikt vid 105° C	kg
w^{1050}	vikt vid 1050° C	kg
w_e	förångningsbart vatten; vid 105° uttorkat vatten	kg/kg
w_o	ursprunglig mängd vatten i provet vid blandning	kg/kg
w_n	kemiskt bundet vatten (hydratvatten)	kg/kg
x_{fukt}	$=1+(1-k) \bullet w_n/w_e$	
x_{statik}	tryckzonshöjd, avstånd från neutrallager till utsida betongtryckzon	m
A_{SI}	dragarmeringsarea som balanserar tryckkraft i betongtryckzonen	m^2
A_{SII}	dragarmeringsarea som balanserar tryckarmeringsarea	m^2
BBK 79	Bestämmelser för betongkonstruktioner av år 1979	
C	cementhalt	kg/m^3, kg/kg
Ks	armering, kamstål	
M_1	moment av maximal last placerad 350-400 mm från upplaget	kNm
M_2	moment av maximal last placerad 500-600 mm från upplaget	kNm
M_I	moment av tryckkraft i betongtryckzonen	kNm
M_{II}	moment av tryckarmering	kNm
$M_{ber.}$	moment beräknat enligt BBK 79 i brottstadiet	kNm
$M_{DIM.}$	moment beräknat enligt BBK 79 i säkerhetsklass 1	kNm
$M_{EG.T.}$	moment av egentyngd	kNm
M_{max}	moment av maximal provbelastning	kNm

NPs	armering, normalprofilerad stång	
P_k	kapillär porositet	m^3/m^3
$(P_k)_p$	cementpastans kapillär porositet	m^3/m^3
RF	relativ fuktighet	%
S_0	porfyllnadsgrad vid självuttorkning	m^3/m^3
S	halt av silikastoft	kg/m^3, kg/kg
SK	säkerhetsklass	
$V_{ber.}$	tvärkraft beräknad enligt BBK 79	kN
V_d	aktuell tvärkraft	kN
V_c	tvärkraft som upptages av betong	kN
V_{max}	tvärkraft av maximal last reducerad med hänsyn till upplagsavstånd	kN
V_s	tvärkraft som upptages av armering	kN
α	hydratationsgrad	
Γ	viktsförhållande mellan ballast och cement	kg/kg
δ_c	ångpermeabilitet	m^2/s
δ_p	ångpermeabilitet	kg/ Pa•m•s
δ_w	fuktdiffusivitet	m^2/s
δw_n,fukt	"kemisk krympning" när fukt övergår till hydratvatten	cm^3/g
δw_n,hydr	relativ förändring av hydratvattenmängden	kg/kg
σ_{sc},σ_s'	aktuell tryckpåkänning i armering	MPa
σ_s	aktuell dragpåkänning i armering	MPa
μ_a	glödgningsförlust för ballast	kg/kg
μ_c	glödgningsförlust för cement	kg/kg
Φ	diameter	m
ϵ	$=1-\mu_a$	kg/kg
ϵ_{cu}	brottstukning för betong (gränsstukning)	o/oo
ϵ_{sy}	gränstöjning för armering	o/oo
ϵ_s	aktuell töjning för armering	o/oo
ϵ_s'	aktuell stukning av armering	o/oo
n	$=(\mu_c+\Gamma\bullet\mu_a)/(1+\Gamma)$	
n_a	parameter; beror av täckskikt och stångdiameter, påverkar vidhäftningshållfasthetens grundvärde	

SAMMANFATTNING

Syftet med projektet var att jämföra egenskaper hos s k högpresterande betong dvs betong med mycket låga vattenbindetal (vbt) med motsvarande egenskaper hos normala betongkvaliteter. Studerade egenskaper är hydratation, hållfasthetstillväxt och fukttransportegenskaper. I hydratationsstudierna ingår analys av hydratvattenmängd, kemisk krympning och värmeutveckling.

Projektet delades i huvudsak upp i försök med cementpasta och bruk, laboratorieförsök med konstruktionsbetong samt fältförsök med industriellt tillverkad betong där två praktiska fall studerades nämligen en platta på mark och armerade balkar. Väsentliga resultat från undersökningen är:

Kap 3: Kemisk krympning

Den specifika volymen hos kemiskt bundet vatten är av storleksordningen 0.74 à 0.75 såväl hos olika typer av högpresterande betong som hos normal betong. Värdet överensstämmer väl med flera tidigare undersökningar för normal betong och antyder klart att i stort sett samma hydratationsprodukter bildas i högpresterande betong som i betong med normala vct.

Något tidsberoende för den kemiska krympningen kunde inte konstateras vilket klart antyder att i stort sett samma hydratationsprodukter utbildas i olika skeden av hydratationsprocessen.

Kap 4: Desorptionsisoterm

Genom att bestämma relativa fuktigheten (RF) hos självuttorkade betonger kunde en punkt på desorptionsisotermen fastställas. Detta antyder att desorptionsisotermen bestämd på detta sätt har ett mycket flackt förlopp vid låga vct, dvs små fuktändringar ger stora sänkningar av RF.

Kap 5: Betongproportionering. Betongtillverkning

Undersökningen visar klart att betongproportionering måste göras med stor omsorg om man skall kunna få betonger med hög täthet och hållfasthet. Såväl bindemedelstyp som ballasttyp är av betydelse. Försöket visar att partikelsprång hos ballasten, silikastoft och flytmedelstillsats är nödvändiga för att man skall erhålla en betong med acceptabel gjutbarhet.

Kap 6: Relativ fuktighet och självuttorkning hos betongskivor

Betong med lågt vct och med tillsats av silikastoft förvarad i vatten under lång tid (450 dygn), fortsätter att torka till en relativ fuktighet av ca 80%, helt nära den fuktexponerade ytan. Redan ett par veckor efter taktäckning kan en väl sammansatt (vattenlagrad) betong genom självuttorkning erhålla så låg RF att golvläggning kan ske.

Högpresterande betong med vbt<≈0.25 avger obetydligt med fukt varför RF efter lång tid ej blir nämnvärt mindre i en betong som torkat i luft jämfört med en membranhärdad betong.

En högpresterande betong är inte bara i det närmaste vattentät utan även i det närmaste lufttät, vilket från beständighetssynpunkt kan få betydelse för armerade betongkonstruktioner.

Kap 7: Hållfasthetsutveckling

Resultaten av hållfasthetsbestämningarna fram till ca 90 dygns ålder visar entydigt att man trots den stora självuttorknings-effekten hos betonger med låga vbt får en mycket god hållfasthetsutveckling i det inre av betongen.

Uttorkning under 1 månads tid visade sig öka tryckhållfastheten med ca 10% vid vct=0.24 och med ca 20% vid vct=0.58. Återuppfuktning i vatten under 1 månad av uttorkad provkropp sänkte hållfastheten med ca 10% jämfört med ursprungsvärdena för självuttorkat tillstånd. Orsaken till detta är inte klarlagd.

Betong med innehåll av silikastoft får på lång sikt en sämre tryckhållfasthetsutveckling än en betong utan silikastoft. Detta torde förklaras av att silikastoftet på ett tidigt stadium av härdningsprocessen sänker relativa fuktigheten i betong så lågt, att möjligheten till fortsatt hydratation av cementet minskas kraftigt. Silikastoftet tätar dessutom betongen så effektivt att vattenlagring ej ökar tryckhållfastheten hos betongen. Någon reduktion av tryckhållfastheten på lång sikt kunde ej noteras.

Vid låga vct finns en tendens till minskning av spräckhållfastheten mellan 90 och 450 dygns ålder. Detta gäller såväl betong med som betong utan silikastoft

Kap 8: Hydratation

Hydratationen hos högpresterande betong med låga vct fram till 450 dygns ålder, fortskrider i stort sett på samma sätt oberoende av härdningsförhållandena. Resultaten visar att i stort sett lineära samband råder mellan tryckhållfasthet och kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten. En sådan relation observerades t ex av **Powers & Brownyard (1948)** för cementbruk med normala vct.

Vid en långtidsuppföljning till 450 dygn konstaterades det att hydratvattenmängden går ner hos betong med silikastoft. Nedgången börjar ofta efter ca 90 dygns ålder. Detta är intressant och vidare forskning får konstatera huruvida nedgången beror på polymerisation av silikastoft eller på andra orsaker. Nedgången i hydratvattenmängd medförde dock inte någon minskning av tryckhållfastheten hos betongen. Däremot kan ett visst samband skönjas mellan nedgång i hydratvattenmängd och i spräckhållfasthet.

Kap 9: Fuktdiffusivitet och kapillaritet

Diffusiviteten hos högpresterande betong är lägre än vad som tidigare uppmätts för normal betong; som lägst en 1/10-del så stor.

Även ångpermeabiliteten är lägre för högpresterande betong än för normal betong.

Värdena för ångpermeabiliteten för högpresterande betong förefaller att ha ett minimum för vct≈0.33, vilket torde bero på att betonger med mycket låga vct är svårkomprimerade. Därför uppstår smärre defekter i strukturen vilket ökar genomsläppligheten.

Ett lineärt samband konstaterades mellan motståndstalet och kapillaritetstalet. Sambandet är generellt och gäller såväl högpresterande betong som normal betong.

Ett lineärt samband konstaterades även mellan motståndstalet och cementpastans kapillära porositet.

Kap 10: Värmeutveckling

Den abiabatiska värmeutvecklingen under den första tiden för betong med vct=0.58 är ca 25% högre jämfört med högpresterande betong med vct=0.24.

Den maximala temperaturen hos en värmeisolerad betongvolym (termosflaska) är ca 5°C lägre om silikastoft ingår i betongen och tryckhållfastheten är konstant. Den maximala temperaturen är i stort sett omvänt proportionell mot vct.

Tidsrymden fram till temperaturmaximum är i stort sett proportionell mot vct när mängden superplasticerare är konstant. Tidsrymden till temperaturmaximum ökar med mängden superplasticerare. Vid överdosering av superplasticeraren kan en betydande fördröjning uppstå i hydratationsprocessen.

En högpresterande betong med vct=0.24 testad i termoskalorimeter svalnar fortare än en normal betong med vct=0.58. Detta beror på att hydratationen avstannar i den förra betongen (självuttorkning).

Tillämpningsexempel 1: Platta på mark

Ett fullskaleförsök med en platta på mark visar att man genom att använda en högpresterande betong med tillräckligt lågt vbt kan få en i stort sett byggfuktfri betong trots fuktiga yttre väderförhållanden.

Resultatet visar god överenstämmelse med laboratorieförsöken.

Tillämpningsexempel 2: Armerad balk

Ett antal armerade betongbalkar av bl a högpresterande betong tillverkades i en elementfabrik och hållfasthetsprovades. Försöken visar att det är möjligt att med befintlig produktionsutrustning, möjligen kompletterad med utökad fuktkontroll av ballasten, industriellt tillverka tätt armerade balkar i högpresterande betong.

Bestämmelser för betongkonstruktioner av år 1979, BBK 79, kan användas för statisk beräkning av slanka balkar med tvärsnittet 100x200 mm för kubhållfastheter ända upp till 150 MPa.

Resultaten från balkförsöket verifierar de vid laboratorieförsöken framtagna sambanden mellan effektivt vattenbindetal och tryckhållfasthet.

SUMMARY

An experimental study has been made of High Performance Concretes, i. e. concretes with very low water-binder ratio concerning chemical shrinkage, self-desiccation, moisture diffusivity, heat release (calorimetry), hydration and strength growth.

Except for the chemical shrinkage and part of the self--desiccation and hydration, which were performed on cement paste or mortar, the study has been carried out on concrete. The results indicate high strength, remarkable self-desiccation and tightness for High Performance Concretes.

A field test carried out for a floating slab on the ground indicates remarkable self-desiccation even when the slab is exposed to rain. Tests on nontensional slender beams indicate that the Swedish Concrete Code BBK 79 also applies to High Performance Concretes at least at a cube strength less than 150 MPa.

Chapter 3: Chemical shrinkage

The specific volume of nonevaporable water is around 0.74 à 0.75 both for different types of High Performance Concrete and for normal concrete. The value coincides well with several previous investigations for normal concrete and clearly indicates that the same type of reaction products appear in High Performance Concrete as in concrete with normal values of the water-cement ratio.

No time dependence has been established for the chemical shrinkage, which clearly indicates that the same type of reaction products appear at different stages of the hydration process.

Chapter 4: Isotherm of desorption

By determening the relative humidity (RH) for self-desiccating concrete, one point of the Isotherm of desorption has been established. This indicates that the Isotherm of desorption established in this way has a very levelled appearance at low water-cement ratios, i e small changes in moisture content create large changes in RH.

Chapter 5: Concrete recipes. Concrete fabrication.

The investigation clearly showes that the concrete recipes must be performed carefully to obtain concretes with large tightness and strength. Both type of binder and type of ballast are important. The investigation indicates that a step between particles for the ballast is necessary, and that silica fume and superplasticiser also are necessary to obtain a pourable concrete.

Chapter 6: Relative humidity, RH, and self-desiccation of concrete slabs

Concrete with a low water-cement ratio and with addition of silica fume submerged for a long time (450 days) keeps drying until a relative humidity of 80% is obtained close to the surface exposed to moisture. As early as one month after pouring, floor can be laid on a well-composed (submerged) concrete that has obtained a sufficiently low RH due to self--desiccation.

High Performance Concretes with water-binder ratio less than about 0.25 emits little moisture, which leads to a moisture content only slightly less for air-exposed constructions as compared with membrane-insulated constructions.

High Performance Concretes appears to be not only tight for water but also tight to air which is of great importance for the durability of reinforced constructions.

Chapter 7: Development of strength

The results from determination of strength up to 90 days of age clearly indicate an excellent development at the inner parts of the concrete in spite of the large self-desiccation of concretes with low water-cement ratios.

Desiccation during 1 month increases the strength by 10% at a water-cement ratio of 0.24 and by 20% at a water-cement ratio of 0.58. Resaturation in water during 1 month of a dried-out specimen decreases the strength by 10% compared with the original value. The reason for this phenomenon is not yet known.

Concrete including silica fume gets less increase in strength than concrete without silica fume. This is most probably explained by the high degree of self-desiccation at early ages of the concrete caused by silica fume. The silica fume lowers the relative humidity in the concrete so much that the hydration of the cement decreases reasonably.

The silica fume also lowers the permeability in the concrete so much that even submerging does not effect the increase of the compressive strength of the concrete. However, no indication of a long time decreasing compressive strength exists.

At low water-cement ratios there exists a tendency for the split tensile strength to decrease by time. This applies to both concrete with and without silica fume.

Chapter 8: Hydration

The hydration of High Performance Concretes with low values of the water-cement ratio up to an age of 450 days continues in almost the same way independent of the curing conditions.

The results indicate almost linear relationships between compressive strength and ratio of nonevaporable water and mixing water. Such a relation was also observed by **Powers & Brownyard (1948)** valid for cement mortar at normal values of the water--cement ratio.

In a long-time study at 450 days of age the amount of nonevaporable water decreases in concrete with silica fume. The reduction often starts after an age of 90 days. This is an interesting observation. Further research must reveal if the decrease of nonevaporable water depends on polymerisation or on other reasons. No observations have been made of decreasing compressive strength due to decreasing amount of nonevaporable water. However, a slight relationship has been observed between decreasing split tensile strength and decreasing amount of nonevaporable water.

Chapter 9: Diffusivity and capillarity

The diffusivity of High Performance Concrete is lower than values earlier measured for normal concrete; the lowest only 1/10 as big.

Vapour permeability is also lower than for normal concrete.

The vapour permeability seems to have a minimum for a water--cement ratio of about 0.33 due to a decreasing compactibility for concretes with lower water-cement ratios. Due to this, small defects are created in the structure of the concrete which increases the vapour permeability.

A linear relationship has been established between the value of resistance to water penetration and the coefficient of capillarity. The relationship is general and also valid for normal concrete.

A linear relationship has been established between the value of resistance to water penetration and the capillary porosity of the cement paste.

Chapter 10: Heat of hydration

The adiabatic heat of hydration during the initial life of concrete with a water-cement ratio of 0.58 is about 25% higher than for High Performance Concrete with a water-cement ratio of 0.24.

The maximal temperature of an insulated concrete volume is about 5°C lower with 10% silica fume in the concrete at constant compressive strength. The maximal temperature is almost inverted to the water-cement ratio.

The time until the maximal temperature is reached is almost proportional to the water-cement ratio at the same time when the amount of superplastifier is constant. The time until the maximal temperature is reached increases with the amount of superplastifier. At overdosage of superplastifier, great delays can occur in the hydration process.

A High Performance Concrete with a water-cement ratio of 0.24 cools more rapidly than a normal concrete with a water-cement ratio of 0.58. This is explained by the self-desiccation that stops the hydration process.

Application 1: Slab on the ground

A full-scale test of a slab on the ground shows that using a concrete with lower water-cement ratios makes it almost possible to obtain a concrete free of moisture above a relative humidity, RH, above 90%, in spite of external wet conditions.

The results coincide well with the laboratory tests.

Application 2: Reinforced beams

A number of reinforced beams, most of them in High Performance Concretes, were fabricated in an element factory and tested by strength. The tests show that it is possible to produce High Performance Concrete beams, that are heavily reinforced, by use of ordinary production equipment, perhaps complemented by some moisture measurement equipment.

The Swedish Concrete Code BBK 79 also applies to High Performance Concretes for beams of a cross-section of 100x200 mm at least at a cube strength less than 150 MPa.

The beam tests also verify laboratory results of relations between compressive strength and effective water-binder ratio.

1. BEGREPPET HÖGPRESTERANDE BETONG; TIDIGARE FORSKNING

1.1 Begreppsförklaring

Med höghållfast betong avses här betong med 28 dygns tryckhållfasthet (150 mm kub) överstigande 80 MPa men med sådana reologiska egenskaper i färskt tillstånd att den kan blandas, transporteras, gjutas och komprimeras med nuvarande metoder. Maximal tryckhållfasthet är därför ca 140 à 160 MPa. Eftersom sådan höghållfast betong förutom hög hållfasthet även visat sig ha en rad andra gynnsamma egenskaper såsom självuttorkande förmåga och täthet, har ett nytt begrepp myntats nämligen "högpresterande betong".

Kvoten mellan mängd vatten och mängd bindemedel i betongen, vbt, är större än ca 0.35 för normal betong medan vbt för högpresterande betong kan variera mellan 0.20 och 0.35. Det låga vatteninnehållet kräver speciella tillsatser i betongen såsom silikastoft och framförallt flyttillsats (superplasticerare), för att betongen skall få en acceptabel gjutbarhet. Ofta krävs dessutom speciella cement. Även ballasttyp och ballastgradering är av avgörande betydelse för möjligheten att gjuta betong med lågt vct. Många betongegenskaper har visat sig vara starkt beroende av vattenbindetalet i den högpresterande betongen. Av dessa egenskaper kan särskilt nämnas hållfasthet, kapillaritet, permeabilitet och i praktiken uppnådd porfyllnadsgrad. Elasticitetsmodulen, däremot, är ungefär densamma som för konventionell betong. Detta beror på att elasticitetsmodulen hos betongen till stor del bestäms av ballastens elasticitetsmodul.

Med vissa typer av högpresterande betong och särskilt betong med mycket litet vatteninnehåll vid blandning, erhålls även en annan gynnsam egenskap, nämligen en låg byggfukthalt. Genom cement- och silikastoftreaktionerna binds nämligen en mycket stor del av det tillgängliga vattnet varför den färdiga betongen i bästa

fall ej avger någon fukt som kan skada omgivningen. Sådan högpresterande betong har därför en självtorkande förmåga som minskar risken för byggfuktskador.

1.2 Tidigare forskning

1.2.1 Internationellt

Informationsflödet beträffande höghållfast betong har ökat kraftigt under de senaste åren. Detta har huvudsakligen skett i form av tidningsartiklar och konferensrapporter. Referenslistan tar upp sådana intressanta artiklar vars resultat direkt kan kopplas till denna rapport. Litteraturöversikter återfinns i t ex **FIP-/CEB (1990), Parrott (1988)**. Flera internationella kongresser om högpresterande betong har avhållits jfr t ex **Shah (1979), Stavanger (1987)** respektive **Berkeley (1990)**.

Ämnet har således en hög aktualitet. Omfattande forskning pågår i ett flertal länder såväl i Norden som i Europa och USA. Av våra nordiska grannar har Norge genomfört det mest omfattande forskningsarbetet. Man har nu normerat karaktäristiska tryckhållfastheter, f_{cck}, upp till 105 MPa. Samtidigt har Finland godkända normer för f_{cck} upp till 70 MPa. Den svenska normen medger, som bekant, högst värdet 56.5 MPa på f_{cck}.

1.2.2 I Sverige

Tyvärr föreligger mycket få redovisade forskningsarbeten avseende höghållfast betong utförda i Sverige. Vissa studier har gjorts av specialbetonger vid CTH, jfr **Berntsson och Chandra (1989)**. Vissa undersökningar har även utförts vid Cementa AB, jfr **Karlsson (1977)** och **Fagerlund (1987A)**. Vissa delar av här rapporterat arbete har presenterats tidigare enligt **Fagerlund och Persson (1990)** samt enligt **Persson (1990A-D, 1991A-J, 1992A-E)**.

2. PROBLEMSTÄLLNINGAR, MÅLSÄTTNING, AVGRÄNSNINGAR OCH ALLMÄN UPPLÄGGNING AV FÖRSÖKEN

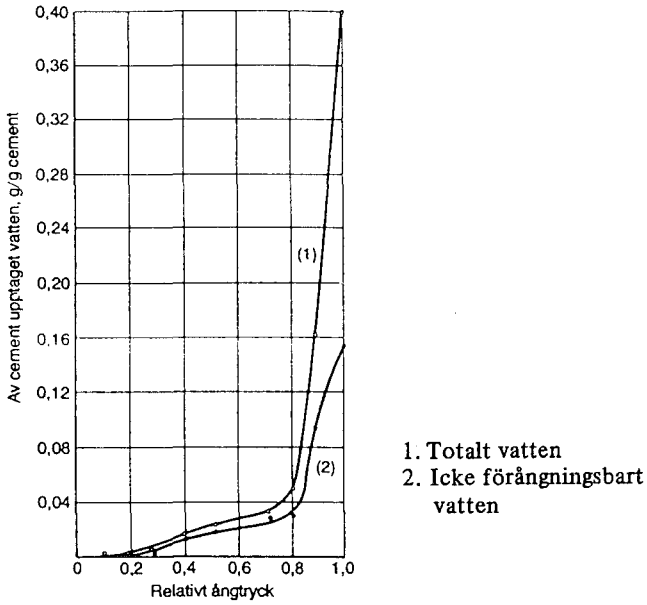
2.1 Generella problemställningar i samband med högpresterande betong

Många problemställningar måste bli klarlagda innan högpresterande betong kan få en större användning. De mest intressanta redovisas nedan (se även **Fagerlund (1988)**):

1: Självuttorkning och hållfasthetstillväxt

För normal betong har man funnit att cementreaktionen bromsas kraftigt när relativa fuktigheten, RF, i porsystemet sjunker. Vid RF understigande ca 70 à 80% är reaktionshastigheten i stort sett noll; se figur 2.1, som visar resultatet av en klassisk undersökning; **Powers (1946)**. Även vid högre RF dämpas cementreaktionen kraftigt.

RF i porsystemet kan sänkas genom uttorkning utåt. I mycket täta betonger med lågt vct kan emellertid RF sjunka kraftigt även genom s k självuttorkning. Detta beror på den "kemiska krympning" som porvattnet genomgår när det binds kemiskt till cementet. Ju lägre vct är och ju högre hydratationsgraden, α, är desto större är självuttorkningen. Självuttorkningen kan uttryckas genom den s k porfyllnadsgraden, S_0, hos ett membranhärdat prov (ju lägre S_0 desto större självuttorkning). I figur 2.2 visas hur denna porfyllnadsgrad beror på vct och hydratationsgrad; **Fagerlund (1980A)**.

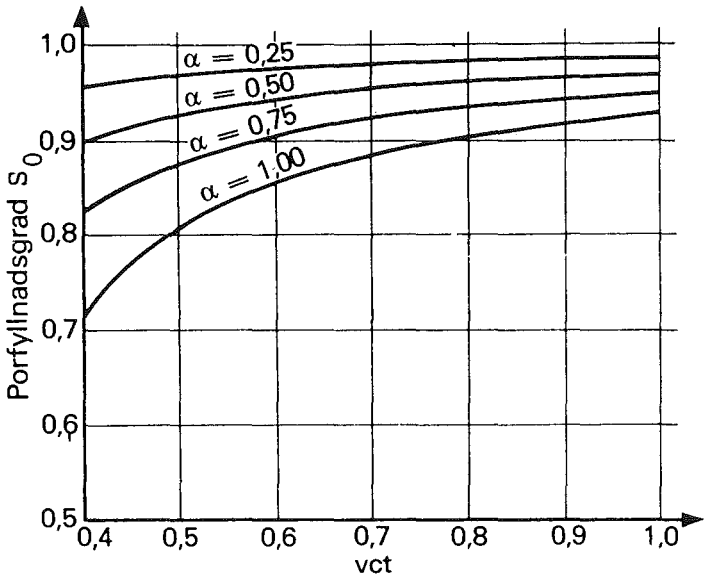


Figur 2.1 Kvoten mellan (under 6 mån) kemiskt bundet vatten och cement i cementpulver vid olika RF. Powers (1946)

Figure 2.1 Ratio (during 6 months) of chemically bound water to cement in cement powder at different relative humidities. Powers (1946)

I betong med mycket låga vct kan man tydligen förvänta sig en mycket kraftig självuttorkning vilken således kan förväntas försämra hållfasthetstillväxten. Självuttorkningen har emellertid även en stor positiv effekt nämligen en minskning av byggfukthalten. Även av denna orsak är det viktigt att klargöra självuttorkningseffekten och dess tidsförlopp.

Självuttorkningen skulle kunna vara ett särskilt stort problem vid grövre konstruktioner eftersom man där (i konstruktionens inre), skulle kunna förvänta sig extra låga värden på RF eftersom härdningsvatten utifrån torde få svårt att ta sig in i konstruktionens inre.

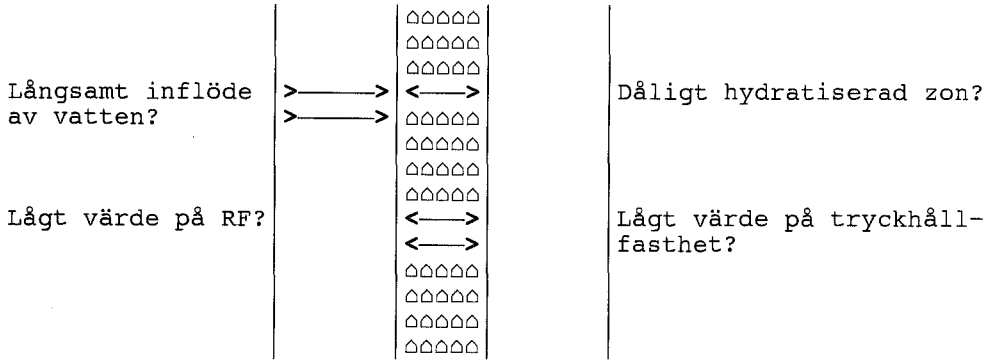


Figur 2.2 Porfyllnadsgraden , S_0, hos membranhärdad betong som funktion av vct vid olika hydratationsgrad, α. Fagerlund (1980)

Figure 2.2 Degree of saturation, S_0, of membrane cured concrete as function of water-cement ratio at varying degees of hydration, α. Fagerlund (1980)

Figur 2.3 visar denna principiella frågeställning vid massiva konstruktioner i högpresterande betong. Man kan emellertid inte utesluta att dessa problem uppstår även vid tunnare konstruktioner när vct är lågt. Problemet torde uppstå varje gång som det av cementreaktionen skapade porutrymmet ökar snabbare än inflödet av härdningsvatten utifrån.

Ett lågt värde på RF i den högpresterande betongkonstruktionens inre skulle alltså kunna förväntas ge ett lågt värde på hållfastheten. Detta är en väsentlig problemställning att studera.



Sektion genom en massiv konstruktion

Figur 2.3 Principiell frågeställning vid massiva konstruktioner i högpresterande betong.

Figure 2.3 Principal question at issue for massive constructions made out of high performance concrete.

2: Kemisk krympning av hydratvatten. Reaktionsprodukternas struktur.

För normal betong har man en kemisk krympning som uppgår till ca 25% av mängden hydratiserat vatten, w_n. Figur 2.2 bygger t ex på att den kemiska krympningen är just 25%. Man kan inte utan föregående undersökning vara säker på att denna kemiska krympning är lika stor för högpresterande betong. Måttet på den kemiska krympningen ger en indikation på om samma hydratationsprodukter bildas för högpresterande betong som för normal. Större kemisk krympning ger även större självuttorkning. Storleken av den kemiska krympningen hos högpresterande betong är därför en väsentlig frågeställning, som måste klargöras.

3: Värmeutveckling och temperatursprickbildning

Mycket låga vattencementtal, vct, på betongen kan förväntas ge hög värmeutveckling som följd särskilt med tanke på att även cementhalten kan förväntas bli hög. Det är således väsentligt

att utröna om samma mängd hydratationsvärme utvecklas per mängd cement vid högpresterande betong som vid normal. Det är även väsentligt att utröna hur stor värmeutvecklingen är hos betong med silikastoft.

Hög värmeutveckling kan ge sprickbildning som följd främst beroende på temperaturskillnader mellan betongens yta och dess inre eller mellan betongen och dess angränsande konstruktionsdelar eller luft. Detta är således en annan väsentlig problemställning att studera.

4: Gjutbarhet och kompaktering- effekt av blandningsrecept

God gjutbarhet är en väsentlig förutsättning vid all tillverkning av betong, även högpresterande sådan. Om gjutbarheten är dålig försämras, som bekant möjligheterna till god kompaktering. Det är således av avgörande betydelse att kontrollera, att den i laboratorieskala tillverkade betongen även kan tillverkas industriellt. Det är viktigt att utveckla villkoren för att detta skall kunna ske med ordinarie personal och utrustning.

Transport- och hanteringsfrågor utgör vidare väsentliga förutsättningar för att den högpresterande betongen skall få en praktisk användning. Om transport, gjutning och färdigbehandling kan utföras med nuvarande anordningar, det vill säga bask, roterbil och betongpump respektive med vibrostav och vibrobrygga eller laser och sloda är ytterligare exempel på en intressant frågeställning som måste klargöras.

5: Ekonomi

En högpresterande betong kommer (per kg eller m^3) att bli dyrare än en konventionell betong. Om högpresterande betong skall få en mera generell användning måste dess ökade prestanda mer än väl

kompensera dess högre pris. Relativt pris per prestanda för olika typer av högpresterande betong är därför en intressant frågeställning.

6: Emissioner

Högpresterande betong innehåller stora doseringar av tillsatsmedel. Det är viktigt att klargöra att dessa medel ej skapar sådana emissionsproblem, i form av elak lukt eller andra hälsoproblem, att dess användning omöjliggörs. Eventuella negativa hälsoeffekter av tillsatsmedel torde emellertid mer än väl kunna kompenseras av betonger med lägre byggfukthalt. Hälsoeffekterna måste under alla omständigheter klargöras.

7: Beständighet mot brand

Högpresterande betong är mycket tät. Detta innebär risk för s k ångsprängning i samband med brand. Å andra sidan är en högpresterande betong torrare än normal betong p g a självuttorkningseffekten. Man kan dock inte utesluta att de högpresterande betongerna är så känsliga för brand att de måste skyddas på något sätt. Detta måste klargöras.

8: Allmän beständighet

Högpresterande betong är p g a dess låga vattenbindetal mycket tät. Den torde därför ha en mycket hög grad av beständighet mot alla typer av inre angrepp t ex frostangrepp, armeringskorrosion, kemiska angrepp (kiselsyraangrepp eller sulfatangrepp). Vid tillräckligt låga vbt skulle betongerna bli resistenta mot angrepp. Detta är en frågeställning som bör klargöras eftersom beständighetsegenskaperna förmodligen ger den högpresterande betongen dess största potential som konstruktionsmaterial.

Sammanfattningsvis gäller alltså att man för att högpresterande betong skall kunna användas på optimalt sätt i praktisk byggverksamhet måste klargöra följande frågeställningar:

* Kan hög hållfasthet uppnås i det inre av massiva konstruktioner trots kraftig självuttorkning?

* Är självuttorkningen så stor att byggfuktproblem kan undvikas?

* Vilka cementreaktioner äger rum dvs vilka hydratationsprodukter bildas? Är dessa stabila?

* Har den högpresterande betongen så stor specifik värmeutveckling att kylning krävs redan vid tunna konstruktioner?

* Är dess konsistens så styv att den blir svår att gjuta eller ogjutbar?

* Blir transport- och hanteringsfrågor gränssättande?

* Omintetgör höga kostnader dess konkurrensförmåga?

* Ger emission av skadliga ämnen elak lukt eller andra hälsoproblem?

* Är den känslig för höga temperaturer t ex i samband med brand?

* Är den beständig mot frost och andra angrepp?

2.2 Målsättning med föreliggande arbete

I föreliggande arbete har vissa av de frågeställningar som beskrevs ovan behandlats. Delsyften med arbetet har varit:

1) att utröna tidsförloppet för hydratation, hållfasthet och relativ fuktighet för betong med vattencementtal mellan 0.20 och 0.60 tillverkad i konstruktionsskala och lagrad i olika fuktmiljöer. Provkroppsstorleken är 1 m för att effekten av inre självuttorkning i en massiv konstruktion skall kunna avslöjas,

2) att ge information om fuktdiffusiviteten för betong med vct varierande mellan 0.20 och 0.60,

3) att ge information om den adiabatiska värmeutvecklingen hos högpresterande betong jämfört med värmeutvecklingen hos normal betong,

4) att utröna storleken av den kemiska krympningen hos cementbruk med vct varierande mellan 0.20 och 0.60,

5) att ge information om desorptionsisotermen vid hög relativ fuktighet, RF, för cementbruk med vct varierande mellan 0.20 och 0.60,

6) att genom tillverkning av högpresterande betong i fabriksbetong och elementanläggningar studera möjligheterna att använda sig av ordinarie personal och utrustning,

7) att genom tillverkning av en platta på mark i full skala studera möjligheterna att använda sig av gängse utrustning det vill säga stavvibrering, laser och sloda,

8) att genom fältförsök i full skala studera självuttorkningen i en platta på mark samt

9) att studera bärförmågan hos slakarmerade balkar.

2.3 Avgränsningar

Följande avgränsningar gjordes i studien:

1) Hydratationsgrad och hållfasthet studerades enbart vid 28, 90, 140 och vid 450 dygns ålder. (Prover finns kvar för en uppföljning längre fram).

2) Relativa fuktigheten, RF, inne i betongen studerades vid 28 och 90 dygns ålder; uppföljning skedde efter drygt ett år.

3) Fuktdiffusiviteten bestämdes genom uttorkningsförsök dels för ung betong med ett dygns ålder vid torkstart, dels för välhärdad, vattenlagrad betong med ca 270 dygns ålder vid torkstart. Mätningen baserades på ca 270 dygns torktid varför jämvikt ej uppnåtts. Enbart ett medelvärde erhölls i det studerade fuktintervallet men ej diffusivitetens fuktberoende.

4) Värmeutvecklingen studerades upp till 14 dygns betongålder.

5) Desorptionsisotermen vid första torkning (den s k jungfruisotermen) studerades under 70 dygn. Endast en punkt erhölls på isotermen nämligen den punkt vilken motsvarar den RF som erhålles vid självuttorkning.

6) Den kemiska krympningen studerades under 15 dygn.

7) Fabriksbetong avsedd för elementtillverkning studerades vid vct= 0.24, 0.28, 0.31 och 0.57 samt pumpbetong vid vct=0.32.

8) Vid fältförsöket med platta på mark studerades relativa fuktigheten, RF, inne i plattan under ett halvår. (Plattan finns kvar för framtida studium).

9) Vid balkförsöken studerades relativa fuktigheten, RF, respektive statiska bärförmågan i brottillstånd vid 28 och 90 dygns ålder.

Materialmässigt skedde avgränsningen till ballast som finns i Lunds närhet, till i huvudsak anläggningscement samt till en halt av silikastoft som antingen är 0 eller 10% av cementvikten. Slutligen avgränsades till flyttillsats (superplasticerare) av typ naftalensulfonat (fabrikat Cementa, SP 62) med torrviktsdoseringar varierande mellan 0 till 2.8 % räknat på cementvikten. Vid tillämpningen platta på mark användes dock flyttillsatsen (superplasticeraren) melaminformaldehyd (fabrikat Perstorp, Peramin F) och luftporbildaren vinsolharts (fabrikat Perstorp, Peramin L).

2.4 Allmän uppläggning av försöken

2.4.1 Pastaskala

I pastaskala utfördes endast försök med dehydratation, dvs försök med hydratationbestämningar där mängden hydratvatten minskade efter en tid.

2.4.2 Bruksskala

Vissa studier utfördes i bruksskala nämligen

* Kemisk krympning

* Desorptionsisoterm vid självuttorkning

* Hydratationsutveckling

2.4.3 Betongskala

I betongskala genomfördes följande studier

* Relativa fuktigheten, RF, inne i betongen

* Tryck- och spräckhållfasthetsutveckling med avseende på tid och provkroppsgeometri

* Hydratationsutveckling med avseende på tid och provkroppsgeometri

* Fuktdiffusivitet genom torkförsök

* Kalorimetri för bestämning av hydratationsvärme

* Gjutbarhet

* Självuttorkning av platta på mark

* Statisk bärförmåga hos slakarmerade balkar

2.4.4 Kronologi

Tidsmässigt har försöken i huvudsak haft följande utsträckning

År	1989		1990				1991
Kvartal	3	4	1	2	3	4	1
<u>Pasta:</u>							
Dehydratation						--	---
<u>Cementbruk:</u>							
kemisk krympning		---	---				
desorptionsisoterm		---	-----				
hydratationsutveckling			-----	--	---	-----	---
<u>Betong:</u>							
RF	----	-----	-----	-----	-----	-----	
hållfasthetsutveckling		-----	-----	-----	-----	-----	
hydratationsutveckling		-----	-----	-----	-----	-----	
fuktdiffusivitet	----	-----	-----	-----	-----	-----	---
kalorimetri	---			-----	-----		
gjutbarhet		--			--		
självuttorkning					--	-----	--
statisk bärförmåga	----				--	--	

2.4.5 Delmaterial

En del material är gemensamma för samtliga laboratorieförsök
Andra material, använda vid fältförsöken, redovisas separat.

Laboratoriematerial:	Leverantör:
Anläggningscement	Cementa, Degerhamn
Silikastoft	Cementa, Micropoz
Naftalensulfonat	Cementa, SP 62
Kvartsitisk sandsten	Sydsten, Hardeberga
Grusig sand	Åstorps grus
Epoxi	Pelplast, EP 91

Data över delmaterialen ges i DATARAPPORT TVBM-7011; kap. 2.

3. KEMISK KRYMPNING

3.1 Teori

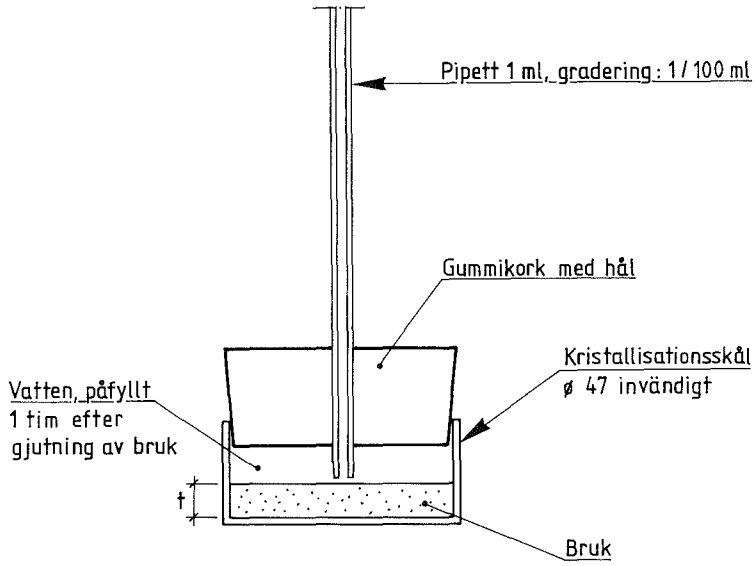
När vatten, cement och silikastoft blandas sker en kemisk reaktion varvid i huvudsak kalciumhydroxid och kalciumsilikathydrater bildas. Efter det att reaktionen startat, återfinns vattnet i tre olika faser nämligen

* som kemiskt bundet (kan glödgas bort vid 1050°),
* som fysikaliskt bundet till de inre materialytorna samt
* som fritt vatten (kapillärt vatten).

Såväl det fysikaliskt bundna som det fria vattnet avgår genom torkning vid 105°C. Normalt brukar dessa bägge typer av vatten inte särskiljas. De utgör tillsammans det s k förångningsbara vattnet och betecknas w_e ("evaporable water"). Det kemiskt bundna vattnet är icke förångningsbart och betecknas w_n ("nonevaporable water"). I stort sett är mängden fysikaliskt bundet vatten direkt proportionellt mot mängden kemiskt bundet vatten; **Powers & Brownyard (1946)**.

Då vattnet binds kemiskt sker en volymminskning inom den bildade gelen den så kallade kemiska krympningen. Vattnet som binds kemiskt har således en mindre specifik volym än det hade före reaktionen. Även det fysikaliskt bundna, adsorberade vattnet genomgår en viss krympning. Denna är dock så liten att den normalt kan försummas. **Powers (1960)** anger att specifika volymen hos förångningsbart vatten är ca 0.99 cm^3/g dvs mycket nära det värde som gäller för fritt vatten.

Mätning av den kemiska krympningen kan utföras genom pyknometerförsök där man använder sig av en glasskål, en gummipropp och en pipett, se försöksuppställning, figur 3.1.



Figur 3.1 Mätning av kemisk krympning genom pyknometerförsök

Figure 3.1 Setups for tests of chemical shrinkage

Provets tjocklek, t, måste vara liten. Eljest försvåras den inträngning av vatten varpå mätningen baseras dvs det bildas vakuum inne i provet och ett mätfel uppstår.

Eftersom den kemiska krympningen är ett tecken på hur långt reaktionen mellan vatten och bindemedel (cement och silikastoft) har fortskridit, kan man genom att mäta den kemiska krympningen också få en uppfattning om reaktionsförloppet.

Under förutsättning att den kemiska krympningen alltid är lika stor oavsett när den kemiska reaktionen sker- i tidigt eller i sent stadium- råder nämligen ett direkt proportionellt förhållande mellan kemisk krympning, δw_n, (cm^3) och hydratationsgrad, α.

$$\delta w_n = k_1 \cdot w_n \qquad \text{---------- (3.1)}$$

$$\alpha = w_n / C \cdot 1/k_2 \qquad \text{---------- (3.2)}$$

dvs

$$\delta w_n = k_1 \cdot k_2 \cdot \alpha \cdot C = k_3 \cdot \alpha \cdot C \qquad \text{---------- (3.3)}$$

där C är cementhalten i g/cm^3 och k_1 och k_2 är konstanter. k_2 utgör det värde på w_n/C som motsvarar fullständig hydratation (α=1). För normal portlandcement är k_2 ca 0.25. Även värdet på k_1 är 0.25 för normal betong baserad på portlandcement. För denna typ av betong gäller således:

$$\delta w_n = k_1 \cdot k_2 \cdot \alpha \cdot C = 0.25 \cdot 0.25 \cdot \alpha \cdot C = 0.063 \cdot \alpha \cdot C \qquad \text{---------- (3.4)}$$

dvs k_3=0.063

Hos högpresterande betong kan såväl k_1 som k_2 ändras. Värdet på k_1 erhålls genom att både den kemiska krympningen och totala kemiskt bundna vattenmängden mätes på samma prov. Ju lägre värde på k_1 desto högre specifik volym hos hydratationsprodukterna dvs ju mera kompakta är dessa.

Hydratationsgraden α kan bara beräknas om man antar att konstanten k_2 är oförändrad och oberoende av vbt. Värdet 0.25 väljes såväl för betong med rent portlandcement som vid inblandning av silikastoft.

Den maximalt möjliga hydratationsgraden kan bestämmas när värdena på k_1 och på gelporositeten, P_g (cm^3/cm^3) är kända; se t ex **Fagerlund (1992)**

$$\alpha_{max} = \frac{vct}{\frac{P_g}{1-P_g} \cdot \{(1-k_1) \cdot k_2 + 0.32\} + (1-k_1) \cdot k_2} \qquad \text{----------} \quad (3.5)$$

För normal betong är $P_g \approx 0.28$, $k_1 \approx 0.25$ och $k_2 \approx 0.25$ dvs

$$\alpha_{max} = \frac{vct}{0.39} \qquad \text{för } 0<vct<0.39 \quad \text{----------} \quad (3.6)$$

För högpresterande betong kan eventuellt gelporositeten ändras. Man kan få en uppfattning om gelporositeten genom att mäta den totala porositeten. Om man antar att P_g är oförändrad liksom k_2 fås följande uttryck för den maximala hydratationsgraden

$$\alpha_{max} = \frac{vct}{0.35(1-k_1)+0.13} \qquad \text{----------} \quad (3.7)$$

Det är alltså möjligt att lägre vct ger lägre hydratationsgrad.

Från hydratationssynpunkt kan också hållfastheten, f, och värmeutvecklingen, q, utvärderas eftersom alla dessa egenskaper i stort sett är lineärt beroende av varandra.

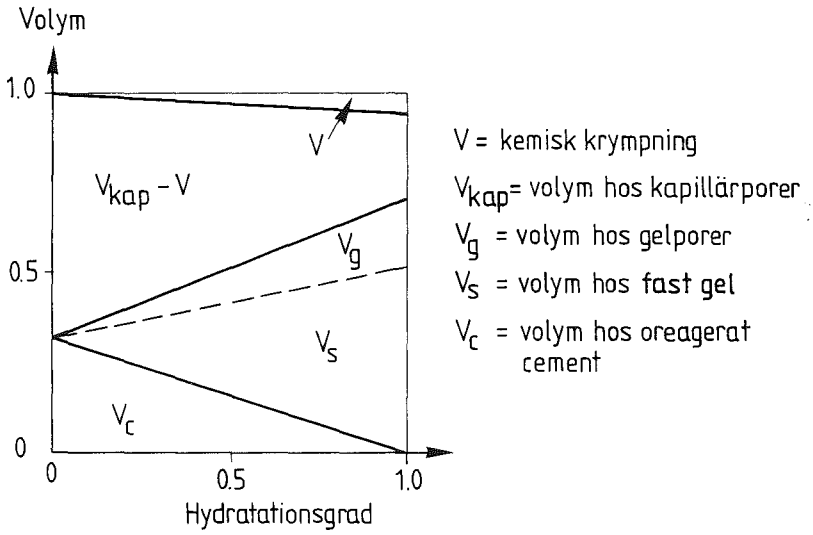
3.2 Tidigare mätningar av kemisk krympning

Geiker (1983) visar i figur 3.2 en principiell bild av hur ändringen av olika faser sker i en cementpasta med vct>0.40 som funktion av hydratationsgraden.

Powers (1960) anger 0.74 (cm^3/g) som ett medelvärde på specifik volym för kemiskt bundet vatten. Värdet baseras på mätning av

porositeten hos portlandcementpasta med vatten som medium. Mätningar med andra mätmedier ger något högre värde på den kemiska krympningen. Enligt Powers är den kemiska krympningen i stort sett konstant oavsett hydratationsgradens storlek.

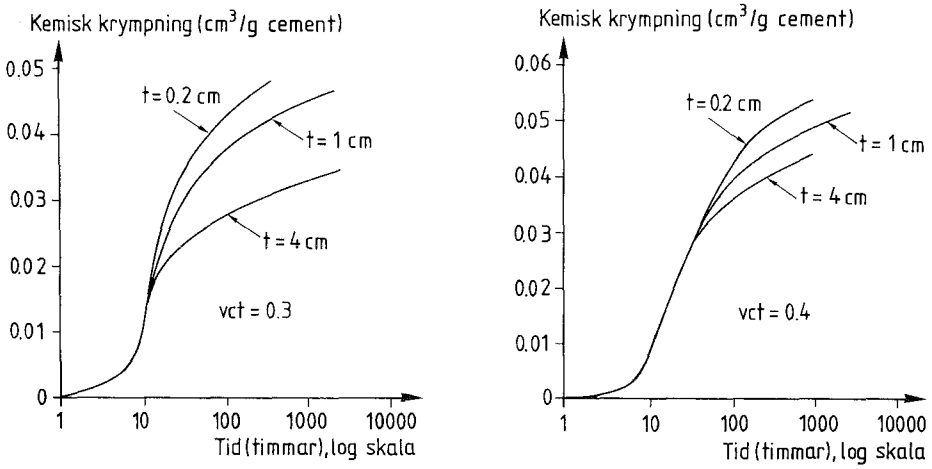
Powers har också studerat den inre gelporositeten dvs porvolymen inne i cementgelen. Han finner att denna för normal betong är ca 0.28 (cm^3/cm^3). Av rent geometriska skäl fås då den enligt ekv. (3.5) maximalt möjliga hydratationsgraden beskriven i ekv. (3.6).



Figur 3.2 Volymfördelning i cementpasta med vct>0.40 som funktion av hydratationsgraden. Geiker (1983)

Figure 3.2 Distribution of volume in cement paste ($w_0/C>0.40$) as function of degree of hydration. Geiker (1983)

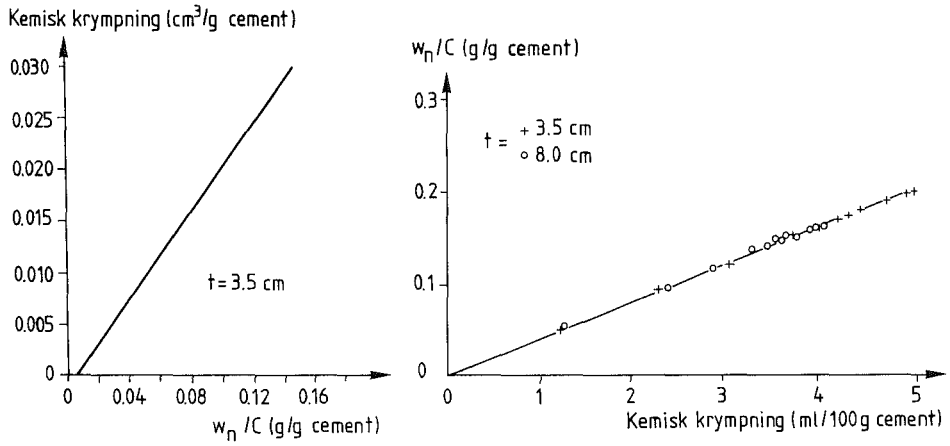
Knudsen (1987) har genomfört omfattande mätningar av kemisk krympning. Han visar, i figur 3.3, för cementpasta dels den kemiska krympningens tidsberoende, dels dess beroende av provkroppshöjden; jämför t i figur 3.1. Vattencementtalet var 0.30 och 0.40. Cementtypen var dansk snabbhårdnande portlandcement, vilket i stort sett motsvarar svensk standardcement. Figuren visar att den kemiska krympningen minskar med ökande provkroppstjocklek, t, vilket troligen beror på att den kemiska krympningen ej hinner kompenseras genom inflöde av vatten till provets bottenparti. Enligt figuren bör man vid vct=0.30 ej överskrida en provkroppstjocklek av t=1 cm.



Figur 3.3 Kemisk krympning i cementpasta som funktion av tiden och vid varierad provtjocklek, t (cm). Dansk snabbhårdnande portlandcement. Knudsen (1987)

Figure 3.3 Chemical shrinkage of cement paste as function of time at different specimen sizes, t (cm). The water--cement ratio is stated in the figure. Danish Rapid Hardening Portland Cement. Knudsen (1987)

Knudsen (1987) visar i figur 3.4 kemiskt bundet vatten i cementpasta som funktion av kemisk krympning, dels för danskt vanligt portlandcement med vct=0.30, dels för danskt snabbhårdnande portlandcement med vct=0.45. (Danskt vanligt portlandcement är betydligt långsammare än svenskt standardcement).



Figur 3.4 Kemisk krympning som funktion av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C. Vänstra figuren: Portlandcement, vct=0.30. Högra figuren: Snabbcement, vct=0.45. Knudsen (1987). (t=provkroppstjocklek)

Figure 3.4 Chemical shrinkage as function of ratio of nonevaporable water and cement, w_n/C. Left figure: Ordinary Portland cement; water-cement ratio=0.30. Right figure: Rapid Hardening Portland cement; water-cement ratio=0.45. Knudsen (1987).(t= layer thickness)

Den specifika volymen hos det kemiskt bundna vattnet, k, kan beräknas ur ekvationen

$$k=1-\delta w_n/w_n \qquad \text{----------} \quad (3.8)$$

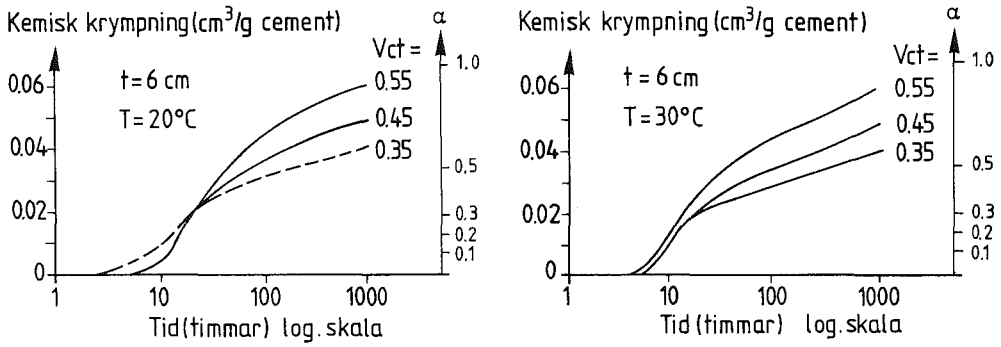
Enligt figur 3.4 är k=0.79 resp k=0.76 dvs värdena är något större än vad Powers anger, k=0.74. (δw_n anger kemisk krympning (cm^3) och w_n anger kemiskt bundet vatten (g) i ekv. (3.8)). Knudsen använder provkroppsstorlekar på 3.5-8.0 cm. Möjligen kan avvikelserna förklaras av att tjockleken har varit för stor och vakuum uppstått i cementpastan. Värdet på den kemiska krympningen blir då för litet dvs specifika volymen k beräkningsmässigt för stor. Vid fullständig hydratation av ett Portlandcement är $w_n \approx 0.25 \bullet C$. Vid en specifik volym av k=0.74 hos det kemiskt bundna vattnet får man då följande relativa hydratationsgrad ur ekv. 3.4 och ur den kemiska krympningen

$$\delta w_n = k_1 \bullet k_2 \bullet \alpha \bullet C = 0.063 \bullet \alpha \bullet C \qquad \text{----------} \quad (3.4)$$

$$\alpha \approx \frac{\delta w_n}{0.25 \bullet (1-0.74) \bullet C} \approx 15 \bullet \frac{\delta w_n}{C} \qquad \text{----------} \quad (3.9)$$

där δw_n är den kemiska krympning (cm^3) och C cementmängden (g).

Christoffersen och Sörensen (1986) visar i figur 3.5 den kemiska krympningen vid hydratation av cementbruk med olika vattencementtal, vct. Den kemiska krympningen blir, efter ca 1 dygn, mindre ju lägre vct är. Detta fenomen är välkänt och sammanhänger med att vatten får allt sämre möjlighet att ta sig fram till cementkornen ju lägre hydratationsgraden är alternativt ju lägre vct är vid en given hydratationsgrad. Figur 3.5 visar alltså hur man genom mätning av den kemiska krympningen kan beräkna hur hydratationsgraden utvecklas. Ur ekv (3.7) beräknade hydratationsgrader baserade på en kemisk krympning av 25% (dvs k=0.75) anges till höger i figuren ($\delta w_n = 0.063 \bullet \alpha \bullet C$)



Figur 3.5 Kemisk krympning hos cementbruk vid olika vct som funktion av tiden. Christoffersen och Sörensen (1986). (t= provkroppstjocklek)

Figure 3.5 Chemical shrinkage of mortar at varying water-cement ratios as function of time. Christoffersen and Sörensen (1986). (t= layer thickness)

Hooton (1991) har studerat den kemiska krympningen hos hydratvattnet i cementpasta genom s k flaskförsök. I en roterande vattenfylld flaska (pyknometer) fanns cementpasta med vct>1 samt stålkulor. Kulorna och rotationen säkerställde att s k fullständig hydratation erhölls. Rotationen pågick under 120 dygn varefter den kemiska krympningen hos hydratvattnet avlästes på flaskans stigrör. Det dröjde dock till ca 240 dygns ålder innan hydratationen bestämdes hos flaskinnehållet varför det här fanns en felkälla.

Hooton fann i sina försök att den specifika volymen hos hydratvattnet (ekv. (3.8)) uppgick till ca 0.74 för pasta av rent portlandcement medan han erhöll ca 0.72 då 10% silikastoft ingick räknat på innehållet av portlandcement; **Persson (1991G)**.

3.3 Förstudier

3.3.1 Förförsök med betong

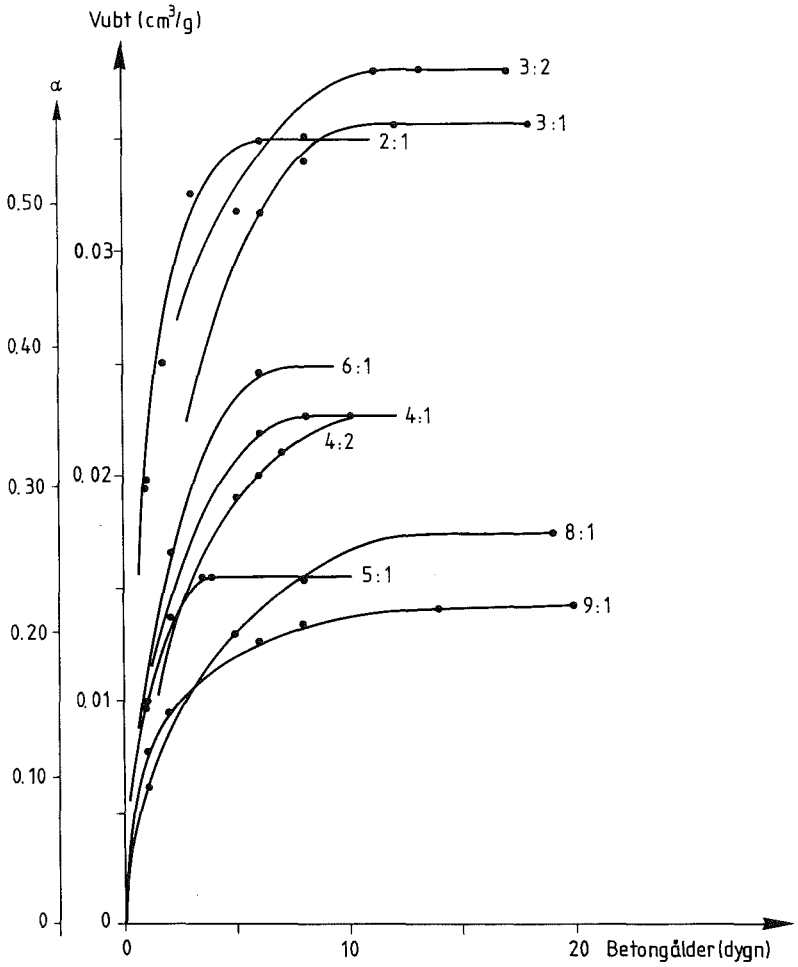
Den kemiska krympningen i betong som har full tillgång till vatten under hela hydratationsförloppet, har studerats. En liten mängd betong och med recept enligt tabell 3.1, göts i en glaskolv, vilken vattenfylldes och försågs med kork efter 3 tim. Korken var försedd med en pipett för att möjliggöra avläsning av krympningen. Den lilla vattenavdunstning som skedde i pipetten kompenserades genom avläsning av en kolv försedd med enbart vatten. Temperaturen hölls på 22-23°C. Försöksuppställningen visas i princip i figur 3.1.

Tabell 3.1 Kemisk krympning. Betongrecept vid förförsök.

Blandning	Cement	Silikastoft	Vct	Vbt
no	(kg/m^3)	(kg/m^3)		
2:1	298	-	0.58	0.58
3:1, 3:2	301	-	0.47	0.47
4:1, 4:2	297	30	0.48	0.44
5:1	398	-	0.33	0.33
6:1	386	39	0.36	0.33
8:1	474	47	0.24	0.22
9:1	481	48	0.22	0.20

Experimentella rådata redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 3.2.

I figur 3.6 visas utvärderade resultat i form av kvoten mellan kemisk krympning och summan av mängd cement och mängd silikastoft, Vubt, som funktion av ålder. I figuren har även teoretisk hydratationsgrad lagts in baserad på att ekv. (3.4) kan användas. Som synes får betong med låga vattenbindetal mycket låga hydratationsvärden.



Figur 3.6 Kemisk krympning hos betong som funktion av ålder. Vubt är kvoten mellan kemisk krympning och summan av mängd cement och mängd silikastoft. Vänstra skalan visar hydratationsgrad beräknad med ekv. (3.4).

Figure 3.6 Chemical shrinkage of concrete as function of time. Vubt is the ratio between chemical shrinkage and amount of binder. Left scale indicates degree of hydration calculated according to eq. (3.4)

På basis av glödgningsförluster erhållna vid huvudförsöken för samma betongblandningar som i tabell 3.1 (se kapitel 8) har den specifika volymen hos det kemiskt bundna vattnet beräknats ur ekv. (3.8)

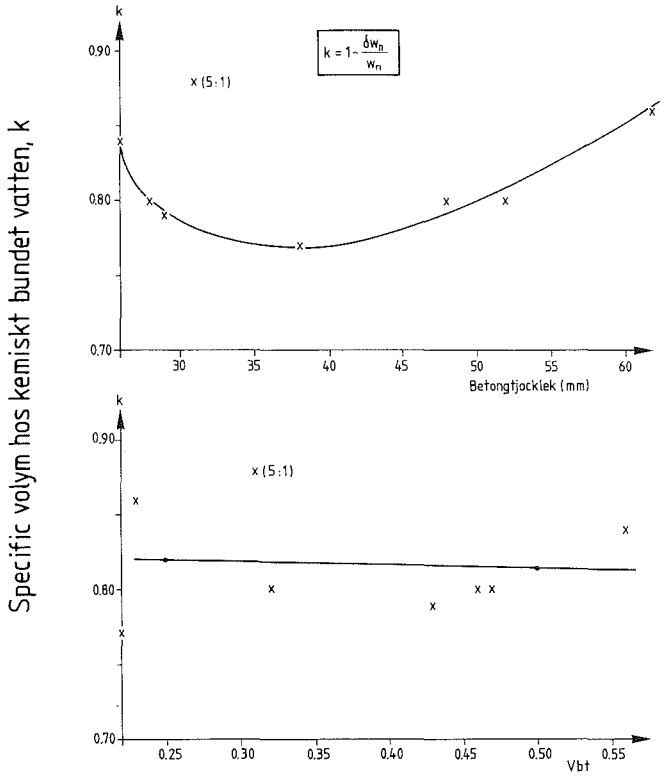
$$k=1-\delta w_n/w_n \qquad \text{----------} \quad (3.8)$$

δw_n i ekv. (3.8) anger därvid den kemiska krympningen kompenserad för avdunstning i pipetten samt glödgningsförlusten, w_n, mellan 105 och 1050°C kompenserad för förluster hos ballasten uträknad enligt Byfors (1980), dvs. w_n motsvarar enbart det kemiskt bundna vattnet. De på detta sätt beräknade värdena på den specifika volymen redovisas längst ned i DATARAPPORT TVBM-7011, 3.1.

Beräknade värde på den specifika volymen som funktion av tjockleken hos det prov som användes vid mätningen av den kemiska krympningen och som funktion av vbt visas även i figur 3.7. Den specifika volymen visar ett minimum för tjockleken 40 mm medan något vbt-beroende ej går att fastställa med hjälp av figur 3.7.

Medelvärdet av den specifika volymen är ca 0.82 dvs den kemiska krympningen ca 0.18. Att krympningen är mindre än tidigare känt t ex 0.74 enligt Powers enligt ovan, beror troligen på att betongskiktet haft för stor tjocklek så att fullständig vatteninträngning ej kunnat ske.

En annan möjlighet är naturligtvis att den kemiskt bundna vattenmängden systematiskt överskattats, t ex genom att betongproverna ej varit fullständigt uttorkade vid 105°C, när glödgningen startades. Denna felkälla har dock i görligaste mån eliminerats dels genom att betongproverna nedkrossats till högst 5 mm, dels genom att uttorkningen vid 105°C utförts under minst 1 månad (ofta längre tid).



Figur 3.7 Specifik volym hos det kemiskt bundna vattnet, k, som funktion av tjockleken på det prov varpå den kemiska krympningen bestämdes respektive som funktion av vbt.

Figure 3.7 Specific volume of nonevaporable water, k, as function of thickness of specimen used to determine the chemical shrinkage, and as function of water-binder ratio.

3.3.2 Förförsök med cementbruk

Eftersom förförsöken med kemisk krympning givit tveksamma resultat och resultat som delvis strider mot andra forskares resultat genomfördes även försök i bruksskala. All ballast med dimension

över 2 mm maskvidd togs därvid bort. Bruksblandningar, med recept enligt tabell 3.2, göts i glasflaskor med invändig diameter 47 mm. För att fastställa tjockleksberoendet har cementbruksskiktet varierats mellan 5 och 25 mm i höjd med 5 mm:s intervall.

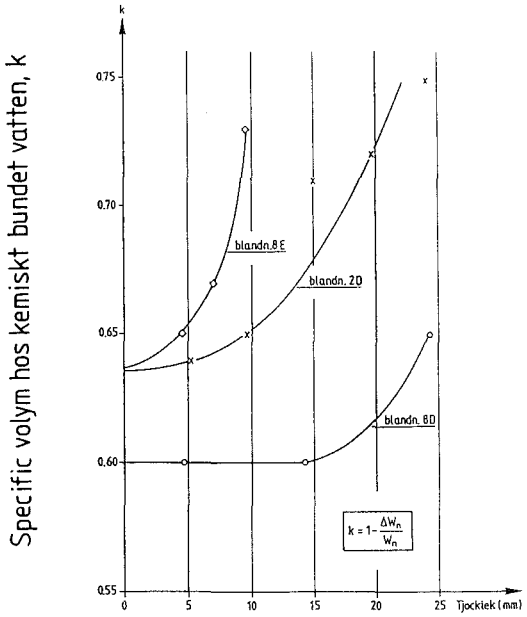
För att mängden vatten över provet skulle vara detsamma i alla prov har flaskorna igjutits med epoxi (EP 91) av varierande tjocklek. På så sätt hamnade bruksytan alltid på samma nivå. Korken har försetts med pipett och placerats i flaskan 1 tim efter gjutning i samband med att flaskan vattenfyllts. Försöksuppställning framgår i princip av figur 3.1 med den skillnaden att ett skikt av epoxi finnes under bruket. Den kemiskt bundna vattenmängden bestämdes enligt ekv. (3.10) i avsnitt 3.4.4. Proverna torkades först under minst 7 dygn vid 105°C samt glödgades därefter under minst 16 timmar vid 1050°C.

Tabell 3.2 Kemisk krympning. Bruksrecept vid förförsök.

Blandning	Cement	Silikastoft	Vct	Vbt
no	(kg/m^3)	(kg/m^3)		
2D	584	-	0.552	0.552
8D	1017	102	0.241	0.219
8E	1017	102	0.240	0.240

Experimentella rådata av kemisk krympning och kemiskt bundet vatten hos cementbruk redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 3.4-3.5. Den specifika volymen vid kemisk krympning, k, beräknades med ekv. (3.8) varvid de i ekvationen ingående värdena på kemiskt bunden vattenmängd erhölls enligt ovan. Beräknade specifika volymer som funktion av brukstjocklek, visas i figur 3.8.

Som synes är nu värdena betydligt lägre än det av Powers angivna värdet 0.74. Orsaken till detta är oklar. Som synes finns en stor effekt av provtjockleken. Denna bör ej överstiga ca 5 mm vid feta blandningar.



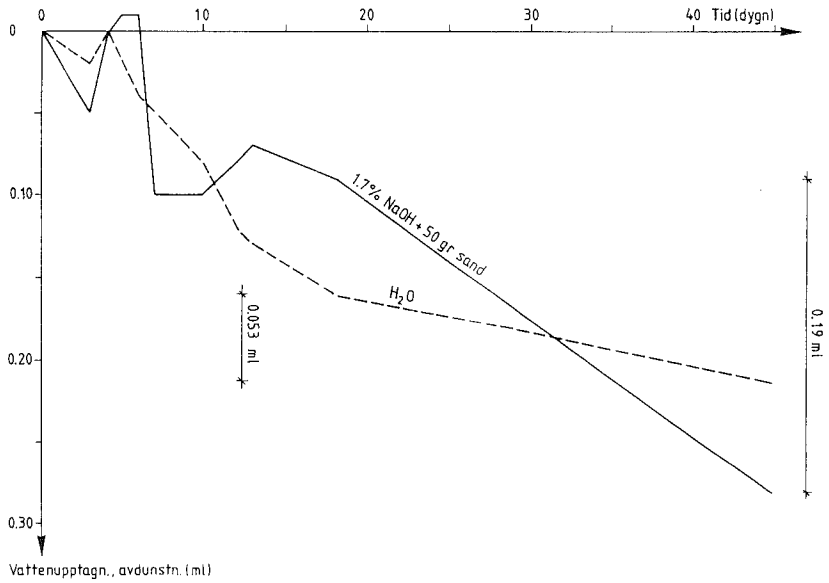
Figur 3.8 Specifika volymen hos kemiskt bundet vatten som funktion av provets tjocklek.

Figure 3.8 Specific volume of nonevaporable water as function of layer thickness

För att fastställa om en ev vattenupptagning hos sanden genom kemiska reaktioner kan påverka resultaten av de kemiska krympmätningarna har 50 g sand placerats i en glaskolv med ungefärligen samma basiska miljö som man har i betong. Kolven har således ifyllts med en 1.7 %-ig lösning av natriumhydroxid. För att kompensera för avdunstning har avläsning även utförts för en kolv fylld med enbart vatten. Mätresultaten redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011, 3.6. Resultaten visas även i figur 3.9.

Såväl vattenupptagning i sanden som avdunstningen i pipetten redovisas. Efter vissa inledande svängningar har vattenupptagningen stabiliserats efter ca 18 dygn. Kompensation för vattenupptagningen i sand blir således ca 10^{-4} ml per dygn och gram

sand. Detta är alldeles för liten korrektion för att resultaten i figur 3.8 skall ändras på ett radikalt sätt. En annan möjlig förklaring till resultaten i fig 3.8 är inverkan av temperatursvängningar.



Figur 3.9 Vattenupptagning hos sand och avdunstning i pipett som funktion av tiden. 1.7% lösning av NaOH

Figure 3.9 Absorption of water for sand and evaporation in a pipette as functions of time. 1.7% NaOH solution

I ytterligare ett förförsök med cementbruk har direkt kompensation skett för sandens vattenupptagning genom att en kristallisationsskål ifyllts motsvarande mängd sand, som den som användes i cementbruket. Samtidigt erhåller man då pipettens avdunstning. Uppställningen av förförsöket med kristallisationsskål framgår av figur 3.1. Samtliga kristallisationsskålar placerades i ett termostabilt rum. Resultat redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011;

3.7- 3.8. De beräknade värdena för specifika volymen hos kemiskt bundet vatten uppgick till 0.75 och 0.73.Dessa värden är fullt rimliga, jfr **Powers (1960)**.

3.3.3 Slutsatser av förförsök

Förförsöken med kemisk krympning visade, att betongförsök gav orimligt höga värden på det kemiskt bundna vattnets specifika volym. Detta berodde antingen på att den kemiska krympningen underskattades eftersom proverna av naturliga skäl var rätt tjocka eller på att den kemiskt bundna vattenmängden överskattades. Den förra förklaringen är troligast. Vid huvudförsöken skedde därför en övergång till försök i bruksskala. Brukshöjden begränsades till 7 mm. Vidare visade förförsöken, att kompensation bör ske för sandens kemiska reaktioner med alkalisk porlösning. Annars kan den observerade krympningen bli för stor. Slutligen bör proverna placeras i görligaste mån temperaturstabilt.

3.4 Huvudförsök

3.4.1 Allmänt

Försöken syftade till att bestämma såväl den kemiska krympningen som den kemiskt bundna vattenmängden som funktion av tiden. Bägge mätningarna gjordes på samma provkropp varför eventuella fel beroende på olika hydratationsförlopp eliminerades.

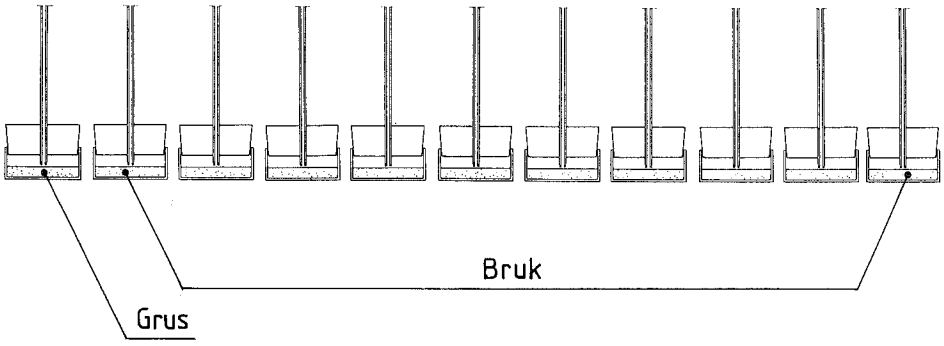
Alla mätningar utfördes på cementbruk. Recept framgår av tabell 3.3 nedan samt enligt DATARAPPORT TVBM-7011; 3.9. DATARAPPORT TVBM-7011, 3.10 redovisar glödgningsförlusten hos delmaterialen dvs sand och bindemedel samt aktuell fuktkvot för resp material.

Tabell 3.3 Kemisk krympning. Recept vid huvudförsök med bruk (SP 62= flyttillsats, torrvikt, w_0=vatten, C=cement S=silikastoft)

No	C	Silika	SP62	Vct	Vbt	Vbt_{eff}	Cementtyp
	kg/m³	% av C	% av C	w_0/C	$w_0/(C+S)$	$w_0/(C+2S)$	
1	1150	10	1.9	0.24	0.22	0.20	Slitecement
2	625	-	-	0.56	0.56	0.56	Anläggningscem.
3	600	-	1.0	0.46	0.46	0.46	"
4	700	10	0.7	0.47	0.43	0.39	"
5	900	-	0.8	0.33	0.33	0.33	"
6	975	10	0.8	0.35	0.32	0.29	"
7	1125	-	1.9	0.25	0.25	0.25	"
8	1350	10	1.9	0.24	0.22	0.20	"
9	1375	10	2.8	0.22	0.20	0.18	"
10	1350	10	1.9	0.24	0.22	0.20	Injekteringscem.

3.4.2 Metodik

Försöksuppställning framgår av figur 3.10 (t=7mm).



Figur 3.10 Mätning av kemisk krympning genom pyknometerförsök

Figure 3.10 Setups for tests of chemical shrinkage

Provningarna genomfördes enligt följande procedur:

1. 30 gram bruk göts och vibrerades i skålar med utvändig diameter 50 mm, vilka var vägda och märkta. 10 st skålar per blandning testades. I en skål per blandning fylldes samma mängd sand som ingick i resp blandning. Denna skål användes som referens.

2. Vägning av skål på 1/1000 grams våg skedde direkt efter gjutning.

3. 60 minuter efter gjutning fylldes skålen försiktigt med vatten av samma temperatur som rummet hade genom användning av flaska med pip. Detta gällde även skålen med sand.

4. En kork (no 64), som var avfasad i underkanten och (i genomborrat hål) försedd med en pipett om 1 ml med 1/100 ml delning, placerades i skålen. Pipetten var vattenfylld då den placerades i skålen eftersom skålen expanderade något. Eljest hade en luftblåsa uppstått i skålen och mätningen äventyrats.

5. Korken trycktes fast i skålen så att vattennivån blev ca 0.10 ml i pipetten.

6. Skålarna placerades i vattenbad med termometer. Vattennivån i pipetten, skålvikt, totalvikt samt temperatur i skålen noterades i protokoll.

7. Vattennivåns utgångsvärde i pipetten fixerades medelst påklistrad tejp.

8. Vattennivå noterades därefter efter 24 tim, 48 tim osv. upp till ca 14 dygn (med avbrott för helger).

9. Vattennivån noterades även i pipetten för den sandfyllda skålen under samma tidsperiod.

10. Efter 24 tim och sedan med 24 tim intervall tömdes en av de 10 st skålarna.

11. Bruksytan avtorkades från vatten med wettexduk.

12. Skålen vägdes på 1/1000 grams våg.

13. Skålen knäcktes i plastpåse och bruket uppsamlades.

14. En aluminiumburk vägdes utan och med uppsamlat bruk.

15. Uttorkning förhindrades genom placering i plastpåse före vägning.

16. Uttorkning utfördes under minst en månad i torkskåp vid 105°C.

17. Den varma burken med bruk ställdes i exsickator med torkad blågel.

18. Vägning av burken skedde då bruket hade svalnat till rumstemperatur.

19. Fuktupptagning utanför exsickatorn förhindrades genom placering i plastpåse.

20. En degel märktes och vägdes, utan och med det i exsickatorn torkade och avsvalnade bruket.

21. Degeln med bruk placerades på keramiskt underlag i en ugn som var inställd på 1050°C.

22. Ugnen slogs av efter minst 16 timmars glödgning.

23. Degeln med bruk placerades i exsickator då temp nått ca 700°C.

24. Degeln med bruk vägdes då rumstemperatur nåtts.

3.4.3 Felkällor

Temperaturvariationer under försökets gång:

Dessa minskades genom att både mätskål och referensskål placerades i vattenbad i ett så gott som temperaturstabilt källarutrymme utan fönster. Vattenbadets temperatur varierade som mest mellan 19.0 och 20.1°C. Kristallisationsskålen inklusive kork var täckt med vatten. Stigröret stack upp över vattenytan under försöket.

Inre värmeutveckling:

Värmeutvecklingen i betongbruket, speciellt de första dygnen, gav en viss värmeutveckling. Denna eliminerades i stort sett helt dels genom att den gjutna brukstjockleken endast var 7 mm, dels genom att kylning skedde av det omgivande vattenbadet, i vilket samtliga skålar placerades.

Pipettens mätnoggrannhet:

Denna var 1/100 ml varför skattning fått ske för mellanliggande värden.

Vågens noggrannheten:

Denna var 0.001 g vilket ger mycket små fel i hydratationsförloppet. Före varje vägning skedde dessutom avkylning av provet till ca +23°C i exsickator för att ej lyftkrafter på vågskål eller degel p g a förhöjd temperatur skulle påverka mätresultatet.

Fortsatt hydratation hos ungt cementbruk:

Vid hydratationsbestämningen värmdes provet först från ca 20°C till 105°C. Därvid skedde en viss hydratation, framförallt när bruket var något dygn gammalt. Man fick därför skenbart en för låg mängd fysikaliskt bundet vatten och en för hög mängd kemiskt bundet vatten.

I de redovisade resultaten gjordes därför ett tillägg motsvarande 6 timmars krympning, efter det att sista avläsningen av pipetten i kristallationsskålen, kunde ske. Dessa 6 tim innefattade hantering från kristallationsskål tills 105°C uppnåtts i torkskåp, samt kompensation för att hydratationen skedde snabbare vid temperaturer mellan ca 20°C och 105°C.

Reaktion hos sanden:

I förförsöken skedde en kontroll av vattenabsorptionen hos sand vid förhöjt pH-värde. En viss absorption skedde vilket tyder på att en kemisk reaktion ägde rum. Denna absorption hade ej någon betydelse för mätperioder understigande 15 dagar. Eventuell absorption i sand vid normalt pH samt avdunstning i pipetten kompenserades genom den s k referensskålen. Denna innehöll lika mycket sand som skålen med bruk. Felet var således litet.

Avdunstning i pipett:

Mätvärdena kompenserades för avdunstningen i pipetten genom den s k referensskålen.

En analys av de olika felkällornas betydelse görs i avsnitt 3.4.5.

3.4.4 Resultat

Uppmätta värden på den kemiska krympningen, δw_n, samt kvoten mellan kemisk krympning och mängd cement, $\delta w_n/C$, redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011, 3.11-20. Kvoten mellan mängd förångningsbart vatten och mängd cement, w_e/C, och kvoten mellan mängd hydratvatten och mängd cement, w_n/C, redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 3.21-30. w_n/C uträknas enligt **Byfors (1980)** enligt följande ekvation:

$$\frac{w_n}{C} = \frac{w^{105} \bullet (1-n) - w^{1050}}{w^{1050} - \epsilon \bullet \frac{\Gamma}{1+\Gamma} \bullet w^{105}} \qquad \text{---------- (3.10)}$$

med följande beteckningar

w_n/C andel kemiskt bundet vatten i förhållande till cementmängden (kg/kg)

w^{105} vikt vid 105° (kg)

w^{1050} vikt vid 1050° (kg)

Γ viktsförhållande mellan ballast och cement

μ_a glödgningsförluster för ballasten (kg/kg)

μ_c glödgningsförlusten för resp cementsort (kg/kg)

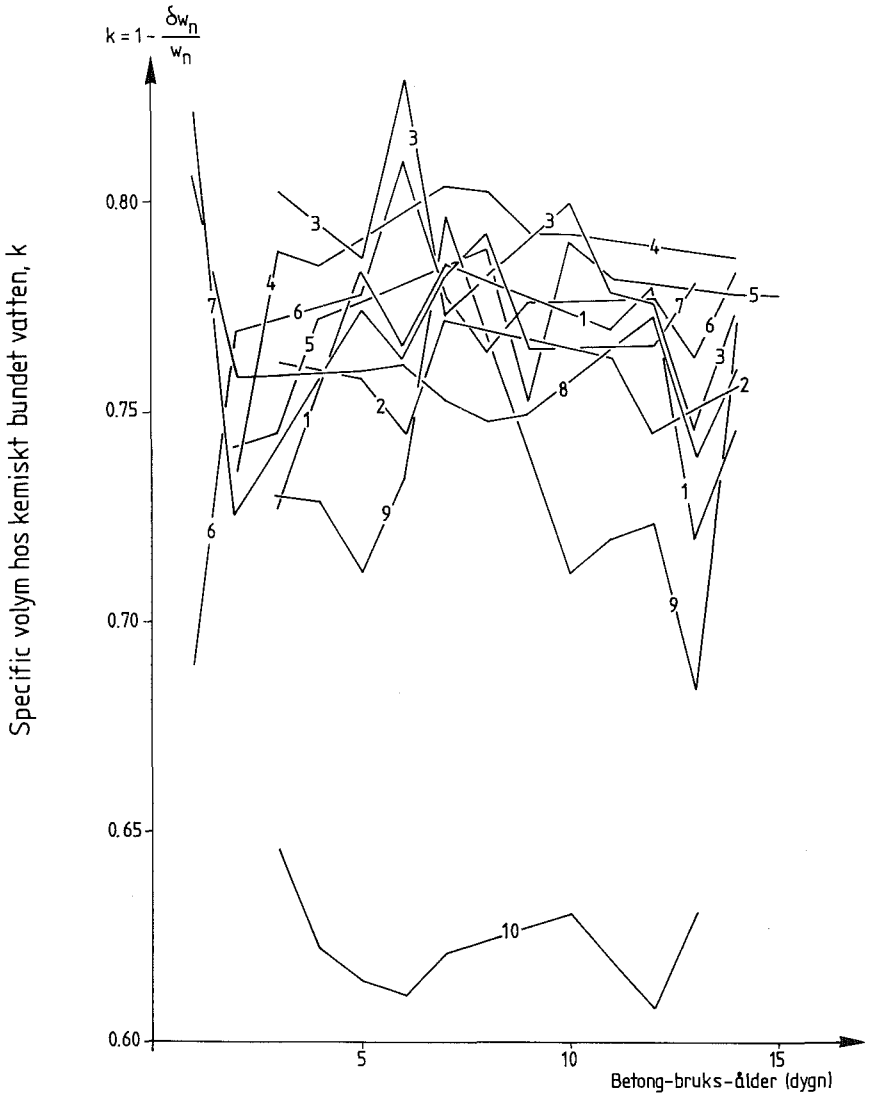
$$\epsilon \quad 1-\mu_a \qquad \text{---------- (3.11)}$$

$$n = \frac{\mu_c + \Gamma \bullet \mu_a}{1+\Gamma} \qquad \text{---------- (3.12)}$$

Den specifika volymen hos kemiskt bundet vatten, k, beräknades enligt ekv. (3.8) och redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 3.21-30. (δw_n och w_n beräknades i förhållande till cementmängden, C, eftersom en viss viktsförlust skedde då kristallisationsskålen krossades. δw_n och w_n härrörde från identiskt samma bruksprov). Glödgningsförluster för delmaterial redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 3.10.

Slutligen visas i figur 3.11 den specifika volymen hos kemiskt bundet vatten, k, som funktion av tiden. Som synes är resultaten tämligen varierande. Någon signifikant effekt av ålder kunde dock inte konstateras. Bortsett från blandning 10 vilken avviker signifikant från de övriga förefaller medelvärdet på hydratvattnets specifika volym vara ca 0.76, dvs värdet visar god överensstämmelse med det av Powers angivna värdet 0.74.

Den specifika volymen hos kemiskt bundet vatten vid blandningar med silikastoft föreföll inte avvika väsentligt från de värden som erhölls med rent portlandcement.



Figur 3.11 Specifik volym hos kemiskt bundet vatten, k, som funktion av tiden.

Figure 3.11 Specific volume of nonevaporable water, k, as function of time.

3.4.5 Felanalys

Det beräknade värdet på den specifika volymen vid kemisk krympning skall från noggrannhetssynpunkt bedömas med hänsyn till de i avsnitt 3.4.3 omnämnda felkällorna nämligen

a) volymförändring p g a temperatursvängningar (eliminerades genom att skålarna ställts i samma vattenbad)

b) värmeutveckling i bruk (eliminerad genom åtgärd i punkt a))

c) mätnoggrannhet i pipett (+/- 0.005 gram)

d) vågnoggrannhet (+/- 0.002 gram)

e) fortsatt hydratation under bestämning av glödgningsförlust bedömd med ledning av glödgningsförlusterna från intilliggande tidpunkter (+/-0.005 gram)

f) vattenabsorption i sand (betydelselös inom 15 dygn)

g) avdunstning i pipett (eliminerad genom referensskål).

Uträkning av specifika volymen skedde enligt

$$k = 1 - \frac{\delta w_n}{C \bullet (w_n/C)} \qquad \text{---------- (3.8a)}$$

där uttrycket i den inre parentesen erhölls enligt ekv. (3.10). Det sökta relativa felet i k kan även uttryckas som $\delta k/k$. Logaritmering av ekv (3.8a) ger

$$\ln k = \ln 1 - \ln \delta w_n + \ln C + \ln (w_n/C) = \ln C + \ln (w_n/C) - \ln \delta w_n \qquad (3.13)$$

Efter differentiering fås det relativa maximala felet, $\delta k/k$ (då $\delta \ln k/\delta k=1/k$)

$$\frac{\delta k}{k} = \frac{\delta C}{C} + \frac{\delta(w_n/C)}{(w_n/C)} - \frac{\delta(\delta w_n)}{\delta w_n} \qquad \text{---------- (3.14)}$$

För att underlätta den fortsatta behandlingen införs följande beteckningar:

$$D = w^{105} \bullet (1-^{n}) - w^{1050} \qquad \text{---------- (3.15)}$$

$$E = w^{1050} - \epsilon \bullet \frac{\Gamma}{1+\Gamma} \bullet w^{105} \qquad \text{---------- (3.16)}$$

$$F = \delta w_n \qquad \text{---------- (3.17)}$$

dvs enligt ekv. (3.10) är

$$\frac{w_n}{C} = \frac{D}{E} \qquad \text{---------- (3.18)}$$

Relativa felet enligt ekv (3.18) kan då skrivas som

$$\delta k/k=\delta C/C+\delta D/D-\delta E/E-\delta F/F \qquad \text{---------- (3.19)}$$

Som en första bedömning av relativa felen följer i tabell 3.4 en redovisning av relativa felet för blandning 8 vid 2, 8 och 14 dygns ålder med rådata enligt DATARAPPORT TVBM-7011; 3.18 och 3.28.

Tabell 3.4 Relativa delfel i värdet för den specifika volymen hos hydratvattnet, k

Fel	Ålder: 2 dygn	Ålder: 8 dygn	Ålder; 14 dygn
$\delta C/C$	0.004/17.6= 0.0002	0.004/16.1= 0.0002	0.004/16.1= 0.0002
$\delta D/D$	0.004/1.32= 0.0030	0.004/1.66= 0.0024	0.004/1.74= 0.0023
$-\delta E/E$	0.003/15.2= 0.0002	0.003/13.8= 0.0002	0.003/13.8= 0.0002
$-\delta F/F$	0.02 /0.37= 0.054	0.02 /0.49= 0.041	0.02 /0.49= 0.041

Inverkan av pipettens mätnoggrannhet, dvs $\delta F/F$, samt osäkerheter i tillägget för kemisk krympning under bestämning av glödgningsförlusten, dvs $\delta D/D$, blir helt dominerande. För blandning 8 blir relativa felet i k≈ 5%. Av de bägge termerna $\delta D/D$ och $\delta F/F$ är $\delta F/F$ klart störst. Av denna anledning har redovisningen i tabell 3.5 nedan, begränsats till att avse enbart den kemiska krympningen , $\delta F/F= \delta(\delta w_n)/\delta w_n$.

Sammanfattningsvis varierar relativa felet för kemisk krympning mellan 3.6% och 11%, med tendens att öka vid högre vct.

Tabell 3.5 Relativa felet i avläst värde på kemisk krympning $\delta(\delta w_n)/\delta w_n$

Bl	Vct	Ålder: 2 dygn	Ålder: 8 dygn	Ålder: 14 dygn	Medel
1	0.24	0.02/0.36=0.056	0.02/0.48=0.042	0.02/0.30=0.067	0.055
2	0.56	0.02/0.21=0.095	0.02/0.21=0.095	0.02/0.26=0.077	0.089
3	0.46	0.02/0.18=0.11	0.02/0.23=0.087	0.02/0.29=0.069	0.089
4	0.47	0.02/0.22=0.091	0.02/0.24=0.083	0.02/0.28=0.071	0.051
5	0.33	0.02/0.24=0.083	0.02/0.28=0.071	0.02/0.32=0.063	0.072
6	0.35	0.02/0.27=0.074	0.02/0.35=0.057	0.02/0.34=0.059	0.063
7	0.25	0.02/0.26=0.077	0.02/0.32=0.063	0.02/0.35=0.057	0.066
8	0.24	0.02/0.37=0.054	0.02/0.49=0.041	0.02/0.49=0.041	0.045
9	0.22	0.02/0.40=0.050	0.02/0.47=0.043	0.02/0.54=0.037	0.043
10	0.24	0.02/0.44=0.045	0.02/0.51=0.039	0.02/0.56=0.036	0.040
Medelvärde		0.068	0.062	0.051	0.060

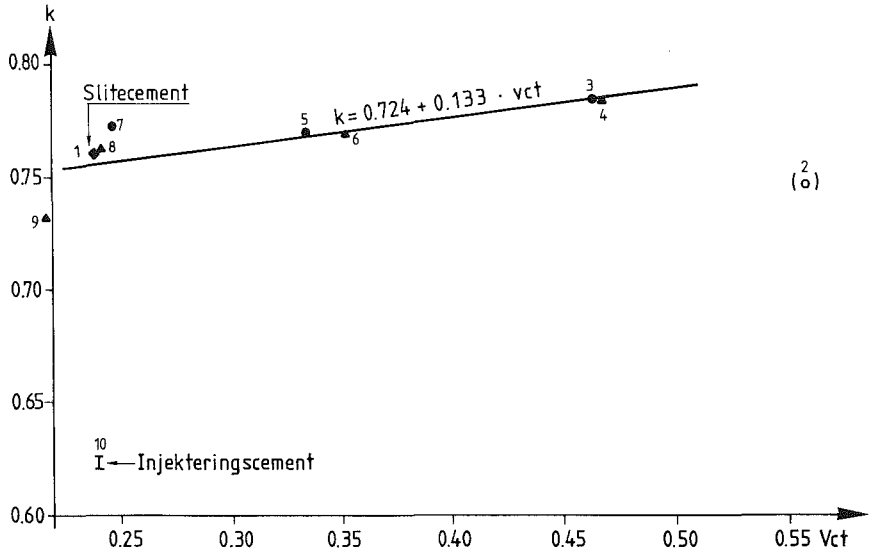
3.4.6 Diskussion

Eftersom ej något tidsberoende kunde konstateras för hydratvattnets specifika volymen, k, se figur 3.10, kunde medelvärden för k framräknas. Dessa medelvärden redovisas i tabell 3.6. Värdena är av samma storleksordning som de som uppmätts av Powers.

Tabell 3.6 Medelvärden av hydratvattnets specifika volym

Blandning no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_{medel}	0.76	0.76	0.78	0.78	0.77	0.77	0.77	0.76	0.73	0.62

I figur 3.12 visas den specifika volymen hos hydratvattnet, k, som funktion av vct.



Figur 3.12 Hydratvattnets specifika volym, k, som funktion av vct (siffra anges blandningsnummer)

Figure 3.12 Specific volume of nonevaporable water, k, as function of water-cement ratio. (figure= mixture)

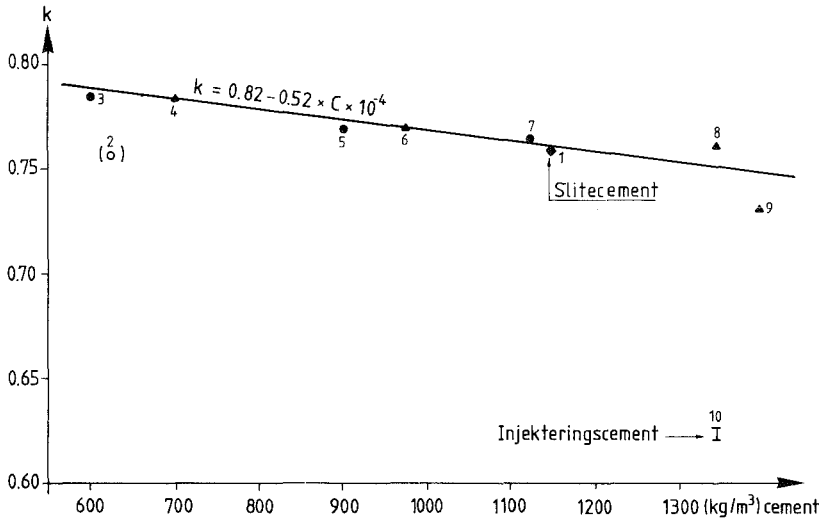
En regressionsanalys ger

$$k=0.724+0.133 \cdot vct. \qquad (3.20)$$

För vct=0.24 erhålles k=0.755
" vct=0.30 " k=0.764
" vct=0.36 " k=0.772

Tendensen är således att den kemiska krympningen ökar (mycket svagt) med sänkt vct. Denna tendens är emellertid med tanke på de felkällor som finns vid mätningarna inte säkerställd.

I figur 3.13 visas den specifika volymen hos hydratvattnet, k, som funktion av cementhalten C.



Figur 3.13 Hydratvattnets specifika volym, k, som funktion av cementhalten, C. (siffra= blandningsnummer)

Figure 3.13 Specific volume of nonevaporable water, k, as function of cement content, C. (figure= mixture)

En regressionsanalys av värdena i figur 3.13 ger

$$k=0.82-0.52 \bullet C \bullet 10^{-4} \qquad \text{----------} \quad (3.21)$$

där C anges i (kg/m^3). Inverkan av cementhalten är med största sannolikhet en indirekt inverkan av vct; ett minskat vct innebär nämligen normalt en ökad cementhalt. Figur 3.13 uppvisar därför i princip samma tendens som figur 3.12.

För helt ren cementpasta kan med givet vct (≈0.24) cementhalten beräknas ur ekvationen

$$vct \bullet C=1-C-0.1 \bullet C-0.0.019 \bullet C \qquad \text{----------} \quad (3.22)$$

C betecknar cementhalten i pastan. Insättning av ekv. (3.22) i ekv. (3.21) ger (extrapolerat) specifika volymen hos hydratvattnet.

För vct=0.24 erhålles C=1840 vilket ger k=0.725.
För vct=0.30 erhålles C=1770 vilket ger k=0.730.
För vct=0.36 erhålles C=1700 vilket ger k=0.731.

Möjligen kan den i cementbruket ingående sanden ha motverkat den kemiska krympningen och i sånt fall givit för höga värden på hydratvattnets specifika volym. Värdena ovan, där k varierat mellan 0.72 och 0.73, överensstämmer väl med värdet 0.72 som **Hooton (1991)** funnit för cementpasta med silikastoft.

Medelvärden på de specifika volymerna blir enligt figur 3.12 och 3.13

för vct=0.24 k=0.74
för vct=0.30 k=0.75
för vct=0.36 k=0.75

Dessa värden överensstämmer med det värde 0.74 som angetts av **Powers (1960)**. Injekteringscement ger dock anmärkningsvärt nog k=0.62 som medelvärde ur figur 3.10. Detta värde är baserat på 8 st mätningar med k=0.61 som lägsta värde och k=0.64 som högsta varför felmätning är utesluten. Värdena är svårförklarliga eftersom injekteringscementet har exakt samma sammansättning som anläggningscementet men är mera finmalt. Att korngraderingen skulle ha påverkat den kemiska reaktionen förefaller ej heller sannolikt. Om vakuum uppstått i provet till följd av en tätare struktur i cementbruk med injekteringscement så skulle detta resulterat i ett högre värde på den specifika volymen hos hydratvattnet och inte ett lägre som nu är fallet.

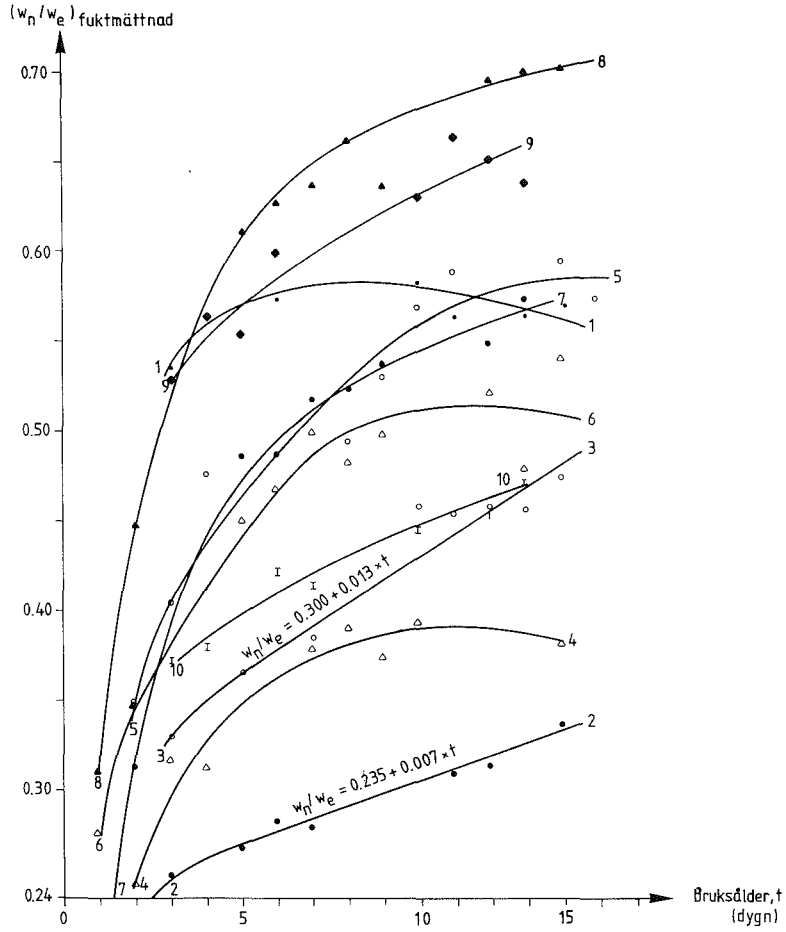
Medelvärden på k vid bruk utan flyttillsats (blandning nr 2) har borttagits vid beräkning av ekvationen, eftersom det avviker så markant. Separation hade troligen uppstått vid det höga vattencementtal, vct=0.56, som blandning 2 hade.

Eftersom cementhalten <u>kan</u> variera mellan olika kristallisationsskålar ur samma blandning, är det ej de nominella värdena av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C resp kvoten mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, som är intressanta utan snarare kvoten mellan hydratvatten och förångningsbart vatten, w_n/w_e. Denna kvot är nämligen för varje blandning en entydig funktion av hydratationsgraden, α. Teoretiskt gäller nämligen vid helt vattenmättad betong; **Fagerlund (1992)**

$$\frac{w_n}{w_e} = \frac{k_2 \cdot \alpha}{vct - k \cdot k_2 \cdot \alpha} \qquad (3.23)$$

dvs kvoten w_n/w_e är individuell för varje blandning och beror för varje enskild blandning bara på α.

I princip kan man beräkna hydratationsutvecklingen ur w_n/w_e-kurvor förutsatt att konstanterna k_2 (se ekv. (3.2)) och $k=1-k_1$ är kända. Normalt kan k_2 sättas till 0.25 medan k fås ur figur 3.10. Kvoten mellan hydratvatten och förångningsbart vatten, w_n/w_e, har visats i figur 3.14 som funktion av tiden.



Figur 3.14 Kvoten mellan hydratvatten och förångningsbart vatten som funktion av tiden hos vattenmättade prover.

Figure 3.14 Ratio of nonevaporable to evaporable water as function of time for saturated specimen.

I figur 3.14 åskådliggörs en skillnad mellan bruk med och utan tillsats av silikastoft. Utan tillsats av silikastoft finnes ett lineärt tidsberoende medan det med silikastoft blir parabelformat. Således erhålles en minskning av kvoten, w_n/w_e, vid tillsats av silikastoft då bruket är mer än ca 1 vecka gammalt. Detta visar att en annan hydratationsutveckling sker hos cementbruk med silikastoft troligen av bildning av kalciumsilikathydrater; **Kühl (1967)**.

Vid s k polymerisation av kalciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) och silikastoft (SiO_2) bildas längre och längre kedjor där 2 st OH-grupper slås samman före varje steg som kedjan utvidgas. Bryggan i denna kedjebildning är en syreatom varför resterande del av de bägge OH-grupper bildar en vattenmolekyl. Mängden förångningsbart vatten, w_e, skulle således kunna öka i provet trots att det redan är vattenmättat. Om w_e ökar så minskar kvoten w_n/w_e när polymerisationen startar. Ur figur 3.14 skulle man således kunna fastställa denna tidpunkt vid maximum på parabeln.

En annan förklaring till att kvoten, w_n/w_e, uppvisar ett maximum för vattenmättad cementbruk med silikastoft skulle vara att mängden hydratationvatten minskar (dehydratation), dvs α minskar i ekv. 3.23. Dehydratation av cementpasta med silikastoft har konstaterats av **Zhang och Gjörv (1991)** samt även under kapitel 8 i denna rapport (även för betong). Dehydratationen startar dock först vid ungefär 90 dygns ålder varför polymerisation trots allt är den mest troliga förklaringen till maximivärdena för w_n/w_e-kurvor när silikastoft ingått i receptet.

I kapitel 4 och 8 i denna rapport visas tidsberoendet för kvoten mellan hydratvatten och förångningsbart vatten, w_n/w_e, för prover som är upp till 90 dygn gamla.

3.4.7 Slutsatser

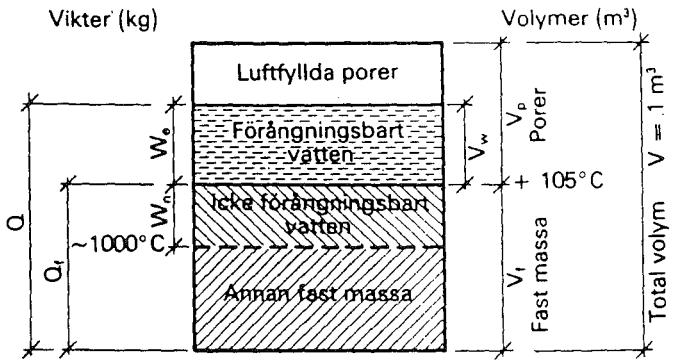
Den specifika volymen hos kemiskt bundet vatten är av storleksordningen 0.74 à 0.75 såväl hos olika typer av högpresterande betong som hos normal betong. Värdet överensstämmer väl med flera tidigare undersökningar för normal betong och antyder klart att i stort sett samma hydratationsprodukter bildas i högpresterande betong som i betong med normala vct.

Något tidsberoende för den kemiska krympningen har inte kunnat konstateras vilket klart antyder att i stort sett samma hydratationsprodukter utbildas i olika skeden av hydratationsprocessen.

4. SJÄLVUTTORKNING OCH DESORPTIONSISOTERM

4.1 Teori

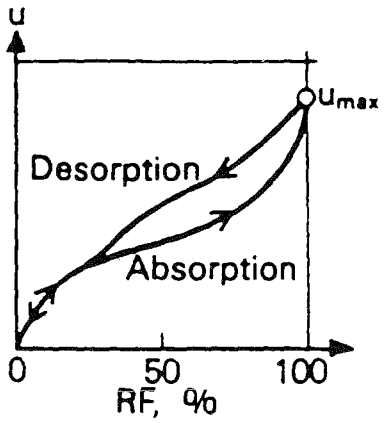
Betong, som är ett finporöst material, har stor förmåga att binda fukt, som tas upp direkt ur luften. Ju högre relativa fuktigheten, RF, är, desto mer vatten kan bindas. Denna fuktbindande förmåga, hygroskopiciteten, kan bero endera på adsorption (RF<45%) eller på kapillärkondensation (RF>45%). Fuktkvoten anges som $u=w_e/Q_f$, där w_e är mängd vid 105° förångat vatten (kg) och Q_f mängd fast massa vid 105° (kg), se figur 4.1.



Figur 4.1 Blockschema, poröst material. Fagerlund (1980). (Q massa, Q_f fast massa, w_e, w_n förångningsbart resp kemiskt bundet vatten, V volym, V_p volym porer, V_w volym förångningsbart vatten, V_f volym fast massa)

Figure 4.1 Block sketch of porous material. Fagerlund (1980). (Q mass, Q_f solid mass, w_e evaporable water, w_n chemically bound water, V volume, V_p volume of pores, V_f volume of solid mass, V_w volume of evaporable water)

Betongens hygroskopicitet åskådliggörs oftast grafiskt, där RF anges på ena axeln och fuktkvoten, u, på den andra en s k sorptionsisoterm eller jämviktsfuktkurva. Som framgår av figur 4.2 finns det en kurva vid vattenupptagning, absorption, och en kurva vid fuktavgivning, desorption. Av benämningen, isoterm, framgår att det finns ett visst temperaturberoende för kurvan. Jämviktsfuktkvoten ökar således med sänkt temperatur dvs ju kallare materialet blir desto mera vatten binder det hygroskopiskt.



Figur 4.2 Sorptionsisoterm eller jämviktsfuktkurva dvs fuktkvoten, u, som funktion av relativa fuktigheten, RF (%), dels vid absorption, dels vid desorption.

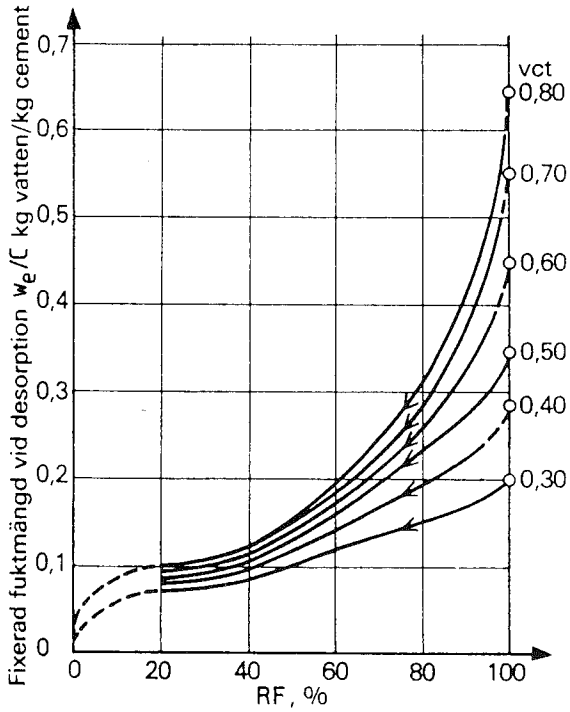
Figure 4.2 Sorption-isotherm ie moisture content, u, as function of relative humidity, RF (%), at absorption and at desorption.

Desorptionsisotermen är synnerligen intressant att studera eftersom man med hjälp av denna kan fastställa hur mycket vatten som finns att torka ut från fuktmättnad, RF=100%, och ned till en viss fuktnivå, t ex RF=85%. Denna uttorkade fuktmängd ned till en, för exempelvis golvläggning, helt säker RF-nivå, benämnes ofta den "farliga byggfukten".

Desorptionsisotermens utseende ger ofta en god indikation på materialets porstruktur. Ju finare porer, desto längre åt vänster förskjuts isotermen. Sambandet mellan porradie och de RF vid vilka fukt binds beskrivs av den välkända Kelvinekvationen.

4.2 Desorptionsisotermer enligt Nilsson (1980)

Nilsson (1980) anger desorptionsisotermer för uttorkning vid varierande vattencementtal, vct, och hydratationsgrad, α, se figur 4.3. I stället för fuktkvoten, u, visas i figur 4.3, kvoten mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, som funktion av RF. Kvoten, w_e/C, används som beroende variabel eftersom sorptionskurvan definitionsmässigt skall visa w_e, dvs den fria fukthalten. Inringade värden visar kvoten mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, vid fullständig vattenmättnad. Nilssons desorptionsisotermer gäller för betong som baseras på rent portlandcement.



Figur 4.3 Kvoten mellan förångbart vatten och cement, w_e/C, som funktion av RF. Nilsson (1980).

Hydratationsgraden antas vara 0.50 vid vct=0.30
0.60 vid vct=0.40
0.80 vid vct=0.50-0.80

Figure 4.3 Ratio of evaporable water to cement, w_e/C, as function of relative humidity, RF. Nilsson (1980)

Degree of hydration is assumed 0.50 at w_0/C=0.30
0.60 at w_0/C=0.40
0.80 at w_0/C=0.50-0.80

w_0/C indicates water-cement ratio

4.3 Egna mätningar

4.3.1 Mätprincip

När betongen hydratiserar utan tillgång till vatten utifrån kommer, p g a den kemiska krympningen hos hydratvattnet (se föregående kapitel), en självuttorkning att ske. RF inne i betongen kommer alltså att sjunka. Så småningom, när hydratationshastigheten är mycket långsam, kommer betongen att i stort sett ha ställt in sig i jämvikt dvs RF har nått ett slags sluttillstånd. Motsvarande fria fuktkvot i materialet ger alltså jämviktsfukthalten vid denna RF och detta hydratationstillstånd. Genom att följa hur hydratationsgraden och RF utvecklas under en hydratation i fuktisolerat tillstånd kan man alltså få fram en punkt på desorptionskurvan.

Eftersom ingen fukt avges ur systemet eller tillkommer gäller följande uttryck för mängden förångningsbart vatten; **Fagerlund (1992)**

$$(w_e/C)_{RF} = (w_0/C) - (w_n/C) \qquad \text{----------(4.1)}$$

där C = mängd cement (kg/m^3)
w_0 = mängd blandningsvatten (kg/m^3)
w_n = mängd kemiskt bundet vatten (kg/m^3)

För rent portlandcement är $w_n/C \approx 0.25 \bullet \alpha$ där α är hydratationsgraden. Alltså gäller i detta fall

$$w_e/C = vct - 0.25 \bullet \alpha \qquad \text{----------(4.2)}$$

Fuktinnehållet beräknat med ekv. (4.1) eller (4.2) baserad på en mätning av w_n vid den RF som gäller vid samma hydratation ger alltså den eftersökta punkten på desorptionskurvan. Alternativt kan w_e bestämmas med torkning vid 105°C.

Jämviktsfuktkvoten vid RF=100% och samma hydratationsgrad ges av villkoret att hela porositeten (dvs gel- och kapillärporer) skall vara vattenfyllda; **Fagerlund (1980A) eller (1992)**

$$(w_e/C)_{RF=100}=(w_0/C)-k\bullet(w_n/C) \qquad \text{----------(4.3)}$$

där k är den specifika volymen hos hydratvattnet, se ekv. (3.8).

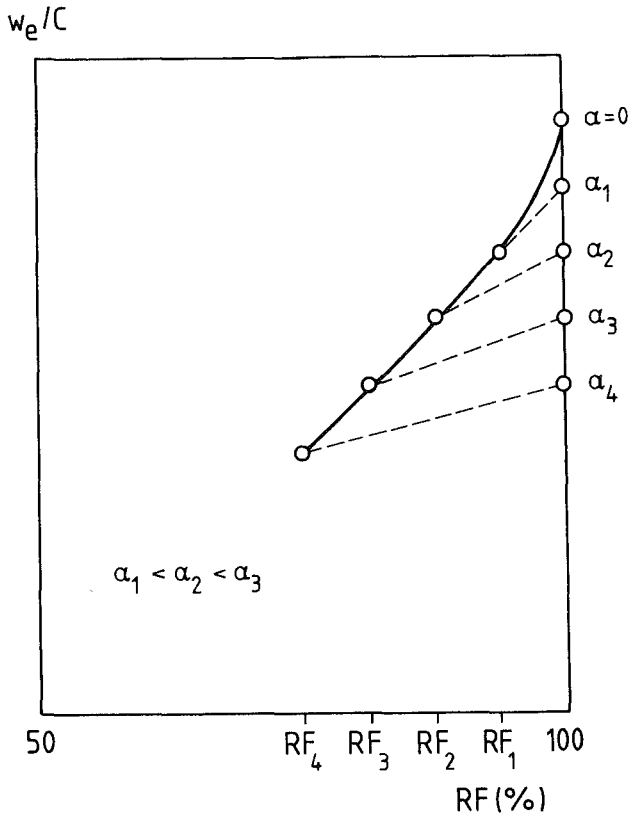
Som tidigare nämnts är $k\approx0.75$ för portlandcement dvs

$$(w_e/C)_{RF=100}=(w_0/C)-0.75\bullet(w_n/C) \qquad \text{----------(4.4)}$$

Skillnaden, $\cap w_e/C$, mellan jämviktsfukthalten vid självuttorkning och jämviktsfukthalten vid fullständig vattenmättnad motsvaras alltså definitionsmässigt av volymreduktionen hos hydratvattnet, dvs genom att subtrahera ekv. (4.3) med ekv. (4.1) erhålles

$$\cap w_e/C=(w_e/C)_{RF=100}-(w_e/C)_{RF}=(1-k)\bullet(w_n/C)\approx0.25\bullet(w_n/C) \qquad \text{-----(4.5)}$$

Vid försöken nedan har såväl RF som mängd fritt vatten och mängd hydratvatten följts. Detta innebär att man i princip får desorptionsisotermens övre förlopp för ett antal varierande hydratationsgrader enligt principen i figur 4.4. Man får också en uppfattning om hur självuttorkningen uttryckt i RF fortskrider.



Figur 4.4 Principen för de genomförda mätningarna

Figure 4.4 Principle for measurements performed

4.3.2 Mätmetod

Totalt tillverkades 10 st bruksblandningar med recept enligt tabell 4.1. Detaljrecept framgår av DATARAPPORT TVBM-7011; 3.9. med aktuella fuktkvoter i 3.10.

Tabell 4.1 Recept vid försök med självuttorkning och desorptionsisoterm (w_0=vatten vid blandning, C=cement (cem), S=silikastoft, SP62= flyttillsats, torrvikt)

Bl	C	Silika-stoft	SP62	Vct	Vbt	Vbt_{eff}	Cementsort
no	kg/m^3	% av C	% av C	w_0/C	$w_0/(C+S)$	$w_0/(C+2S)$	
1	1150	10	1.9	0.24	0.22	0.20	Slitecement
2	625	-	-	0.56	0.56	0.56	Anläggningscem
3	600	-	1.0	0.46	0.46	0.46	"
4	700	10	0.7	0.47	0.43	0.39	"
5	900	-	0.8	0.33	0.33	0.33	"
6	975	10	0.8	0.35	0.32	0.29	"
7	1125	-	1.9	0.25	0.25	0.25	"
8	1350	10	1.9	0.24	0.22	0.20	"
9	1375	10	2.8	0.22	0.20	0.18	"
10	1350	10	1.9	0.24	0.22	0.20	Injekteringscem

De 10 st bruksblandningarna har i huvudsak varierats så att de erhållit vattencementtal, vct, mängd silikastoft och mängd flyttillsats i överensstämmelse med de försök med betong, vilka redovisas nedan i kap. 5-10.

a) Vct varierade mellan 0.22 och 0.56.

b) Silikastoft ingick antingen med 0 eller 10% av C, cementinnehållet, dvs vbt varierade mellan 0.20 och 0.56.

c) Flyttillsatsen varierade mellan 0 och 2.8% torrvikt räknat på C.

d) Cementinnehållet i bruket varierade mellan 600 och 1375 kg/m^3.

e) Vid vct=0.24 skedde studium av anläggnings-, injekterings- och Slitecement.

Ett försök tog 10 veckor. Varje försök genomfördes på följande sätt:

1. Ur varje blandning göts och vibrerades 20 st 100 cm^3 provrör med ca 200 g bruk i vardera.

2. Gummiproppar med tätningsmassa placerades i provrören.

3. Provrören placerades i rumstemperatur, ca 20°C.

4. Efter 1, 2 veckor osv krossades 2 st provrör per tillfälle.

5. Det ena uttagna bruksprovet placerades omedelbart i ett provrör som var något större än det i pkt 1 och vilket var avsett för RF-mätning.

6. RF mättes med en kalibrerad fuktgivare av typ Vaisala vilken fördes in i mätröret. Tätning mellan mätrörets väggar och fuktgivaren utfördes med en expanderande gummiring som fanns på givaren. RF-mätningen utfördes under 24 timmar varefter givaren omkalibrerades inom 5 dygn. Kalibreringen utfördes över mättade saltlösningar med bestämda nivåer för RF: 75.5, 85.1, 94.6 och 97.6%. Även kalibreringen utfördes under 24 timmars tid. Kalibreringsordningen var med stigande RF.

7. Det andra bruksprovet placerades i vägd burk och vägdes. Krossning utfördes ej, eftersom fukt då kunnat gå till spillo.

8. Burken placerades i 105°C och torkades under minst 1 månad.

9. Efter uttorkning avsvalnades burk med bruksprov i exsickator och vägdes därefter

10. Det torkade materialet placerades i vägd degel. Bruk + degel vägdes. Degel ställdes på keramiskt underlag i ugn.

11. Degel plus innehåll av bruk glödgades vid 1050°C under minst 16 tim.

12. Degel med innehåll avsvalnades i exsickator då temperaturen sjunkit till ca 700°C varefter vägning utfördes då degeltemperaturen sjunkit till ca 20°.

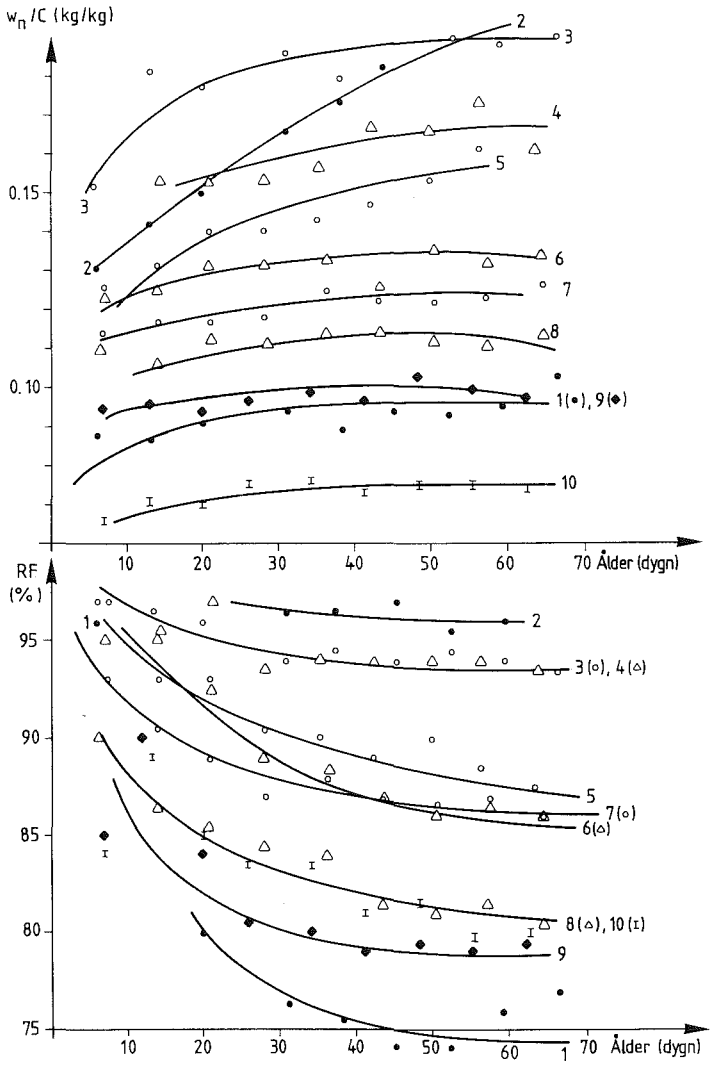
En felanalys görs i avsnitt 4.3.4

4.3.3 Resultat

Mätresultat med uträknade värden på kvoten mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, och kvoten mellan hydratvatten och förångningsbart vatten, w_n/w_e, redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 4.1-4.10. Uträkning av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, enligt Byfors (1980) beskrivs i detalj i avsnitt 3.4.4 ekv. 3.10. Kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, och RF bägge som funktion av tiden visas figur 4.5.

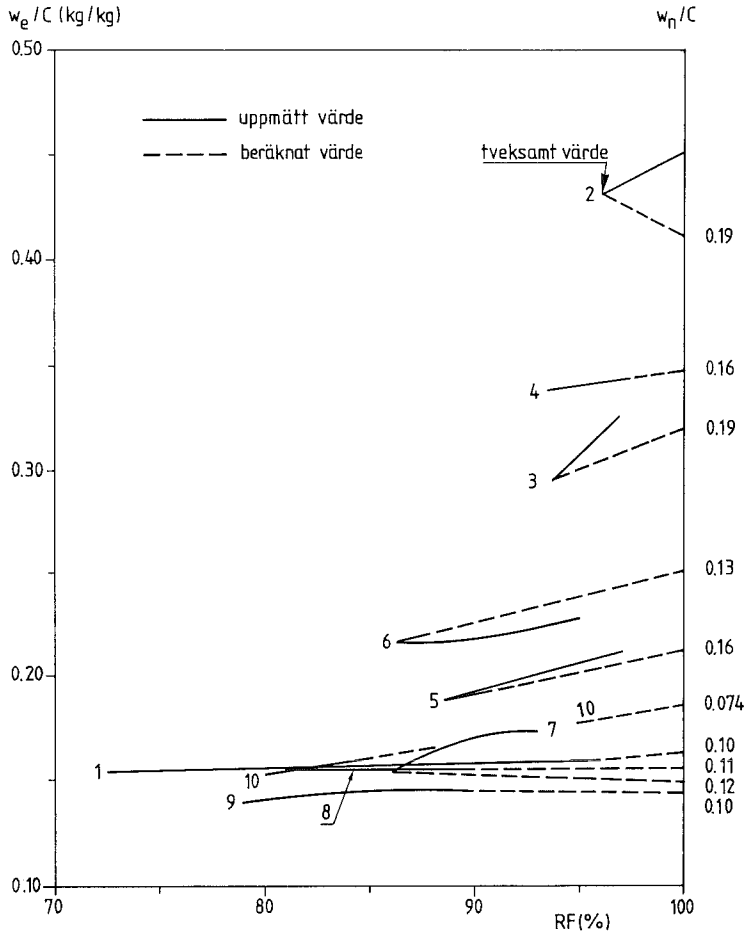
Desorptionsisotermen, dvs kvoten mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, som funktion av RF visas i figur 4.6. Punkten för RF=100% beräknades enligt avsnitt 4.3.1 ekv. (3.8). Kurvorna är okända mellan uppmätt punkt och 100%-punkten. Kurvorna ritas därför med räta linjer vilket innebär en överskattning av fuktinnehållet.

I figur 4.7 visas kvoten mellan hydratvatten och förångningsbart vatten, w_n/w_e, som funktion av tiden. Denna figur bör jämföras med figur 3.12 som visar resultat för tidigt vattenmättade prover.



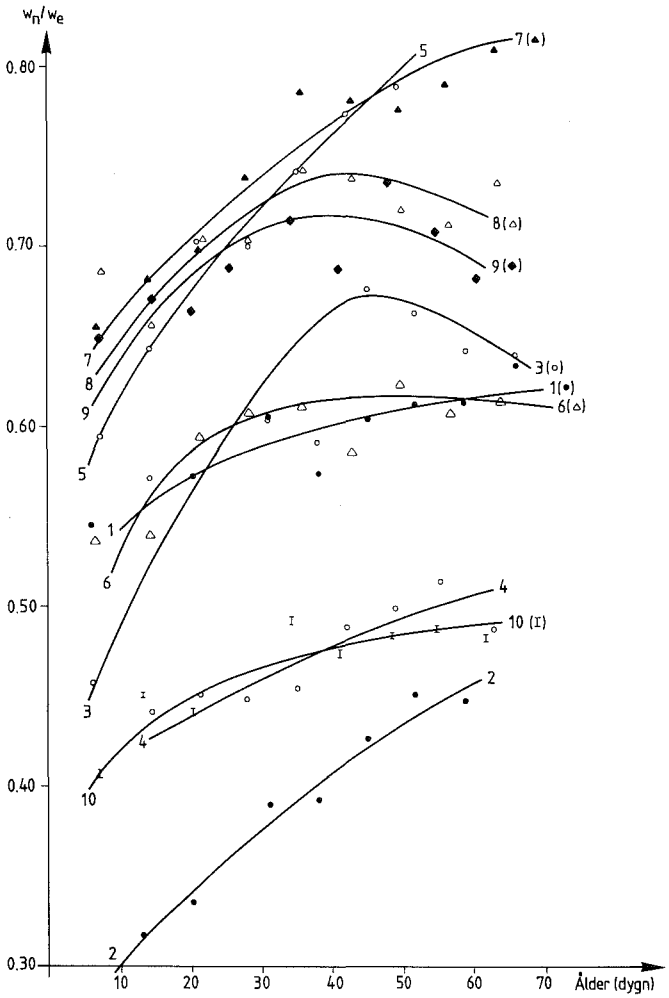
Figur 4.5 Kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, och RF som funktion av tiden. (Blandningsnummer anges till höger i figuren)

Figure 4.5 Ratio of nonevaporable water to cement, w_n/C, and relative humidity, RF as function of time. (Index of mixture indicated to right of figure)



Figur 4.6 Desorptionsisotermen, dvs kvoten mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, som funktion av RF. Till höger i figuren redovisas värden på kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C. (Blandningsnummer anges på kurvorna).

Figure 4.6 Isotherm at desorption, w_e/C, as function of relative humidity, RF (%). Nonevaporable water, w_n/C for each curve indicated at right. (Batch number indicated on each curve)



Figur 4.7 Kvoten mellan hydratvatten och förångningsbart vatten, w_n/w_e, som funktion av tiden hos prover som självuttorkat.(jfr figur 3.14)

Figure 4.7 Ratio of nonevaporable to evaporable water, w_n/w_e, as function of time for self-desiccating specimen. (cF figure 3.14)

Som framhållits i avsnitt 3.4.6 (figur 3.14) kan den med tiden minskande kvoten w_n/w_e då silikastoft ingår i blandningen tänkas bero av endera en minskning av mängden hydratvatten (dehydratation) i provet eller en ökning av mängden förångningsbart vatten i provet eller möjligen en kombination av bådadera. **Zhang och Gjörv (1991)** har visat att dehydratation hos cementpasta först är aktuell efter 90 dygns ålder. Av kap. 8 i denna rapport framgår samma resultat för betong dvs att en minskning av hydratvattenmängden först äger rum vid ca 90 dygns ålder.

Den mest sannolika förklaringen på de parabelformade kurvorna med minskande kvot w_n/w_e i figur 4.7 var enligt avsnitt 3.4.6 s k polymerisation; **Kühl (1967)** varvid kemiskt bundet vatten, w_n, övergår i fysikaliskt bundet vatten, w_e. Vad som skiljer figur 3.14 och figur 4.7 är åldern när polymerisationen blir märkbar i provet.

För resultaten i figur 3.14 gällde vattenmättnad dvs varje ökning av mängden fysikaliskt bundet vatten blir möjlig att konstatera som maximum på kurvan. Detta maximum ger samtidigt åldern på blandningen när polymerisationen startar, t ex ca 10 dygn för blandning 6.

Som en förutsättning för resultaten i figur 4.7 gällde självuttorkning. Detta innebar att mer vatten förbrukades vid hydratationen av cementet än vad som frigjordes vid polymerisationen fram till en viss ålder. Denna ålder går att fastställa med hjälp av figur 4.7 som ett maximum på kurvorna, t ex ca 40 dygn för blandning 6.

Sammanfattningsvis torde man således ur figur 3.14 kunna fastställa åldern på provet då polymerisationen startar medan det med hjälp av figur 4.7 torde gå att fastställa åldern på provet då mängden polymeriserat vatten per tidsenhet blir större än mängden hydratiserat vatten per tidsenhet. Detta var skälet till att figur 4.7 ritades.

Låt koefficienten x vara förhållandet mellan total porvolym definierad av ekv. (4.3) och förångningsbart vatten efter självuttorkning definierat av ekv. (4.1). Då fås:

$$x = \frac{w_{por}}{w_e} = \frac{w_0 - k \bullet w_n}{w_0 - w_n} \qquad \text{----------(4.6)}$$

Efter insättning av parametern

$$b = w_n / w_e \qquad \text{----------(4.7)}$$

och genom utnyttjandet av relationen $w_e = w_0 - w_n$, som gäller för självuttorkande betong utan fuktutbyte med omgivningen fås

$$x = 1 + (1-k) \bullet b \qquad \text{----------(4.8)}$$

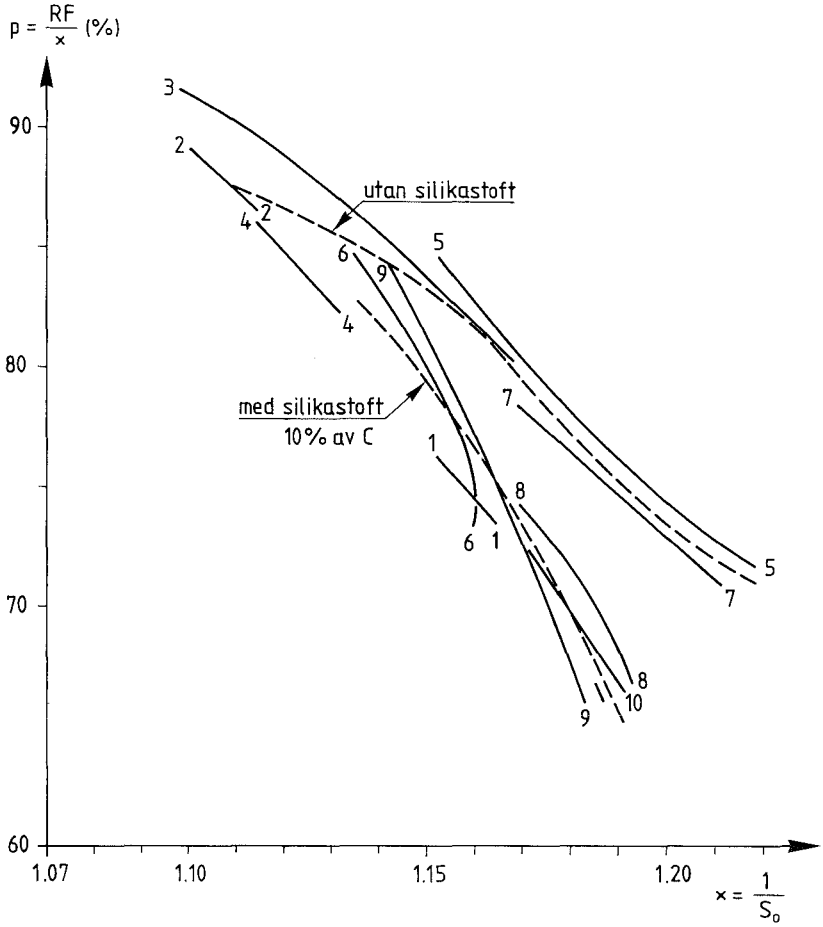
x är i själva verket den inverterade porfyllnadsgraden, S_0, efter självuttorkning, dvs ju högre x desto lägre porfyllnad.

$$x = 1/S_0 \qquad \text{----------(4.9)}$$

Den kemiska krympningen, k, är enligt kap. 3 (figur 3.10) ca 0.74 för blandning 1 t o m 9 och ca 0.62 för blandning 10. Värden på parametern p, där

$$p = RF/x = RF \bullet S_0 \qquad \text{----------(4.10)}$$

har i figur 4.8 ritats som funktion av parametern x i ekv. (4.8) Den övre streckade linjen i figur 4.8 avser en sammanfattning för cementbruk utan silikastoft; den nedre linjen en sammanfattning med silikastoft. Skälet till att denna uppritning skett är ett önskemål att finna ett samband mellan kemiskt/fysikaliskt vatten och RF. Figur 4.8 ger ett sådant samband. Samtidigt erhålles ett samband mellan RF och porfyllnadsgraden, S_0. Kelvinekvationen ger endast ett samband mellan RF och porradie.



Figur 4.8. Parameterns p=RF/x som funktion av parametern x. x är inverterade porfyllnadsgraden efter självuttorkning; se ekv. (4.9)

Figure 4.8 Parameter p=RF/x as function of x. (RF= relative humidity. x= inverted degree of saturation. k= specific volume of nonevaporable and evaporable water).

4.3.4 Noggrannhet i mätningar

Felkällorna får i huvudsak sökas bland följande faktorer:

a) Kalibreringsfel hos RF-givare

b) Hydratation mellan tiden från krossning av provröret tills dess RF kunnat mätas

c) Fuktförlust under hantering av proven

d) Fuktläckage mellan provrörsglas och gummipropp.

a) **Kalibreringsfel hos RF-givare**

Kalibrering av RF-givare utfördes över mättade saltlösningar vid nivåerna 75.5, 85.1, 94.6 och 97.6 % RF. RF-givarna placerades vid kalibreringen i behållare med dessa saltlösningar i ett nära nog termostabilt utrymme. Saltlösningarna preparerades minst 4 veckor före användning för att RF-nivån skulle stabilisera sig. Avläsning av givaren gjordes efter 24 timmar. Saltlösningarnas RF-nivå är något temperaturberoende. Temperaturvariationer i kalibreringsutrymmet gav RF-variationer av som mest +1.1 - -1.9 %; se DATARAPPORT TVBM-7011; 4.11. Noggrannheten i RF kunde således ej bli större än ca ±2%.

b) **Fortsatt hydratation**

Hydratationen av cementet i bruket fortsatte under de 24 timmars tid som mätningen utfördes. Hydratationen avbröts däremot så gott som omedelbart på det parallellprov som ställdes in i en ugn för bestämning av fuktkvot. Tillägg i RF för fortsatt hydratation gjordes därför med som mest 0.5 procentenheter. Tilläggets storlek valdes med ledning av ändring i intilliggande mätning av RF-nivå.

c) **Vägning**

Då man skall bedöma noggrannheten i kvoten mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, är det lämpligt att förfara enligt principerna i avsnitt 3.4.5. Följande uttryck kan härledas för det relativa felet:

$$\delta RF/RF=\delta w_e/w_e-\delta C/C. \qquad (4.11)$$

Relativa felet för blandning 8, vid en vågnoggrannhet av +/- 0.002 gram, framgår av tabell 4.2.

Tabell 4.2. Relativa felet för blandning 8, vid en vågnoggrannhet av +/- 0.002 gram.

14 dygns bruksålder	36 dygns bruksålder	57 dygns bruksålder
0.004/5.37-0.004/33.1 ≈0.001	0.004/4.93-0.004/32.2 ≈0.001	0.004/4.69-0.004/30 ≈0.001

För övriga blandningar är termen $\delta w_e/w_e$ ungefär lika stor som för blandning 8 medan den ökar för termen $\delta C/C$ jämfört med blandning 8. Felet relativt sett i kvot mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, blir således ännu mindre för övriga blandningar än för blandning 8.

4.3.5 Diskussion

Utveckling av kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C, och RF:

Figur 4.5 visar kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, samt den relativa fuktigheten, RF, som funktion av tiden. Som synes ger låga vattencementtal både lägre kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C och lägre RF jämfört med höga vct. Detta innebär som väntat att mängden kemiskt bundet vatten minskar med

sänkt vct; se även figur 3.5 och 3.6 ovan. Detta beror naturligtvis i första hand (för mycket låga vct) på utrymmesbrist i pastan; se ekv. (3.7). Resultaten stämmer även väl med i kapitel 8 redovisade försök enligt **Taplin (1959)**.

De lägre RF som nås vid lägre vct beror dels på att andelen hydratvatten av total vattenhalt, w_n/w_0, ökar, dels på att desorptionsisotermen får ett flackare förlopp; se figur 4.6.

När cementsorter jämfördes vid konstant vbt=0.24 och 10% silikastoft visades sig anläggningscement ge högsta värdet på kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C ca 0.11 efter 60 dygns härdning medan Slite-cement gav w_n/C=0.10 och injekteringscement w_n/C=0.074. Detta är ett märkligt resultat eftersom anläggningscement är det långsammaste cementet. Orsaken kan vara den avvattning av gelen som konstaterats hos betong med silikastoft.

Från uttorkningssynpunkt gav Slitecement det lägsta värdet, ca RF=74 %, efter 60 dygn medan både anläggnings- och injekteringscement gav RF=80 %. Dessa resultat skiljer sig något från **Christoffersen, Sörensen (1986)** som efter 42 dygn funnit RF=76 % vid dansk Rapid-cement (motsvarar hållfasthetsmässigt men ej kemiskt Slite-cement) och 10 % silikastoft.

I utvecklingen av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, kan, vid vct=0.24 (blandning 1 och 8), enligt mätningarna samt enligt figur 4.5 en svacka noteras vid ca 50 dygns ålder. För blandning 9 antyder mätningarna en successiv minskning av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C efter 48 dygns ålder. Denna blandning innehåller silikastoft och förefaller därför att avvattnas, vilket kan bero på polymerisation; **Kühl (1967)**.

Desorptionsisoterm:

Av figur 4.6 framgår att isotermen får ett mera horisontellt förlopp då vct sänks. Ett mera horisontellt förlopp hos desorptionsisotermen innebär en större känslighet i RF om betongens fuktkvot ändras. Denna ändring kan åstadkommas t ex genom regn under byggnadstiden, genom markfukt eller p g a fuktskador.

Kvoten mellan hydratvatten och förångningsbart vatten, w_n/w_e:

Denna kvot studerades även för samma cementbruk som hela tiden varit vattenmättat; se figur 3.13. Vid dessa försök skedde alltså en inträngning av vatten i provet varvid kvoten enligt **Fagerlund (1992)** kan beskrivas av ekv. (3.23)

$$\left\{ \frac{w_n}{w_e} \right\}_1 = \frac{k_2 \cdot \alpha}{vct - k \cdot k_2 \cdot \alpha} \qquad \text{----------(3.23)}$$

I den här redovisade undersökningen sker en självuttorkning varför kvoten w_n/w_e beskrivs av

$$\left\{ \frac{w_n}{w_e} \right\}_{RF} = \frac{k_2 \cdot \alpha}{vct - k_2 \cdot \alpha} \qquad \text{----------(4.12)}$$

där k_2 är w_n/C vid fullständig hydratation. Normalt värde på k_2 är 0.25.

Vid exakt samma hydratationsgrad fås alltså följande teoretiska samband ($k=0.74$; $k_2=0.25$)

$$\frac{(w_n/w_e)_{RF}}{(w_n/w_e)_1} = \frac{vct - k \cdot k_2 \cdot \alpha}{vct - k_2 \cdot \alpha} \approx \frac{vct - 0.19\alpha}{vct - 0.25\alpha} \qquad \text{----------(4.13)}$$

Självuttorkning bör därför teoretiskt ge ett något högre värde på w_n/w_e än vattenhärdning. Avvikelsen från ekv. (4.13) måste teoretiskt bero på att hydrationsgraden är annorlunda.

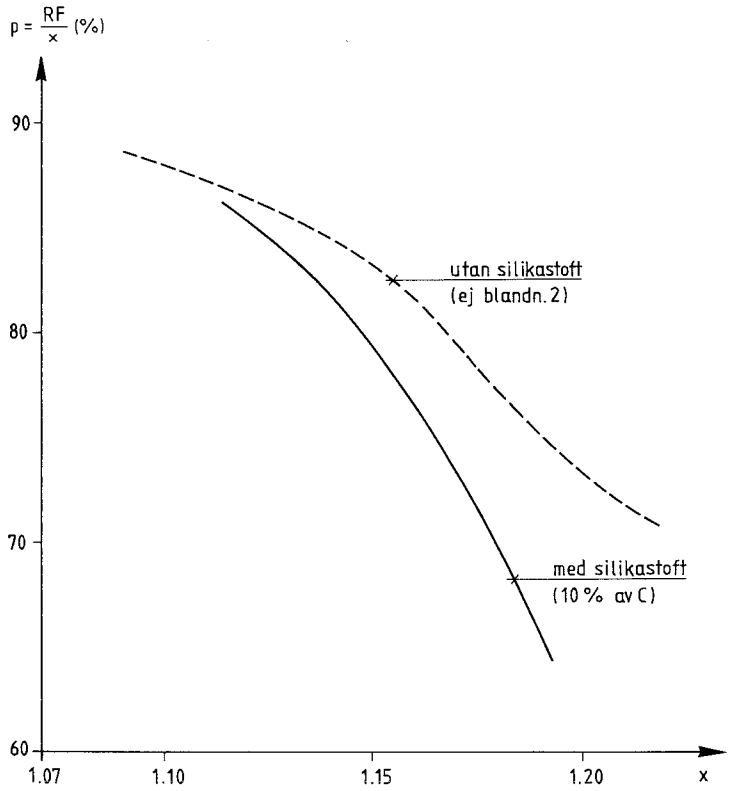
En jämförelse mellan figur 3.14 och figur 4.7 visar att självuttorkningsförsöken gett i genomsnitt högre värden på w_n/w_e än förväntat. Kurvformen är något annorlunda i de olika försöken vilket förklaras av olika hydratationsutveckling. Även vissa felaktigheter kan inte uteslutas.

Även i självuttorkningsförsöken sker vissa nedgångar i w_n/w_e-kurvorna vilket är teoretiskt omöjligt om inte den kemiskt bundna vattenmängden minskar. Effekten är särskilt märkbar för de tätaste blandningarna 8 och 9 vilket tyder på att kemiskt bundet vatten i dessa blandningar övergår till att bli fritt vatten. Om detta beror av polymerisation (avsnitt 3.4.4) eller av annan orsak får vidare forskning utvisa.

Relationen p-x och relationen w_n/w_e-RF:

Parametern p definierad enligt ekv. (4.10) har i figur 4.8 ritats upp som funktion av parametern x definierad enligt ekv. (4.6), (4.7), (4.8) eller (4.9). Uppritningen visar att det råder ett samband mellan porfyllnadsgrad, $S_0=1/x$ och RF.

Samband mellan porfyllnadsgrad och RF blir i viss mån beroende av om silikastoft ingår i bruket eller ej. Skillnaderna har sammanfattats i figur 4.9. Orsaken till att blandningar med silikastoft vid samma porfyllnadsgrad enligt figur 4.9 ger en lägre RF är sannolikt att silikastoftet skapar en tätare porstruktur. Ju större x är dvs ju mindre porfyllnadsgraden är desto större blir skillnaden i RF mellan bruk med resp utan silikastoft. Troligen medverkar den allt fortgående polymerisationen av bruk med silikastoft till att förtäta brukets struktur.



Figur 4.9 Parametern p=RF/x som funktion av parametern x. Principiellt utseende för bruk med och utan silikastoft.

Figure 4.9 Parameter p=RF/x as function of parameter x. Principal curves valid for mortar with (solid) or without (dashed) silica fume.

Lineär regressionsanalys av sambandet mellan RF och porfyllnadsgraden, S_0, för cementbruk utan silikastoft efter självuttorkning ger:

$$RF = \frac{150}{S_0} \cdot \left(1.69 - \frac{1}{S_0}\right) ; \qquad 0.80<S_0<0.90 \qquad \text{----------(4.14)}$$

Motsvarande analys för cementbruk med silikastoft efter självuttorkning ger:

$$RF = \frac{285}{S_0} \cdot \left(1.42 - \frac{1}{S_0}\right) ; \qquad 0.83<S_0<0.90 \qquad \text{----------(4.15)}$$

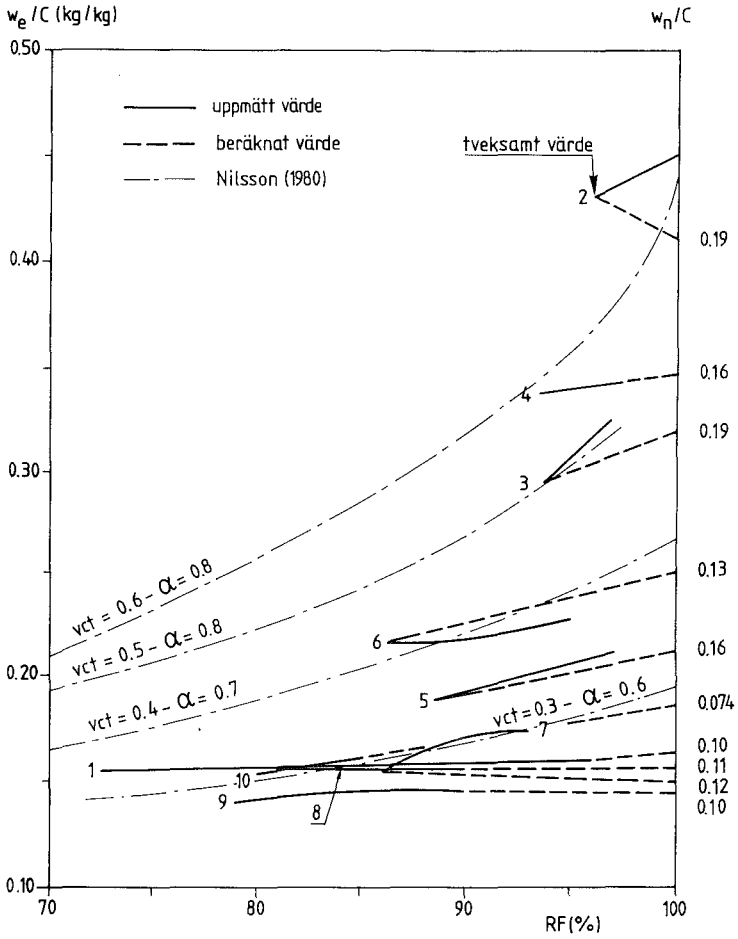
Omvänt kan man med ekv. (4.14) och ekv. (4.15) bestämma porfyllnadsgraden, S_0, om man känner RF.

4.4 Slutsatser

En jämförelse av de i föreliggande försök uppmätta (lineära) desorptionsisotermerna i det höga RF-området med isotermer enligt **Nilsson (1980)** görs i figur 4.10. Som synes är nu uppmätta kurvor mycket mer lineära. Detta är särskilt utpräglat när vbt är lågt. Små fuktändringar ger således stora sänkningar av RF.

Av figur 4.10 liksom av figur 4.5 framgår att silikastoft ger en lägre RF (särskilt vid en given hydratation) än vad rent portlandcement ger vid samma vbt. Detta innebär att silikastoft ger en mera finporös struktur. Den starka självuttorkningseffekten bör vara gynnsam i samband med uttorkning av byggfukt.

Slutligen skisseras i avsnitt 4 empiriskt baserade samband mellan porfyllnadsgrad och RF.



Figur 4.10 Desorptionsisotermen som funktion av RF. Resultat enligt Nilsson (1980), (punktstreckade linjer), resultat enligt föreliggande rapport (streckade eller heldragna linjer). Siffror anger blandningsnummer.

Figure 4.10 Isotherm at desorption as function of RF, where RF is relative humidity. Figures indicate batch number. Dashed lines with points: Nilsson's results (1980). Solid or dashed lines: present results.

5. BETONGPROPORTIONERING. TILLVERKNING AV BETONGSKIVOR

5.1 Teori

5.1.1 Allmänt

Vid tillverkning av betong, då ballast, bindemedel, vatten och tillsatsmedel sammanblandas och härdas, kan man särskilja

* Receptbestämning
* Uppvägning
* Blandning
* Komprimering
* Efterbehandling

5.1.2 Receptbestämning

Slutligt recept för en högpresterande betong kan, skall det visa sig, tas fram först efter en omfattande optimering. I första hand inverkar ballastkurvan kraftigt på möjligheterna att blanda betongen. Vid användning av högpresterande betong tillkommer ett flertal ingredienser såsom silikastoft och superplasticerare. Detta höjer kravet på antalet förblandningar. De höga hållfasthetskraven ställer vidare krav på ovanligt lågt vattenbindetal dvs låga vattenhalter och höga bindemedelsmängder.

5.1.3 Uppvägning

Tillverkning av högpresterande betong skiljer sig från tillverkning av normal betong vad gäller kraven på noggrannhet vid uppvägning av delmaterial innefattat kompensation för fuktinnehåll hos ballasten. Vid för liten vattentillsats blir betongen ogjutbar medan man vid för stor tillsats av vatten får för låg hållfasthet och även för liten självuttorkande förmåga. I vissa fall, särskilt vid långa transporter, kan det bli nödvändigt att

efterdosera flyttillsatser för att erhålla en gjutbar konsistens. Detta får dock ske först efter noggrant övervägande om tillsatsens innebörd för vattencementtalet, vct. Retardering av betongen kan också bli aktuell.

5.1.4 Blandning

För att en allmän tillämpning skall kunna ske av högpresterande betong, bör i branschen allmänt förekommande frifallsblandare kunna användas. Blandningsordningen bör vidare helst vara den gängse, dvs först uppväges ballast och bindemedel och därefter inblandas vatten och tillsatsmedel. Blandningstiden bör helst ej överstiga den normala för fabriksbetong, 90 s.

5.1.5 Komprimering

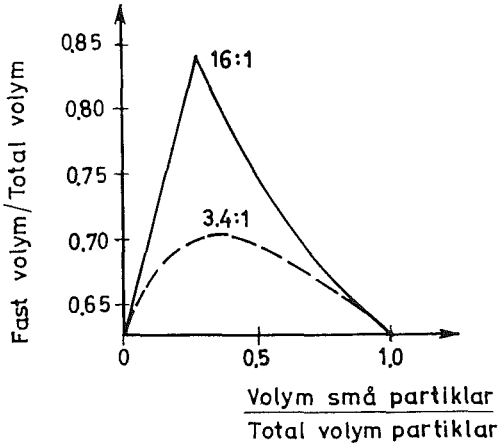
Från arbetsmiljösynpunkt syns ett motsatsförhållande föreligga mellan, å ena sidan, krav på god arbetsmiljö och, å andra sidan, krav på god komprimering. God komprimering av högpresterande betong leder till längre vibreringstider med större ljudbelastning som följd. Vid elementillverkning kan problemet lösas med att vibreringsplatsen byggs in ljudisolerat, medan det vid platsgjutning förutom stavvibrering troligen krävs ny vibreringsteknik, t ex en ny typ av sloda i samband med bjälklagsgjutningar.

5.1.6 Efterbehandling

Som vid all annan gjutning av högvärdig betong, kräver även den högpresterande betongen för att få optimal hållfasthet, täthet och beständighet en god efterbehandling, dvs fukttät intäckning av betongen de första timmarna efter gjutning. Om man eftersträvar en självtorkande betong, kan det även vara lämpligt att undvika vattenbegjutning av betongen de första timmarna efter gjutning, förutsatt att fuktnivån i betongytan kan hållas hög med nämnda intäckning så att plastisk krympning undviks.

5.2 Andras erfarenheter

Rapporten "Ultrahöghållfast betong" av **Berntsson, Chandra (1989)** har kommit oss tillhanda efter försökets genomförande, men bekräftar till stor del våra praktiska erfarenheter. Rapporten framhåller betydelsen av partikelsprång. Vid s k kubisk packning med lika stora sfäriska partiklar kan endast 52% uppnås i packningsgrad; vid hexagonal packning nås 74% i packningsgrad. Som framgår av figur 5.1 kan ca 85% uppnås i ett binärt partikelsystem om partikelfördelningen optimeras.

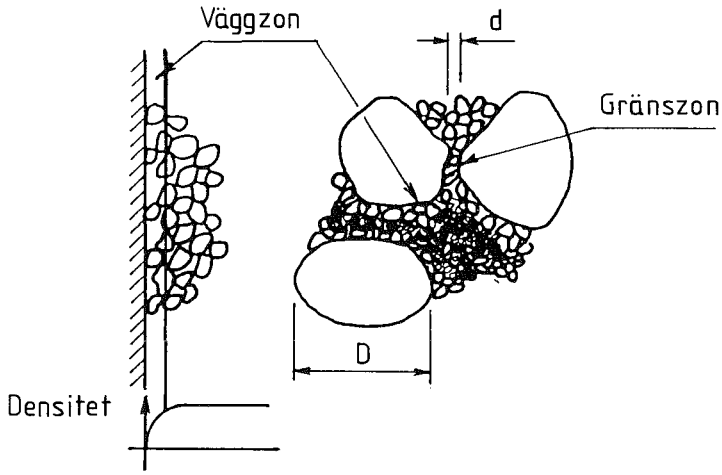


Figur 5.1 Packningsgrad två olika partikelsystem som funktion av volymkvoten mellan stora och små partiklar. Storleksförhållande mellan stora och små partiklar, 3.4:1 resp 16:1. Berntsson, Chandra (1989)

Figure 5.1 Degree of compaction of two different systems of particles as function of ratio between the volume of large and small particles. Relationships between large and small particles studied are 16:1 and 3.4:1. Berntsson, Chandra (1989)

Skall man över 85% i packningsgrad, måste en tredje partikelstorlek eller flera införas i systemet för att fylla hålrummet mellan partiklarna, se även litteraturstudie enligt **Larsén (1991)**.

Som framgår av figur 5.2 utgör dock den s k väggeffekten ett hinder, för att uppnå fullgod packning t ex intill större ballastkorn eller formsidor.



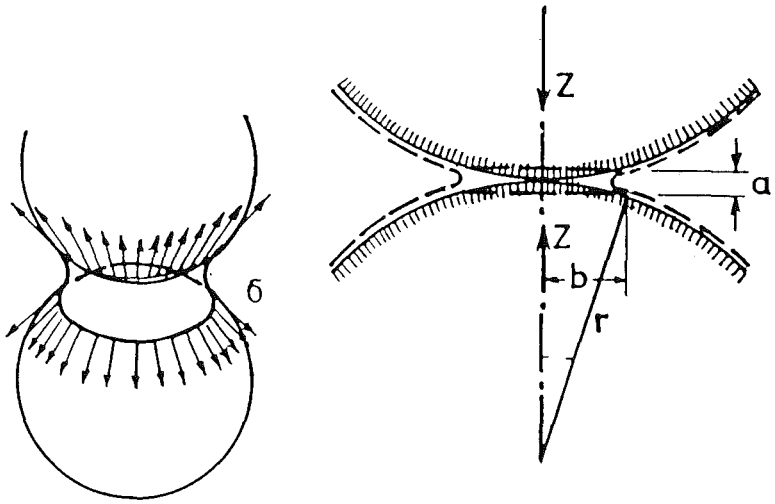
Figur 5.2 Vägg- och barriäreffekt vid packning av partiklar intill väggytor och ute i massan samt i trånga zoner vid kontaktgränser till de stora partiklarna. Berntsson, Chandra (1989)

Figure 5.2 Effect of a wall or of a barrier on compaction of particles close to surfaces and within the concrete, and also in narrow spaces at the contact zone to large particles. Berntsson, Chandra (1989)

Figur 5.3 visar betydelsen av låg ytspänning på vattnet i betongblandningen för att därmed minska den sammanhållande kraften mellan partiklar. Om två sfäriska partiklar hålls samman av vattenmenisk blir kohesionskraften

$$Z \approx \pi \cdot b^2 \cdot 2\sigma/a \approx 2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot r \qquad \text{----------(5.1)}$$

där $b^2 \approx r \cdot a$ och σ är vattnets ytspänning. Tas hänsyn till dubbelkrökningen kommer Z att minska. Kohesionskraften Z blir i själva verket proportionell mot σ/r. Partiklar med större radie, r, ger således en mindre kohesionskraft. Ytspänningen, σ, kan minskas genom tillsats av luftporbildare eller flyttillsats.

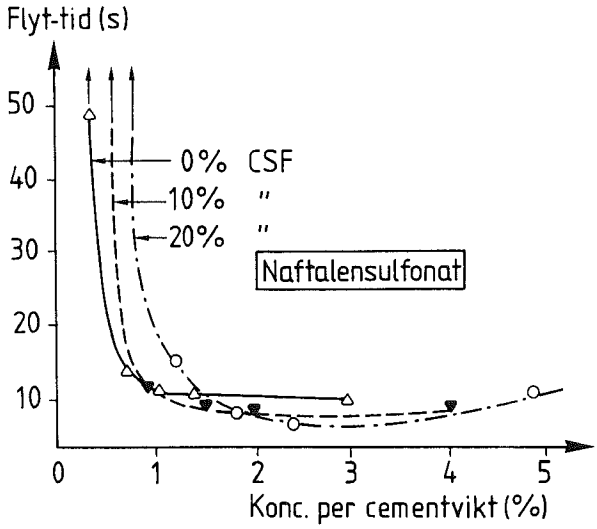


Figur 5.3 Kohesionskraft mellan två sfäriska partiklar i kontakt med varandra. Berntsson, Chandra (1989)

Figure 5.3 Surface tension of two spheric particles in contact. Berntsson, Chandra (1989)

Rapporten förklarar också betydelsen av att använda superplasticerande tillsatsmedel då såväl silikastoft ($\approx 10^{-7}$ m) som cementpartiklar ($\approx 10^{-5}$ m) finns närvarande. Ändringen av konsistens från styv till flytande betong sker inom ett mycket snävt förhållande mellan tillsatt vatten och mängd partiklar. De ultrafina partiklarna av silikastoft kan, tack vare det superplasticerande medlets närvaro, fylla ut det minsta utrymmet mellan cementkornen och därmed minska vattenbehovet utan att massan förlorar i rörlighet.

de Larrard (1989) visar i figur 5.4, med sitt s k konflytprov, sambandet mellan mängd naftalensulfonat, mängd silikastoft och konsistens hos cementpasta. de Larrard låter olika blandningar av cementpasta passera genom en kon. Ju snabbare pastorna passerar desto lösare är konsistensen. Vid mindre än 1 % naftalen av cementinnehållet, är tillsats av silikastoft till förfång för konsistensen. Vid högre doseringar av naftalensulfonat visar sig däremot silikastoft ha en gynnsam effekt. Vid 10 % tillsats av silikastoft nås optimal, dvs mest flytande, konsistens vid 2-4 % naftalensulfonat allt räknat på cementvikten.



Figur 5.4 Erforderlig tid (s) för cementpasta att flyta genom en kon som funktion av tillsatt mängd naftalensulfonat. Tiden är visad för varierande innehåll av CSF (silikastoft): 0, 10 eller 20% räknat på cementinnehållet. F de Larrard (1989)

Figure 5.4 Time required for a cement paste to flow through a cone as function of added concentration of naphtalene sulfonate. Different amounts of silica fume. F de Larrard (1989)

Randall, Foot (1989) angav typrecept för att uppnå pumpbar betong med vattencementtal, 0.24. De använde sig av 43 viktsprocent singel 10 mm, 25 % sand, 22 % cement, 2.4 % flygaska, 1.8 % silikastoft samt 0.5 % tillsatsmedel; dels vattenreducerare/retarder, dels superplasticerare. En cylinderhållfasthet på 124 MPa uppnåddes 56 dygn efter gjutning (diameter 100 mm, mellanlägg mellan tryckplattor och prov). Randall, Foot poängterade betydelsen av kontroll av allt vatten i betongblandningen, t ex även av sköljvatten i blandare och transportbilar.

5.3 Förförsök (förblandningar)

5.3.1 Recept

Syftet med förförsöken (förblandningarna) var att ta fram betongblandningar till huvudförsöken med vbt varierande mellan 0.20 och 0.60, med 10 % tillsats av silikastoft av cementvikten alternativt utan silikastoft samt med varierande flyttillsats typ naftalen (SP 62). 15 st betongrecept användes. Översiktliga recept visas i tabell 5.1 nedan. Detaljrecept, fuktinnehåll etc redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 2.6-2.7 och 5.1-5.3.

Tabell 5.1 Förförsök med betong. Översiktliga betongrecept

Blandning	Cement	Silika	Ballast (kg/m^3)			SP 62	Vct	Vbt
no	(kg/m^3)	(kg/m^3)	0-8	2-4	8-12	(kg/m^3)		
1:1	401(S)	40	444	453	906	5.67	0.37	0.34
2:1	303		807		1164		0.56	0.56
2:2	303		807		1164		0.56	0.56
3:1	304		1137	61	787	6.72	0.47	0.47
3:2	307		1178	99	837	5.21	0.46	0.46
3:3	307		834		1181	3.65	0.46	0.46
4:1	297	30	804		1163	2.52	0.49	0.45
4:2	298	30	805		1132	1.26	0.47	0.43
5:1	409		675		1268	3.46	0.31	0.31
5:2	405		750		1214	3.42	0.31	0.31
6:1	394	39	726		1163	2.07	0.35	0.32
7:1	463		567		1359	7.81	0.23	0.23
7:2	453		616		1294	10.21	0.24	0.24
8:1	475	39	550	10	1312	8.78	0.24	0.22
9:1	470	39	533	10	1298	12.94	0.26	0.24

S= Slite Std (i övrigt anläggningscement), SP 62= Flyttillsats, torrvikt

En 100 l frifallsblandare användes. Proven komprimerades på vibrobord. Blandning och vibrering utfördes i 5 min vardera. På ett tidigt stadium av förblandningarna blev det klarlagt att kornkurvan borde ändras för att s k bollbildning i blandaren skulle

undvikas. Därvid togs krossfraktionen, 2-4 mm, av kvartsit helt bort och ersattes med makadam av kvartsit, 8-12 mm. Den grövre fraktionen medverkade därvid till att sönderdela de s k bollarna på ett tidigt stadium.

5.3.2 Fuktkontroll

Blandningar med lågt vct var speciellt känsliga för variationer i vattentillsats. För låg vattentillsats från början skapade problem genom värmeutveckling och torkning av blandningen. För hög vattentillsats medförde å andra sidan att blandningen separerade vid gjutning. Det var således nödvändigt med kontinuerlig kontroll av fukt i allt ingående material. Noggrannheten i vattentillförseln borde därefter ligga på ± 3 l/m^3. Avtorkning av blandare e dyl hade således betydelse. För att hindra fuktavgång under blandningsförloppet borde slutligen en så sluten blandare som möjligt användas.

5.3.3 Slutsatser av förförsök

Det viktigaste resultatet av förförsöken var, att man bör arbeta med ett partikelsprång i ballastens kornkurva för att uppnå en rimlig bearbetbarhet hos betongen. På basis av förförsöken valdes följande blandningar till huvudförsöken; 2:1, 3:3, 4:2, 5:2, 6:1, 7:2, 8:1 och 9:1.

5.4 Tillverkning av betongskivor

5.4.1 Provkroppsutformning

Provkropparna var avsedda för en fullskaleundersökning av hållfasthet och hydratationsutveckling hos prover som simulerade verkliga förhållanden; se kap. 6, 7, 8. Därför valdes prover som hade en stor utsträckning i planet men som var rätt tunna. Genom att de plana ytorna fuktisolerades kunde proverna, skivorna ändå

betraktas som tvärsnitt av en grövre konstruktion, t ex en pelare, exponerad för olika yttre förhållanden.

Provkroppsstorleken bestämdes av den största satsstorleken för betongblandaren i betonglaboratoriet, ca 0.1 m^3. Den cirkulära formen valdes eftersom man då får ut flest möjliga provpunkter. Tjockleken 0.1m bedömdes som tillräckligt för att man skulle få en god gjutbarhet. Samtidigt gav detta möjlighet att simulera en oändlig utsträckning vinkelrätt provkroppen tvärs skivan medelst påläggning av tätskikt på de bägge plana sidorna, se figur 5.5. Av figur 5.5 framgår även lägen för ingjutna plaströr för mätning av relativ fuktighet, RF, samt lägen för sedermera utborrade provcylindrar. Cirkelmarkeringen vid provkroppens rand anger den tilltänkta exponeringsriktningen.

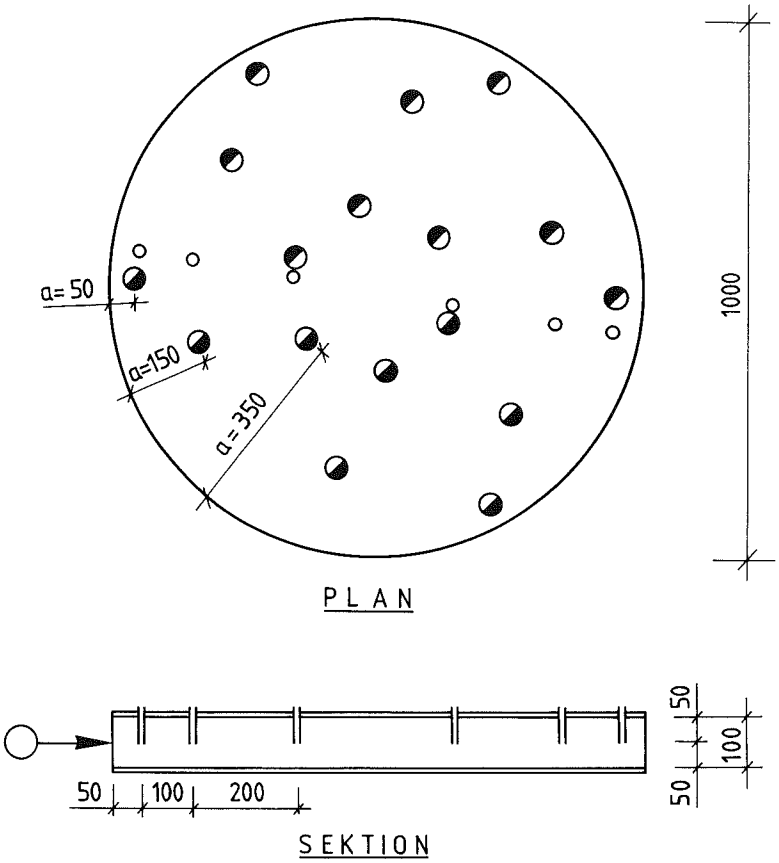
= Kärnborrning genom skiva, Ø 40, betongålder: 28 dygn

= -"- -"- -"- , Ø 40, -"- : 90 -"-

= Plaströr Ø 16 med kork för mätning av relativ fuktighet

= Epoxibeläggning EP 91, 2 mm

Mått i mm



Figur 5.5 Provkroppsutformning för huvudförsök; plan och sektion

Figure 5.5 Details of specimen for main test, plan and section

5.4.2 Recept

Översiktliga blandningsrecept framgår av tabell 5.2 nedan. Viktsandelar av olika delmaterial i betongen visas i figur 5.6. Kornstorleksfördelning hos ballasten visas i figur 5.7. Detaljerade recept, konsistens, lufthalt samt kornstorleksfördelning ges i DATARAPPORT TVBM-7011; 5.4-6.

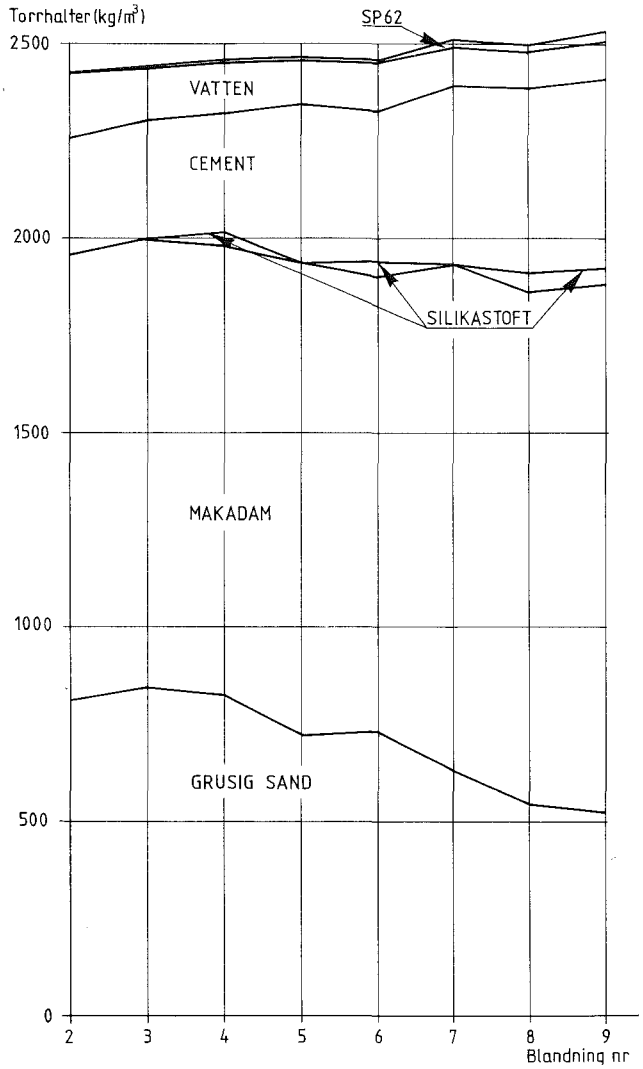
Tabell 5.2 Översiktliga betongrecept. Huvudförsök med betong.

Blandning	Cement	Silika-stoft	Ballast (kg/m^3)		SP 62	Vct	Vbt
no	(kg/m^3)	(kg/m^3)	0-8	8-12	(kg/m^3)		
2	298		808	1144		0.58	0.58
3	302		844	1149	3.01	0.47	0.47
4	297	30	820	1152	2.13	0.48	0.44
5	398		721	1213	3.35	0.33	0.33
6	387	39	727	1157	3.07	0.36	0.33
7	454		628	1305	8.84	0.25	0.25
8	474	47	546	1305	7.78	0.24	0.22
9	482	48	524	1357	13.32	0.22	0.20

SP 62= Flyttillsats, torrvikt

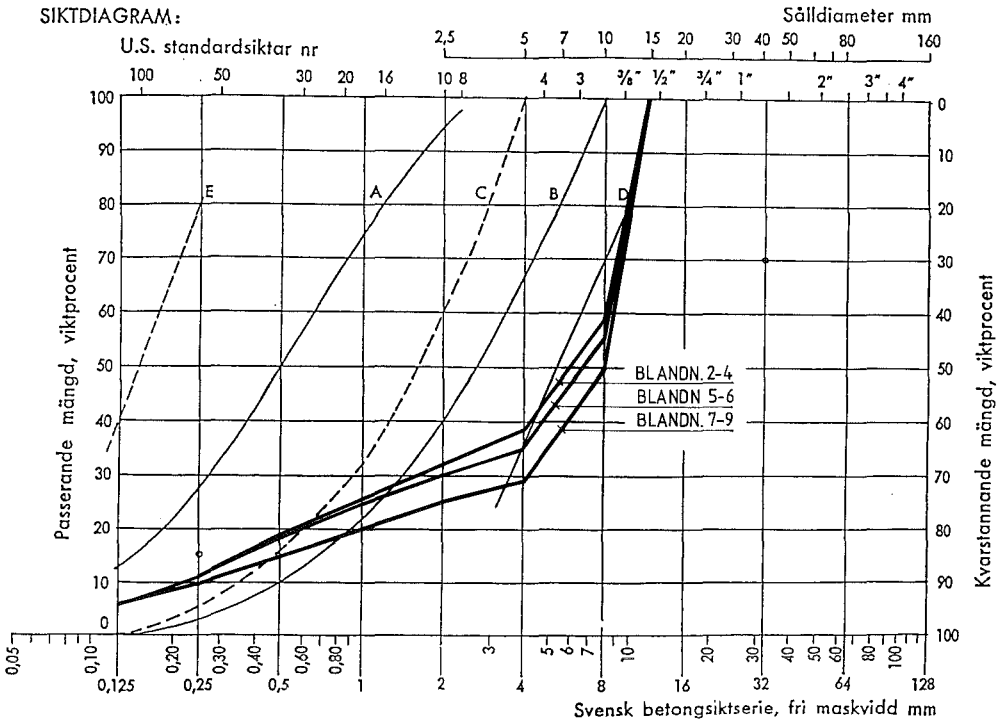
5.4.3 Blandning

Tvångsblandare av typ Sandby 150 l användes. Blandning skedde i satser om 100-110 liter. Blandaren spolades med vatten och allt vatten avtorkades före varje blandning. Blandningstiden uppgick till 5 minuter varav ca 1/2 minuts torrblandning. Det bör poängteras att blandningarna var mycket känsliga för förändringar i vattentillsatsen.



Figur 5.6 Fördelning av material i betongen vid huvudförsök

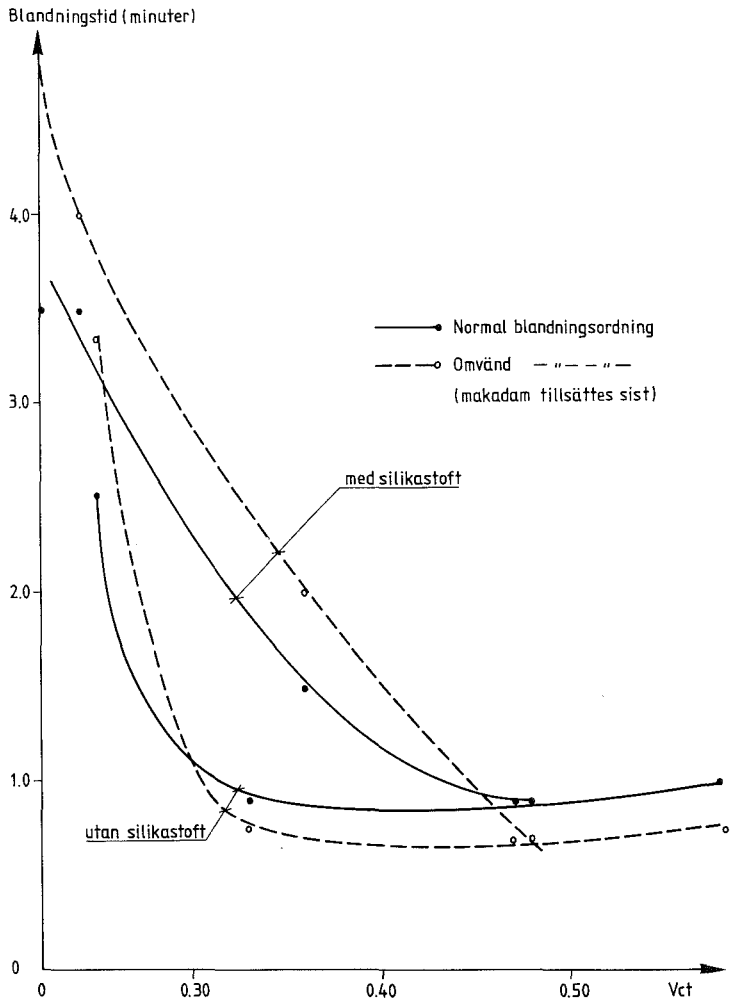
Figure 5.6 Schematic picture of material in concrete during main test



Figur 5.7 Kornkurvor för ballast vid huvudförsök

Figure 5.7 Sieve curves for ballast during main test

Av figur 5.8 framgår blandningstider vid flytande konsistens hos betongen, dels med silikastoft (10% av C), dels utan silikastoft i betongen. Förändringen från jordfuktig till flytande konsistens hos betongen var markant och skedde inom någon sekund. Såväl normal blandningsordning som omvänd blandningsordning (bindemedel plus vatten först) studerades. Blandningstiden ökar, då silikastoft användes i betongen. Exempel: vid vct=0.32, från 1 minut till 2 minuter.



Figur 5.8 Blandningstider som funktion av vct för att nå flytkonsistens i betongen, med och utan silikastoft.

Figure 5.8 Mixing time as function of water-cement ratio at flowing consistency in concrete, with and without silica fume. Normal order of mixing (———) and reversed (-----)

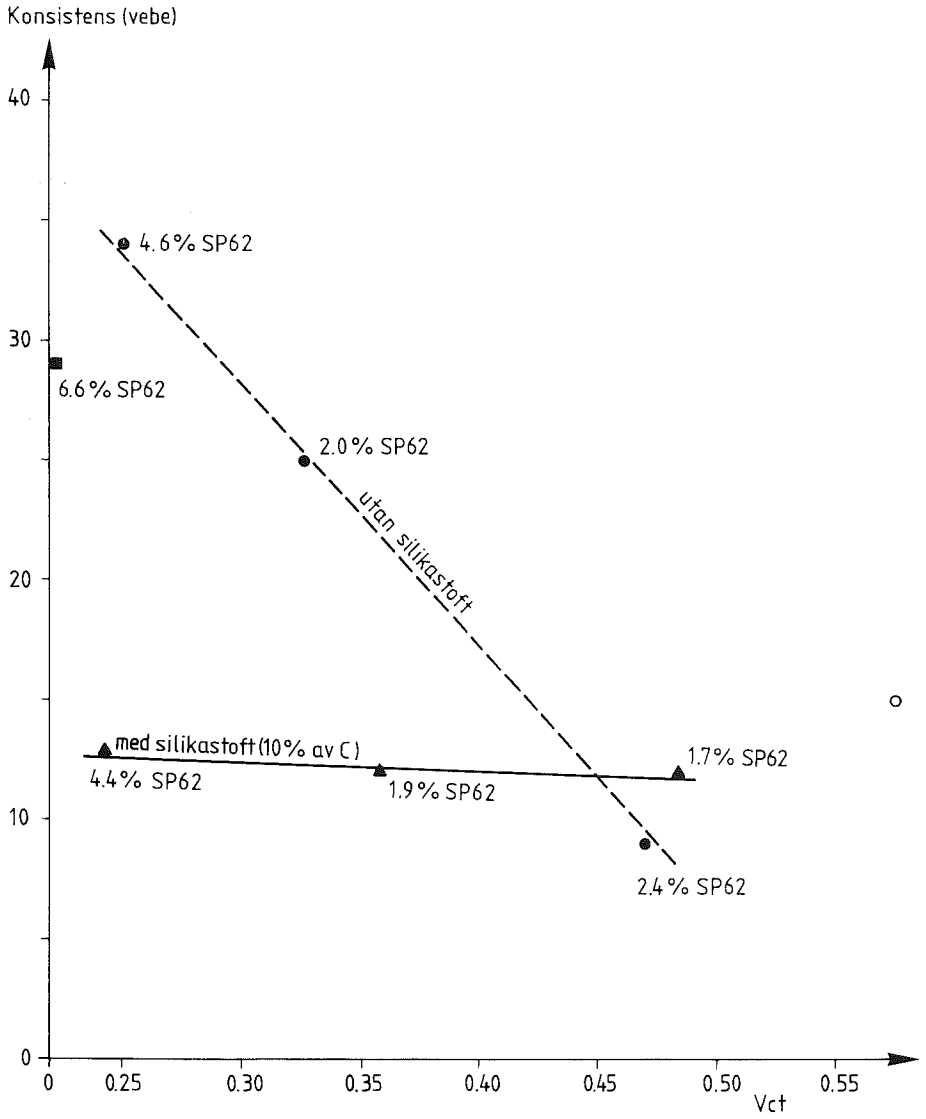
5.4.4 Gjutbarhet och lufthalt

Sättmått och vebetal motsvarar en trögflytande till styv konsistens. Mätdata redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 5.4. Sättmått ger dock ej en rättvis bild av gjutbarheten då flyttillsatsmedel används. Tillsatsmedlet ger nämligen betongen en tixotrop karaktär. Ej heller vebetalet är helt rättvisande vid så stor andel makadam som här använts. Konsistensen uttryckt i vebe som funktion av vct framgår av figur 5.9. Tillsats av silikastoft är mycket gynnsam från gjutbarhetssynpunkt. Vid t ex vct=0.32 halveras vebetalet för betongen när 10% silikastoft räknat på cementinnehållet användes.

Jämfört med förförsöken var betongen vid huvudförsöket betydligt lättare att blanda. Flytande konsistens erhölls efter kortare blandningstid jämfört med förförsöket. Enda skillnaden i materialhänseende mellan förförsök och huvudförsök var att grusfuktkvoten var högre vid huvudförsöket (naturfuktigt material). I och med att fukten finns kvar i gruset stannar även finkornigt material kvar på de grövre gruskornens ytor. Detta kan ha en gynnsam effekt på partikelfördelningen.

Eftersom gruset vidare redan före blandning absorberat fukt i sitt finporösa system förkortas troligen blandningstiden. Betongen blir inledningsvis under blandningscykeln mindre "sträv". Vidare undviks tidig klumpbildning vid användande av naturfuktigt material.

Lufthalten varierade mellan 0.75-1.5 %. Mätdata ges i DATARAPPORT TVBM-7011; 5.4.



Figur 5.9 Konsistens i vebe som funktion av vct med och utan silikastoft i betongen.

Figure 5.9 Consistency expressed in degree vebe as function of water-cement ratio with and without silica fume

5.4.5 Gjutning av betongskivor

Av varje betongtyp enligt tabell 5.2 tillverkades 3 st skivor. De skivformade cirkulära provkropparna göts i stålform placerad på ett vibrobord. Detaljer framgår av figur 5.5. Gjutningen utfördes i två omgångar, varvid det första skiktet på ca 0.05 m vibrerats i ca 20 s. Hela skivan, 0.1 m, vibrerades sedan i 2 minuter och stålslipades.

Samtidigt ingöts 6 st plaströr med diametern 16 mm för RF-mätningar. Rören avslutades 50 mm från skivans ovankant. 2 st rör placerades på vardera avstånden 50, 150 och 350 mm från skivans cikulära kant. Eftervibrering utfördes i 20 s, 5 minuter efter det skivan vibrerades i sin helhet första gången. Parallellt med skivorna tillverkades även 3 st standardkuber, vilka vibrerades på samma sätt som skivorna, dvs även eftervibrerade.

5.4.6 Härdningsförhållanden

Skivorna indelades i tre typer A, B och C beroende på de kommande fukthärdningsförhållandena. Omedelbart efter gjutning täcktes alla betongskivor med 0.2 mm plastfolie, vilken tejpades till den runda formsidan. Ett (eller undantagsvis tre dygn senare) togs folien bort och avformning skedde. Samma dag, som folien togs bort, belades alla provkroppars ena sida med minst 2 mm epoxiplast EP 91. Datablad över plasten ges i DATARAPPORT TVBM-7011; 2.8. Den andra sidan låg därvid mot plastfolie för att hindra fuktavgång. Ett dygn senare epoxibelades även den andra sidan av alla prover.

På en betongskiva (typ C) av varje betongtyp epoxibelades även den runda kanten. Detta gjordes för att en från fuktsynpunkt så perfekt självuttorkning som möjligt skulle erhållas.

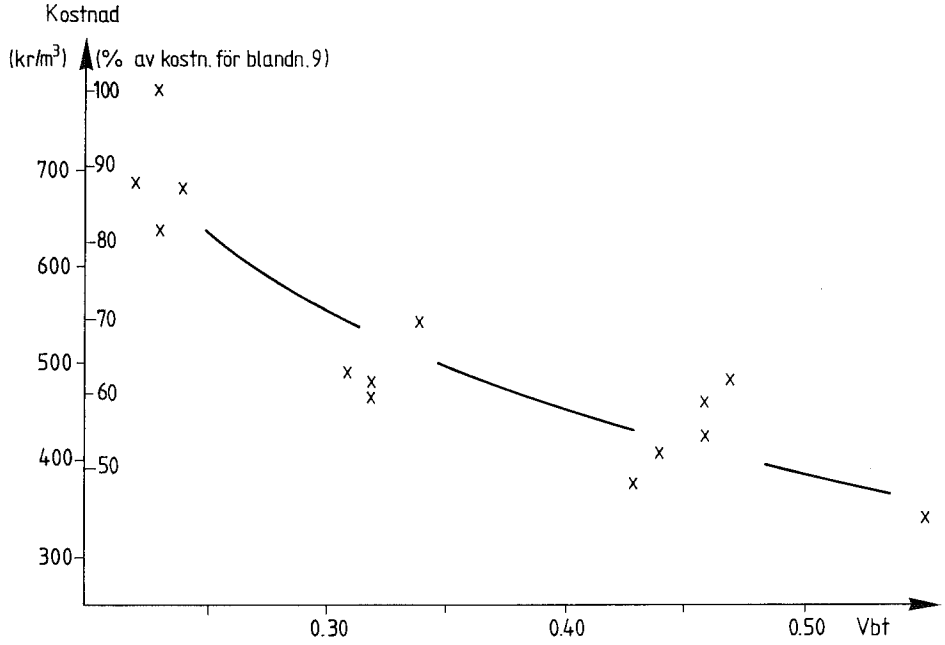
Skivor av typ A och B hade däremot oförseglade runda kantytor. Dagen efter det att skiva typ A belades med epoxi på båda sidorna sänktes den ned i vatten. Denna skiva simulerade en pelare med diametern 1 m i vatten. Skivan av typ B förvarades i laboratoriemiljö med RF varierande mellan 40 och 60% och temperatur 20-22°C. Denna skiva simulerade en pelare med diametern 1 m stående i innemiljö.

Kuberna avformades ca 18 timmar efter gjutning och förvarades därefter i vatten fram till 28 dygns ålder. Vid 28 dygn tryckprovades (av de totalt tre gjutna kuberna i varje sats) en kub, togs en kub upp för förvaring vid 40-60 % RF fram till 90 dygn, och förvarades en kub i vatten fram till 90 dygns ålder.

5.4.7 Ekonomi

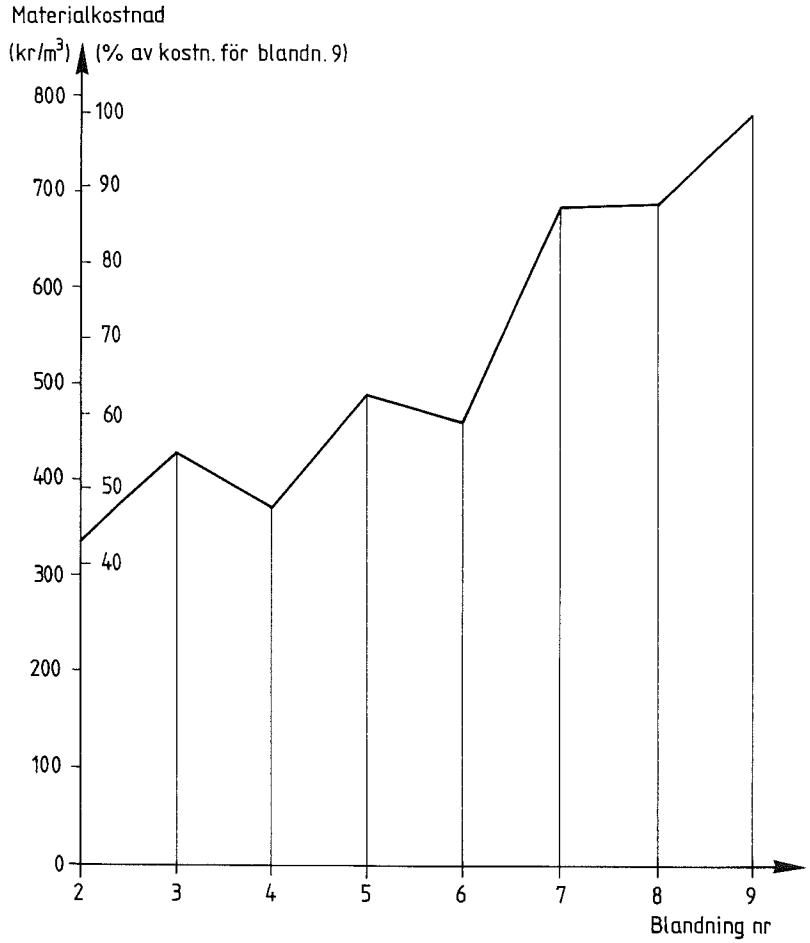
Materialkostnad, juni, 1989, för samtliga tillverkade betongtyper vid förförsök visas i figur 5.10, dels i kr/m^3, dels i procent av kostnaden för blandning 9.

Materialkostnad, juni, 1989, för de i huvudförsöket tillverkade betongtyperna visas i figur 5.11, dels i kr/m^3, dels i procent av kostnaden för blandning 9.



Figur 5.10 Materialkostnad för betong daterad juni, 1989 för de olika blandningarna vid förförsöket

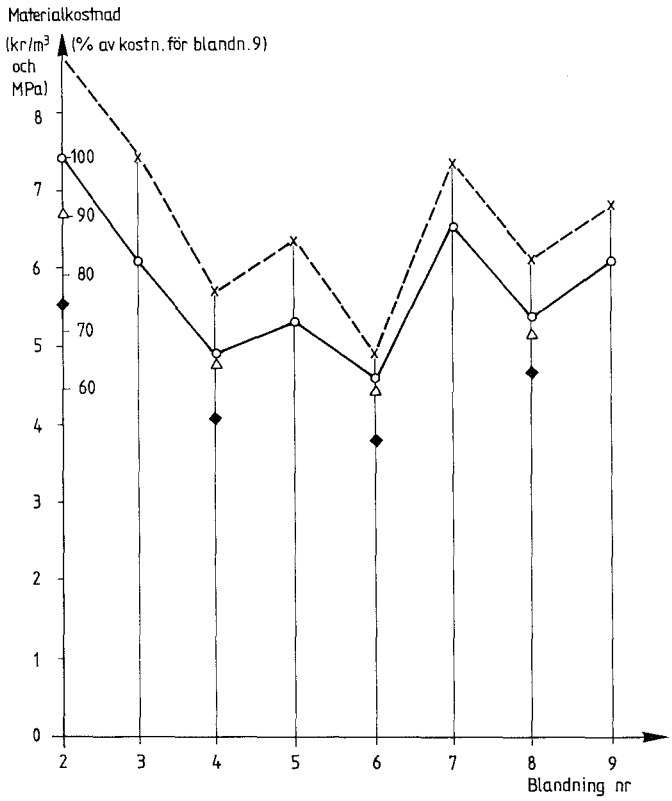
Figure 5.10 Concrete cost dated June, 1989, for the different batches in the pretests



Figur 5.11 Materialkostnad för betong daterad 1989-06-06 för de olika blandningarna vid huvudförsöket

Figure 5.11 Concrete cost dated June, 1989, for the different batches in the main test

I figur 5.12 visas materialkostnaden per MPa i tryckhållfasthet för de olika betongerna (kr/(m^3•MPa). Tryckhållfastheten bestämdes normalt för fuktiga prover.



Figur 5.12 Materialkostnad för betong per MPa i tryckhållfasthet. Ålder 28 dygn (-----), ålder 90 dygn (———), ålder 140 dygn (triangel), ålder 140 dygn, torkad cylinder (◆)

Figure 5.12 Concrete cost per MPa of compressive strength dated June, 1989. Age 28 days (-----), age 90 days (———), age 140 days (triangle), age 140 days, dried out cylinder (◆)

5.5 Slutsatser

Det är värt att understryka fem faktorer i samband med tillverkning av högpresterande betong:

1. Behov av partikelsprång mellan sten och sandfraktionen för att erhålla gjutbar konsistens.

2. Behov av silikastoft och flyttillsats (superplasticerare) för att erhålla gjutbar konsistens.

3. Den gynnsamma effekten på blandningsförhållandena att använda sig av naturfuktigt material, speciellt vid grusfraktionen.

4. Förlängning av blandningstid, speciellt vid användning av silikastoft.

5. Betongens flytande konsistens.

Partikelsprång:

Behov av partikelsprång enligt våra resultat ovan bekräftades av **Berntsson, Chandra (1989)** som visat hur maximala packningsgraden ökar vid partikelsprång.

Silikastoft och flyttillsats (superplasticerare):

Behov av silikastoft och flyttillsats (superplasticerare) enligt vår undersökning bekräftades av **de Larrard (1989)** som undersökte tillsats av silikastoft kombinerad med tillsats av naftalensulfonat. Vid 10 % tillsats av silikastoft, räknat på cementinnehållet, gav 2-4 % tillsats av naftalensulfonat bättre konsistens än om enbart portlandcement användes.

Naturfuktigt material:

Av tradition använder många laboratorier sig av torkat material eftersom man på så sätt undviker problem med variationer i vct p g a fukt i ballasten. Detta är inte att rekommendera vid tillverkning av högpresterande betong eftersom man då har mycket svårt att uppnå en gjutbar konsistens. Speciellt vid låga vbt erhåller man med fuktig ballast det eftersträvade omslaget till flytande konsistens i ett mycket tidigare skede av blandningen. Återuppfuktning av ballasten är heller inte att rekommendera eftersom man på så sätt går miste om den finkorniga fraktionen (s k filler).

Förlängning av blandningstid:

Blandningstiden fördubblades enligt våra resultat för högpresterande betong jämfört med normal betong speciellt då silikastoft ingick i receptet. För det första krävdes längre tid för uppvägning eftersom fler materialtyper ingick i receptet jämfört med normal betong. För det andra krävdes en viss tidsrymd innan konsistensen övergick från att ha varit jordfuktig till att bli flytande.

Flytande konsistens:

Den högpresterande betongens speciella egenskaper yttrade sig i ett markant omslag i konsistens efter en viss blandningstid. Utan detta omslag i konsistens förblev betongen jordfuktig. Det var under dessa förhållanden ej heller lämpligt att efterdosera flytmedel eftersom blandningstemperaturen ofta stigit, med en accelerande effekt som följd. Om betongen ej erhållit flytande konsistens kunde den vare sig transporteras eller gjutas på ett rationellt sätt. Betongen krävde slutligen ett större vibreringsarbete än normal betong för att flyta ut i formen.

6. RELATIV FUKTIGHET OCH SJÄLVUTTORKNING HOS BETONGSKIVOR

6.1 Allmänt

Som tidigare nämnts i kapitel 4 kommer en betong som inte har tillgång till vatten utifrån att självuttorka på grund av hydratvattnets kemiska reaktion. Denna självuttorkning medför, som visats ovan, att RF inne i betongens porsystem sjunker. Ju lägre vct betongen har desto större blir självuttorkningseffekten. Detta framgår även av resultaten i kapitel 4.

Om en normal betong utsätts för vatten utifrån kommer någon självuttorkning inte att kunna ske eftersom porsystemet tar upp en vattenvolym, som mer eller mindre motsvarar hydratvattnets kontraktion.

Vid ett mycket lågt vct kan det däremot tänkas att vatteninträngningen blir så långsam att en självuttorkning kan ske trots att betongen ligger i vatten. Samtidigt innbär ett lågt vct att den verkliga uttorkningen (utåt) går långsammare.

Självuttorkning är gynnsam i många avseenden; t ex

a) En ung betong kan bli frostbeständig även då luftinblandning saknas; **Powers (1947)**, **Fagerlund (1980B)**.

b) Vattentätheten ökar hos grova konstruktioner; **Bazant (1982)**.

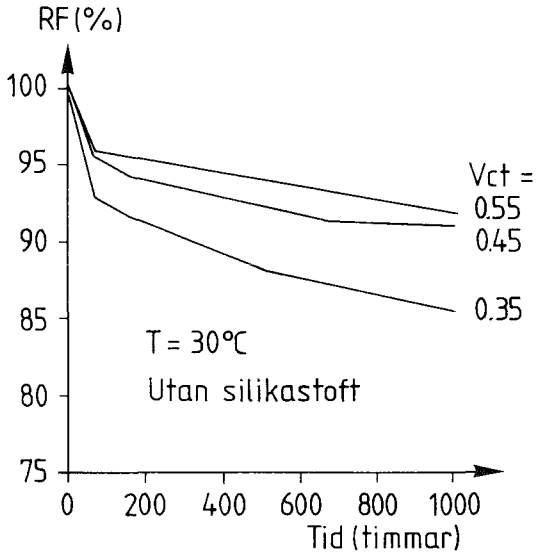
c) Tidsrymden fram tills dess betongen kan beläggas med fuktkänsliga, täta ytmaterial minskar; **Persson (1992E)**.

6.2 Tidigare mätningar av relativ fuktighet vid självuttorkning

Nilsson (1984) visade att kraftig självuttorkning kan ske hos bruk med lågt vct baserat på silikastoft och cement. Detta beror

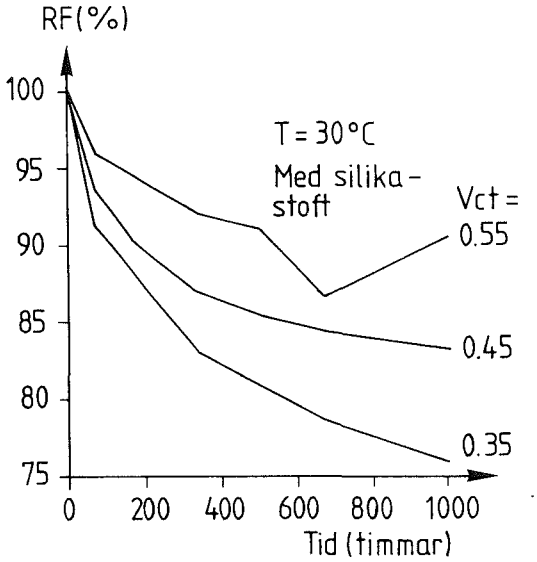
främst på att silikastoft modifierar desorptionsisotermens utseende. (Dessa resultat kom oss tillhanda efter huvudförsökets genomförande).

Christoffersen, Sörensen (1986) redovisade värden på relativa fuktigheten i cementbruk som funktion av tiden vid självuttorkning. Vissa bruk innehöll silikastoft, andra bestod av rent portlandcement. Vattencementtalet varierade mellan 0.35 och 0.55. Resultaten visas i figur 6.1 och 6.2. Efter 42 dygn (1000 tim) nås RF= 86% i bruk som saknar silikastoft och RF=76% i bruk med 10% silikastoft (vct=0.35).



Figur 6.1 Relativ fuktighet, RF, i självtorkande cementbruk utan silikastoft, som funktion av tiden. Christoffersen, Sörensen (1986)

Figure 6.1 Relative humidity, RF, for self-desiccating cement mortar without silica fume as function of time. Christoffersen, Sörensen (1986)

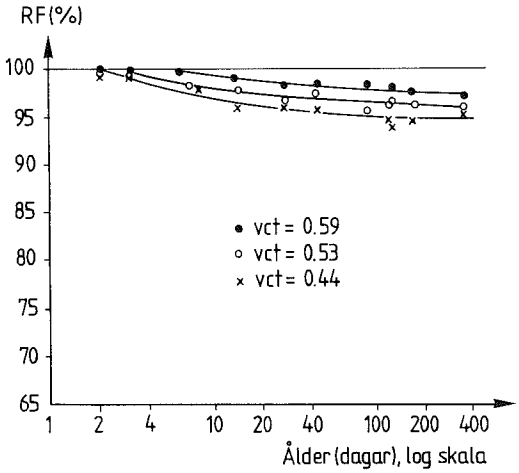


Figur 6.2 Relativ fuktighet, RF, i självtorkande cementbruk med silikastoft, som funktion av tiden. Christoffersen, Sörensen (1986)

Figure 6.2 Relative humidity, RF, for self-desiccating cement mortar with silica fume as function of time. Christoffersen, Sörensen (1986)

Copeland och Bragg (1955) studerade självuttorkning hos Portlandcement på lite längre sikt, 400 dygn. De använde därvid cementpasta med vct= 0.44, 0.53 och 0.59. Resultaten av RF- mätningarna visas i figur 6.3.

Samtliga författare visar alltså att självuttorkningseffekten ökar med minskat vattencementtal.



Figur 6.3 Relativa fuktigheten, RF, i självtorkande av portlandcementpasta vid tre olika vct som funktion av tiden. Copeland och Bragg (1955)

Figure 6.3 Relative humidity, RF, for self-desiccating portlandcement paste at various water-cement ratios as function of time. Copeland and Bragg (1955)

6.3 Egna mätningar

6.3.1 Provade betonger

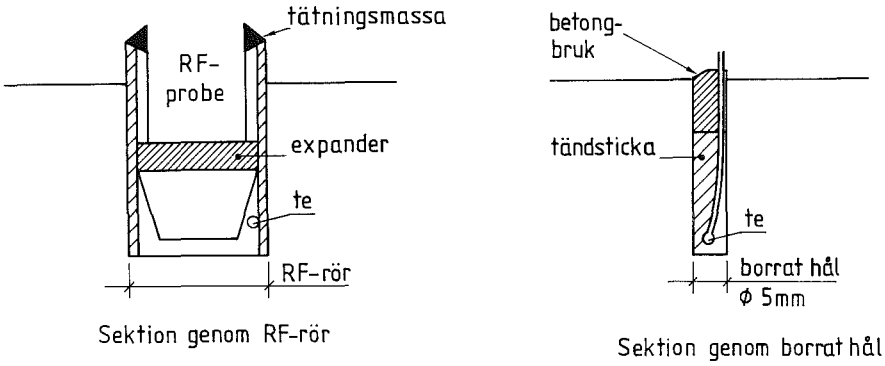
De betongskivor som beskrivs i avsnitt 5.4 användes för undersökning av RF-utvecklingen. Av varje betong tillverkades tre skivor (A,B,C) varav en (A) lagrades i vatten, en (B) lagrades i laboratorieluft och en (C) var helt förseglad på alla kanter och sidor med epoxi dvs den erhöll nästan perfekt s k membranhärdning.

Recept för provade betonger framgår av tabell 5.2. Detaljerade recept, konsistens, lufthalt samt kornstorleksfördelning gives i

DATARAPPORT TVBM-7011; 5.4-5.6. Receptet är så långt möjligt lika de cementbruk som användes för studier av kemisk krympning (se kapitel 3) och för studier av självuttorkning och desorptionsisoterm (se kapitel 4).

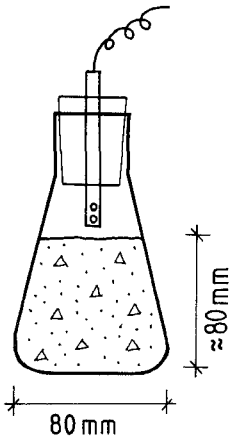
6.3.2 Mätmetod

Mätning av relativa fuktigheten, RF, utfördes dels i ingjutna RF-rör i de i avsnitt 5 beskrivna skivorna (se figur 5.5 och figur 6.4), dels i glaskolvar igjutna med betong (självuttorkning, se figur 6.5). Av varje betong studerades 3 skivor och 2 glaskolvar.



Figur 6.4 Mätning av relativa fuktigheten, RF, i RF-rör ingjutna i betong samt mätning av temperaturen i betongen. (t_e= termoelement)

Figure 6.4 Relative humidity, RF, in measuring tubes cast in concrete. Temperature in the concrete. (t_e= termocouple)



Figur 6.5 Mätning av relativa fuktigheten vid självuttorkning av betong gjuten i glaskolvar

Figure 6.5 *Measurement of relative humidity, RF, of self desiccating concrete cast in glass flasks.*

Mätningarna utfördes med en RF-känslig sensor av typ Vaisala. Mätmetoden förutsätter att mätproben är placerad så lång tid i RF-röret resp kolven att luften mellan proben och betongytan hinner få samma RF som betongen i sig själv har. Denna tidsrymd uppgår till ca 12 timmar för betong med vct=0.24 enligt inledande mätningar som utfördes med en termohygrograf.

Mätningen av RF resp kalibreringen av RF-givarna utfördes under 22 timmar för att mätvärdet med säkerhet skulle ha stabiliserat sig. Mätning i RF-rören har utförts vid 28, 90 och 450 dygns ålder på skivorna. Mätning i en av glaskolvarna utfördes en gång per vecka fram till 90 dygns ålder medan den andra glaskolven enbart användes för mätning vid 28, 90, 450 och i vissa fall 140 dygns ålder. Skälet till detta förfarande var att utröna om de veckovisa mätningarna kunde ge en uttorkningseffekt på betongen i glaskolven jämfört med mätningar enbart vid 28 och 90 dygns ålder.

Vid mätning i RF-rören bestämdes även temperaturen med istuckna termoelement. RF-rören var mellan de olika mättillfällena förseglade med en gummipropp för att uttorkning eller uppfuktning (skiva typ A) skulle undvikas. Tätningsproblem fanns. De beskrivs i nästa avsnitt. Som visas i kapitel 7 borrades ett flertal prover ur skivorna. För att undvika att borrhålet skulle medföra en ökad uttorkning (skiva A och B) eller uppfuktning (skiva A) förseglades alla provhål genom att fyllas med sand som tätades med ett tjockt lager av epoxi EP 91.

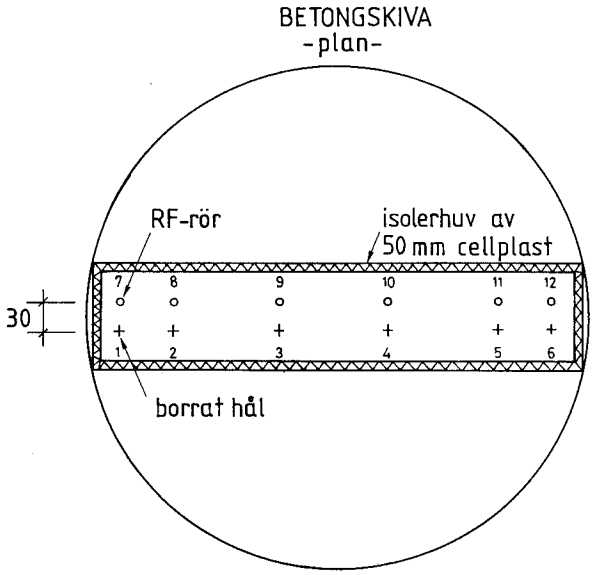
6.3.3 Felkällor och noggrannhet

Temperatursvängningar under pågående mätning:

Vid mätning av RF placerades uppstickande delar av givare och angränsande delar av betongskivan under en huv av 50 mm cellplast i syfte att begränsa temperaturvariationerna under pågående mätning. För att kontrollera temperaturskillnader mellan RF-rör och intilliggande betong utfördes en kompletterande mätning i inborrade och ingjutna termoelement, se figur 6.6. Dessa mätningar utfördes för en enda skiva, blandning 5, typ C. Temperaturskillnaderna mellan RF-rör och intilliggande betong under pågående mätning var små; normalt understeg de 0.1°C. Rådata från mätningarna redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 6.13-6.19.

RF-givare:

RF-Sensorn av typ Vaisala kalibrerades över mättade saltlösningar inom 5 dygn från mättillfället. Kalibrering utfördes på mest närliggande RF-nivåer. Beroende av temperatursvängningar i kalibreringsutrymmet kunde dessa kalibreringsnivåer variera med högst +/- 2%, se analys i avsnitt 4.3.4 i denna rapport.



Figur 6.6 Kontrollmätning av temperatur i RF-rör och i betong

Figure 6.6 Temperature differences between measuring tubes cast in concrete and the concrete itself

Fuktläckage:

De plana sidorna på skivor typ A och B var täckta med epoxi. På skiva typ C var även randen täckt av epoxi. Man kunde inte utesluta att ett visst fuktläckage förekom genom tätningen. För skiva A innebar detta en fuktabsorption, för skiva B och C innebar det en uttorkning.

Epoxiskiktet var mycket tjockt varför fuktflödena torde ha varit mycket små. En viss uppfattning av effekten kunde man få genom att jämföra uppmätta RF-värde i skivor av typ C med den självuttorkningseffekt som uppmätts av andra, t ex **Copeland och Bragg (1955)**, för betong med samma vct; se figur 6.3.

En sådan jämförelse görs i tabell 6.2 mellan den självuttorkande (membranhärdade) skiva typ C av blandning 2 (vct=0.58) och en självtorkande betong med vct=0.59 som studerats av **Copeland och Bragg (1955)**. Som synes är skillnaderna rätt små med tanke på de stora svårigheter det är att uppmäta höga RF-värden med stor precision.

Tabell 6.2 Medel-RF i skiva typ C av betong 2 (vct=0.58) jämförd med en undersökning av Copeland och Bragg för betong med vct=0.59; se figur 6.3

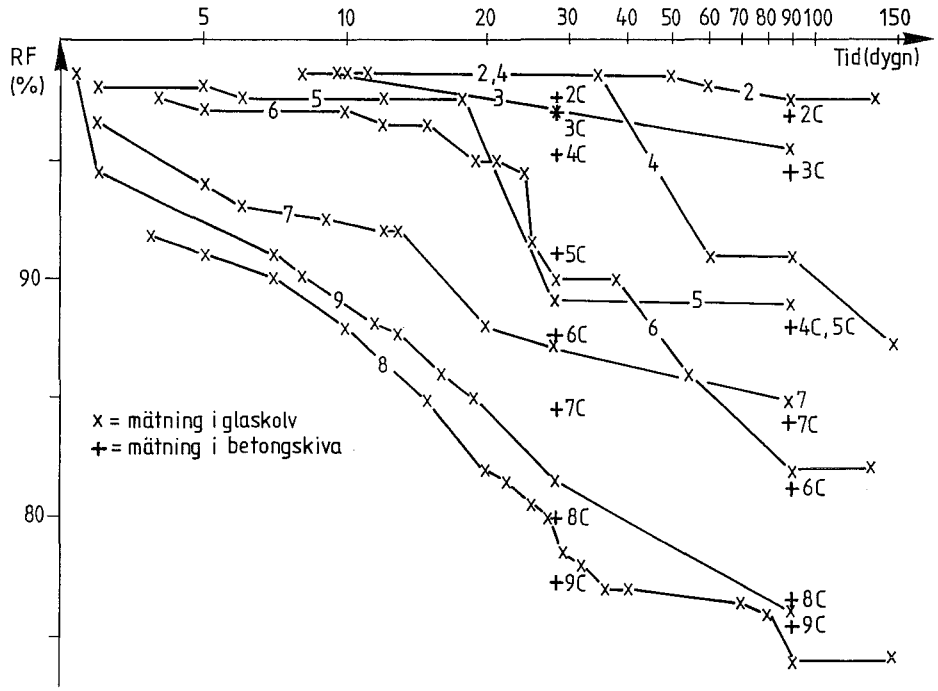
Material	Ålder (dygn)		
	28	90	450
Betong 2, skiva 2C	97.5	97.0	93.5
Copeland & Bragg	98.0	97.5	97.0
Avvikelse (% RF)	-0.5	-0.5	-3.5

6.3.4 Resultat av mätningar i glaskolvar

RF-mätningar i glaskolvar redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 6.28-6.29. Mätdata markeras även i figur 6.7.

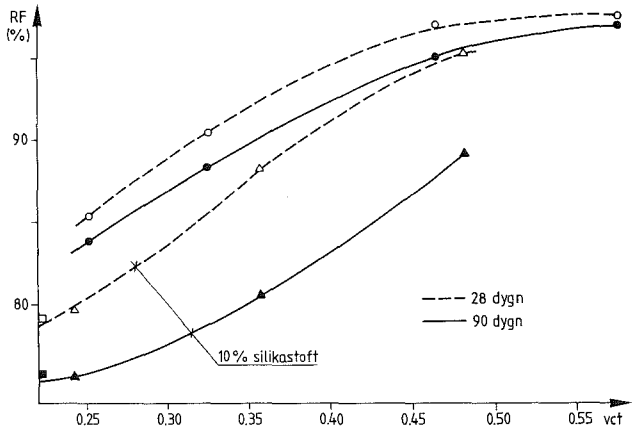
6.3.5 Resultat av mätningar i betongskivor

I DATARAPPORT TVBM-7011; 6.1-12, redovisas samtliga rådata från mätningarna av RF. Mätvärde för förseglade skivor (typ C) visas i figur 6.7 -6.9. Som framgår av figur 6.7 överensstämmer värdena från mätning i glaskolvar mycket väl med värdena från betongskivor. Värdena på RF från glaskolvarna har därför medtagits vid uträkning av medelvärden i figurerna 6.8 och 6.9.



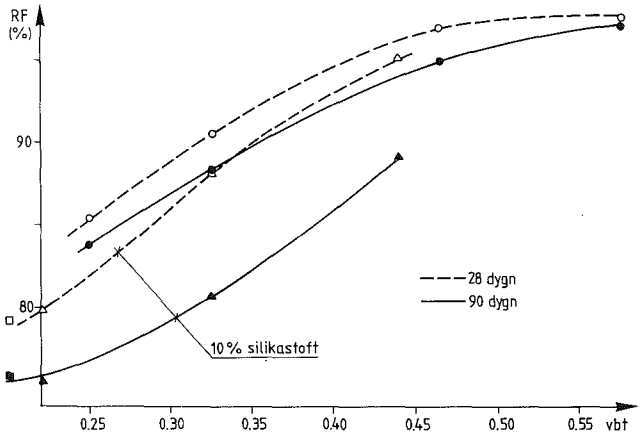
Figur 6.7 RF hos helt inneslutna självtorkande betongskivor av typ C samt hos betong gjuten i glaskolvar som funktion av tiden

Figure 6.7 Relative humidity, RF, at self-desiccation as function of time. Concrete cast as discs (+) and concrete cast in glass flasks (x)



Figur 6.8 RF vid självuttorkning som funktion av vct. Varje punkt är ett medelvärde av 8 mätningar.

Figure 6.8 Relative humidity at self-desiccation as function of water-cement ratio. 28 days (---),90 days (——)

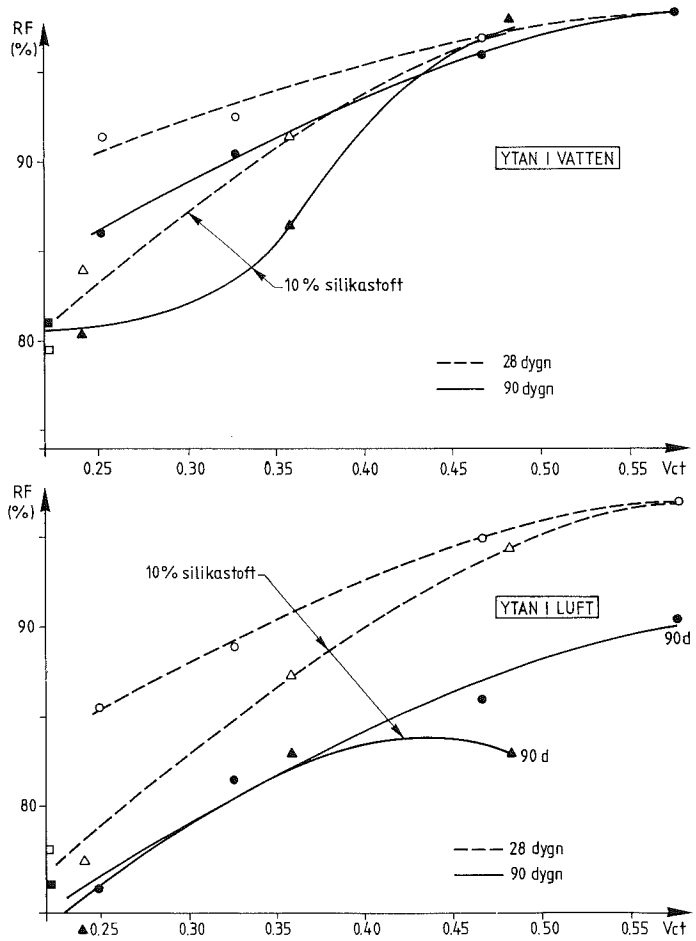


Figur 6.9 RF vid självuttorkning som funktion av vbt. Medelvärde av 8 mätningar.

Figure 6.9 Relative humidity at self-desiccation as function of water-binder ratio. 28 days (---),90 days (——)

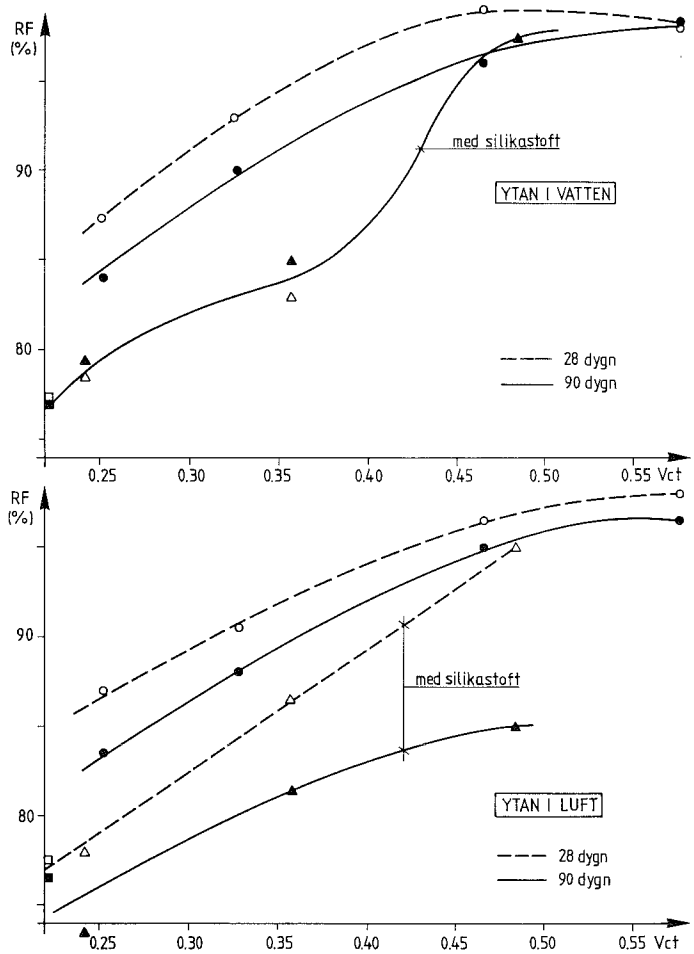
Mätvärden för vattenlagrade skivor och lufttorkande skivor (typ B) visas i figur 6.10- 6.12. Figur 6.10 visar RF på ett avstånd av 50 mm från den exponerade kanten på en betongskivan. På motsvarande sätt visar figur 6.11 RF på ett avstånd av 150 mm och figur 6.12, RF på ett avstånd av 350 mm från kanten på betongskivan.

RF(%) som funktion av avstånd till betongskivans exponerade yta framgår även av bilaga 1 i slutet av denna rapport samt av DATA-RAPPORT TVBM-7011; 6.20- 6.27.



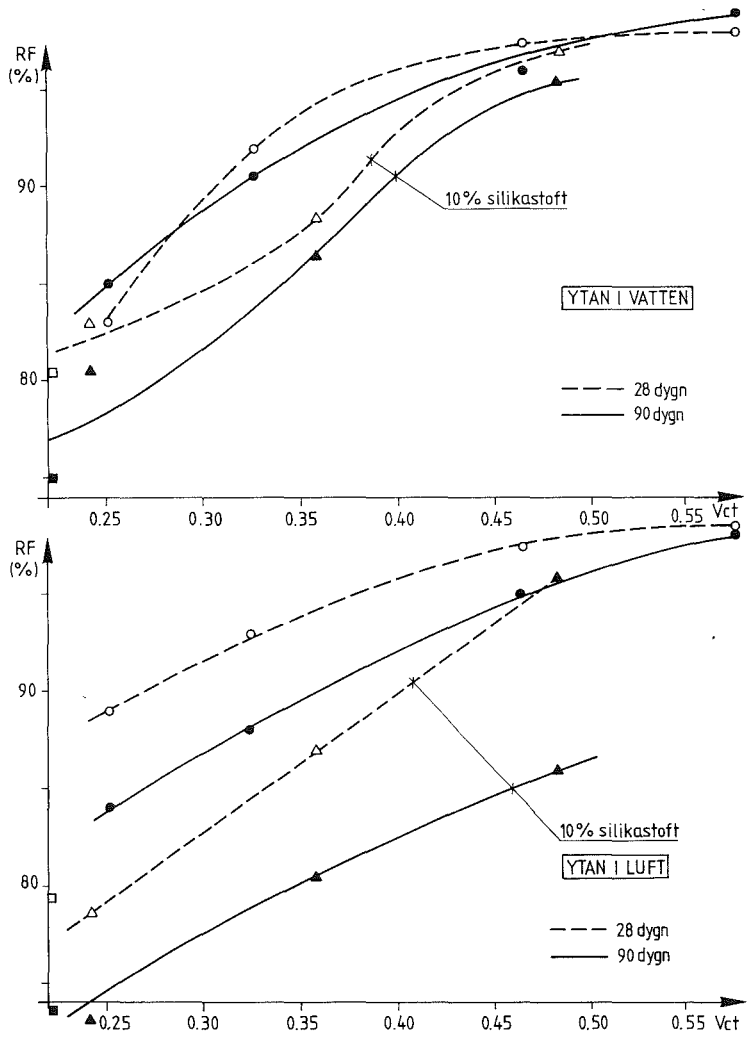
Figur 6.10 RF på avståndet 50 mm från randen på en betongskiva, som funktion av vct. Skivan nedsänkt i vatten (typ A) eller exponerad för luft (typ B)

Figure 6.10 Relative humidity at 50 mm from exposed rim of concrete slab and as function of water-cement ratio. Concrete discs exposed to water or air



Figur 6.11 RF på avståndet 150 mm från randen på en betongskiva som funktion av vct. Skivan nedsänkt i vatten (typ A) eller exponerad för luft (typ B)

Figure 6,11 Relative humidity at 150 mm from exposed rim as function of water-cement ratio. Concrete discs exposed to water or air.



Figur 6.12 RF på avståndet 350 mm från randen på en betongskiva som funktion av vct. Skivan nedsänkt i vatten (typ A) eller exponerad för luft (typ B)

Figure 6.12 Relative humidity at 350 mm from exposed rim as function of water-cement ratio. Concrete discs exposed to water or air.

6.3.6 Kommentarer till resultat

Som framgår av analysen i avsnitt 6.3.3 visar mätning på skiva 2C att epoxiskiktet torde vara mycket tätt. Därför blir en analys av skillnader i RF mellan en betong i vatten (typ A) resp lagrad i luft (typ B) eller som membranhärdad (typ C) meningsfull.

Rand exponerad i vatten:

Mätning på avståndet 50 mm eller 150 mm från randen visar RF-värden vid 90 dygns ålder som är 4-7% högre om betongen innehåller silikastoft och 1-2% högre då betongen är fri från tillsats av silikastoft jämfört med självuttorkning. Motsvarande värden på avståndet 350 mm från randen blir 2-6% resp 1-2% högre vid lagring i vatten jämfört med självuttorkning. Vid vattenlagring höjs således RF-värdena mer om silikastoft ingår i betongen. Orsaken till detta är inte klarlagd. Påpekas bör dock att RF-värdena fortfarande är lägre då silikastoft ingår i betongen än om betongen enbart innehåller portlandcement.

Enda undantaget härvidlag är betong med vct högre än ca 0.44. Sådan betong med silikastoft, som är förvarad i vatten, får då en RF som är lika hög som betong som saknar silikastoft. Mätningen har då utförts på avstånden 50 och 150 mm från randen. Troligen beror detta på, att, vid dessa högre vct, blir betongen så permeabel, att självuttorkningseffekten inte fungerar. Vatten sugs helt enkelt in i den takt som hydratationen fortskrider. Mätvärdena överensstämmer således med vad man logiskt skulle kunna förvänta sig.

Rand exponerad i luft:

Mätning på avståndet 50 mm från randen visar RF-värden vid 90 dygns ålder som är oberoende av om silikastoft används i betongen eller ej. Undantaget är betong med vct=0.47, där RF-värdet med silikastoft av okänd orsak blir något lägre. Mätvärdena för betong utan silikastoft är dock 6-7 % RF lägre än vid självuttorkning, vilket visar att uttorkningseffekten är avsevärd för betongens ytparti.

Mätning på avståndet 150 mm och 350 mm från randen visar överraskande nog RF-värden på samma nivå som vid självuttorkning. Undantaget från detta generella förlopp är betong med silikastoft och vct=0.48. I det senare fallet har av okänd orsak RF sjunkit ca 3 à 4 %.

Allmänna kommentarer:

Vid låga vct "lever" således de inre delarna (mer än ca 150 mm från randen) av betongen "sitt eget liv", som är oberoende av de yttre förhållandena. Undantaget är då vattenförvaring sker av betong med tillsats av silikastoft. RF kan då öka ca 7 % vid 90 dygns ålder jämfört med självuttorkning. Fortfarande blir dock RF-värdena på avståndet 50 mm från betongranden vid vct=0.24 efter 90 dygn lägre än ca 80 % då tillsats av silikastoft skett i betongen. Följdriktigt bör betong med lågt vct och med tillsats av silikastoft, som utsätts för vattenkontakt, förses med en fuktspärr för att dess mycket stora potentiella självuttorkningseffekt skall kunna utnyttjas till fullo.

Resultaten vad gäller RF-nivå för betong med vct>0.35 överensstämmer mycket väl med vad **Christoffersen och Sörensen (1986)** samt **Copeland och Bragg (1955)** funnit. För vct<0.35 är de i denna undersökning uppmätta RF-värdena anmärkningsvärt låga och aldrig tidigare observerade.

6.4 Slutsatser

Följande resultat kan dras av undersökningen. I vissa stycken avviker resultaten från vad som är känt från normal betong.

1) Vid en simulerad pelare med diametern 1 m och vct=0.58, som varit helt innesluten (självuttorkning), erhåller man 3 månader efter gjutning RF=97.5%. Detta överensstämmer väl med vad som andra funnit; se t ex figur 6.3 och tabell 6.2.

2) Vid vbt=0.22 (10% silikastoft) och samma simulerade konstruktion satt under självuttorkning nås RF=97% redan något dygn efter gjutning. Efter 3 månader har konstruktionen erhållit RF=76%.

3) Betong med vbt=0.22 (10% silikastoft) har en så starkt självuttorkande förmåga att man vid en simulerad pelare med 1 meters diameter helt nedsänkt i vatten erhåller RF=80% på avståndet 50 mm från den vattenutsatta randen vid mätning 3 månader efter gjutning.

4) Om högpresterande betong av ovannämnda typ nyttjades vid platsgjutna konstruktioner skulle man förmodligen kunna lösa många fukt- och uttorkningsproblem och erhålla ett tidigare färdigställande av byggnaden.

6.5 Uppföljning av RF vid 450 dygns betongålder

6.5.1 Allmänt.

En uppföljning av RF-utvecklingen hos betongskivorna har genomförts vid ca 450 dygns ålder. Provkropparna har, fram till uppföljningen, förvarats under samma betingelser som tidigare dvs en skiva av varje betongtyp med den exponerade kanten i vatten, en med kanten i luft samt en membranhärdad. Totala antalet skivor blir alltså liksom tidigare 24 st.

Långtidsuppföljningen skulle ge svar på följande frågor:

1: Är epoxiskiktet på betongytorna så tätt att den membranhärdade skivan 2C (se tabell 2C) bibehållit den självuttorkningsgrad den erhöll vid 90 dygns ålder?

2: Hur snabbt stiger RF i en betong med ett lågt vct ständigt exponerad för vatten (skivor typ A)?

3: Hur sker uttorkningen för motsvarande betong förvarad i luft (skior typ B)?

4: Hur långt kan självuttorkningen fortskrida i betong med lågt vct (skivor typ C)?

Samma mätmetod tillämpades som den som beskrivs i avsnitt 6.3.2.

6.5.2 Mätresultat

Mätvärden redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 6.9-12. För skiva 2C erhålles RF=93.5%; se tabell 6.2. Det antas att ett riktigt värde är ca 97.0% för denna typ av betong dvs ett visst fuktläckage har skett. En justering δ_{RF} av mätvärdena har därför skett. Justeringens storlek visas i tabell 6.3.

Tabell 6.3 Justering, δ_{RF}, av RF p g a tänkbart fuktläckage i epoxiskikt

	δ_{RF} (%-enheter)		
Exponeringssätt	Typ A	Typ B	Typ C
	-3%	+3%	+3%

För skivor typ A innebär justeringen att mätvärdet reduceras med δ_{RF}. För skivor typ B och C innebär justeringen i stället en ökning av mätvärdet. Det måste medges att den gjorda justeringen är osäker. Det kan mycket väl vara så att ett RF-värde av 93.5% är rimligt efter en så lång härdningstid som 450 dygn.

Begreppet "effektivt vattenbindetal", vbt_{eff}, definierat av

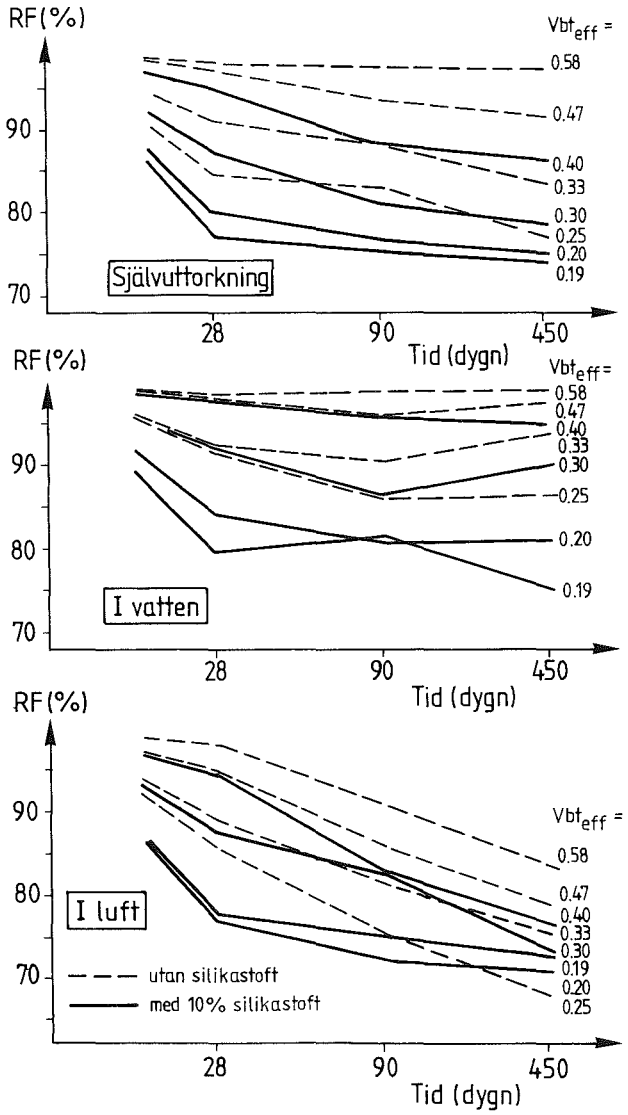
$$vbt_{eff} = \frac{w_0}{C+2 \bullet S} \qquad \text{----------(6.1)}$$

där

w_0 är vattenhalt vid blandning
C är cementhalt -"- -"-
S är halt av silikastoft vid blandning,

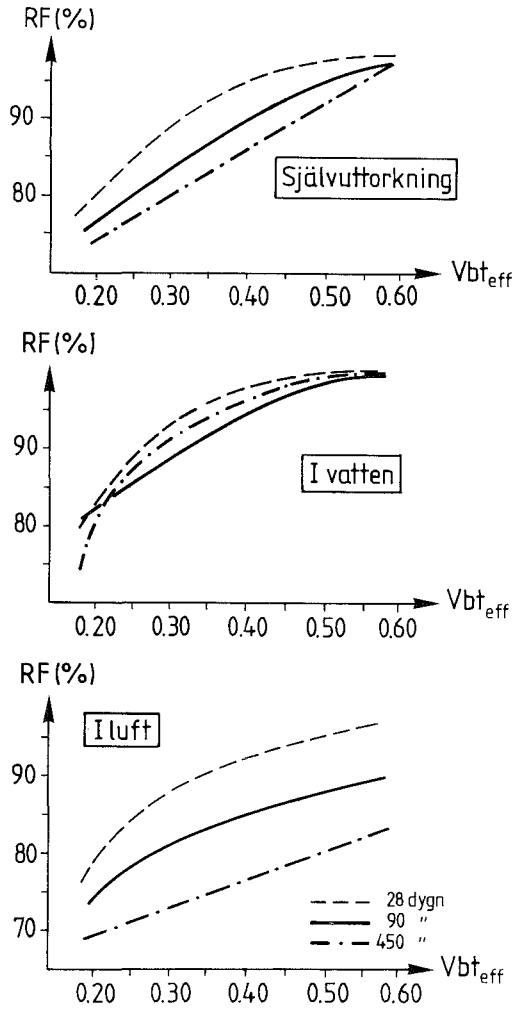
införes eftersom det tycks ge ett bättre samband med RF än vad både vct och vbt gör, jämför figurerna 6.8, 6.9, 6.10 och 6.12 med figurerna 6.13, 6.14 och 6.15.

I figur 6.13 visas RF som funktion av tiden medan RF som funktion av vbt_{eff} visas i figur 6.14. I figur 6.15 visas RF som funktion av vbt_{eff} vid varierande ålder och exponeringssätt. I figur 6.15 ges även exempel på hur de i denna undersökning framtagna uttorkningskurvorna kan användas för att välja betong m h t önskad uttorkningstid (s k "dimensioneringsgång").



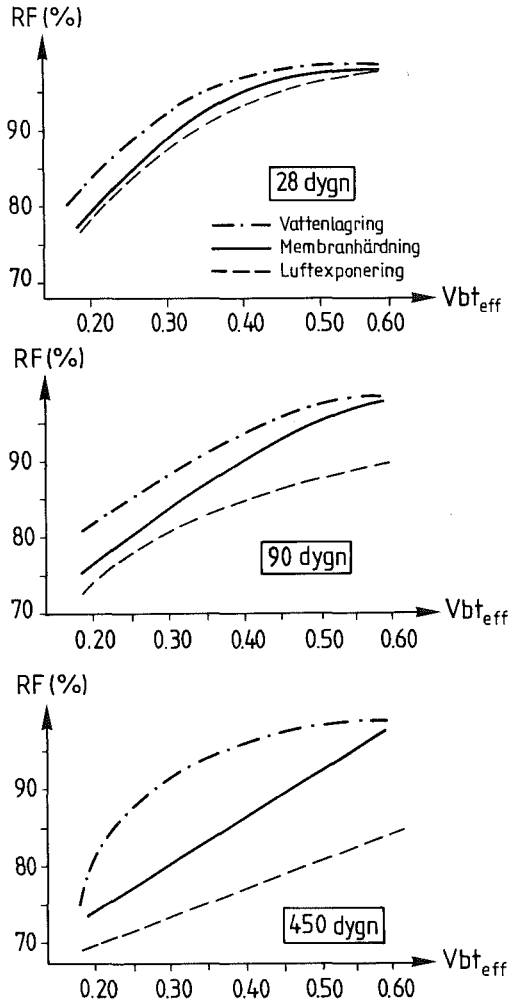
Figur 6.13 RF på avståndet 50 mm från kanten som funktion av tiden. Kanten exponerad för vatten, luft eller membranhärdad. Justering av RF-värdena enligt tabell 6.3

Figure 6.13 Relative humidity, RF, as function of time at 50 mm from rim of concrete disc



Figur 6.14 RF på avståndet 50 mm från kanten på betongskivan som funktion av det "effektiva vattenbindetalet". Kanten exponerad för vatten, luft eller membranhärdad. Justering av RF-värdena enligt tabell 6.3

Figure 6.14 Relative humidity, RF, as function of effective water-binder ratio at 50 mm from rim of concrete disc



<u>Dimensioneringsgång</u>
för val av betong med önskad uttorknings-tid (Anläggningscem.)

a. Bestäm ålder för önskad RF
b. Bestäm RF
c. Bestäm exponering
d. Avläs erf. vbt_{eff}
e. Öka vbt_{eff} med ca 0.04 för Slite Std

Exempel 1:
a. 28 dygn
b. RF=85%
c. Luft
d. Vbt_{eff}=0.28.

Exempel 2:
a. 90 dygn
b. RF=85%
c. Membran
d. Vbt_{eff}=0.32.

Exempel 3:
a. 450 dygn
b. RF=85%
c. Vatten
d. Vbt_{eff}=0.24.

Figur 6.15 RF på avståndet 50 mm från kanten på betongskivan som funktion av det "effektiva vattenbindetalet". Kanten exponerad för vatten, luft eller tätad. Justering av RF-värdena utförd enligt tabell 6.3.

Figure 6.15 Relative humidity, RF, as function of effective water-binder ratio at 50 mm from rim of concrete disc

En översikt över RF-värdena i betongskivorna efter 450 dygn ges även i tabell 6.4 (justerade enligt punkt 6.5.2). Redovisade värden avser RF på avståndet 50 mm från den exponerade randen. Som referens ges även RF mätt på betong som gjutits i glaskolvar ("Kolv"); se figur 6.5.

Tabell 6.4 RF på avståndet 50 mm från randen av skivan efter 450 dygn

Bl	C	S	SP62	Vct	Vbt	Vbt_{eff}	RF(%)			
no	kg/m^3	% av C	% av C	w_0/C	$w_0/(C+S)$	$w_0/(C+2S)$	Membr	Vatten	Luft	Kolv x)
2	298	-	-	0.58	0.58	0.58	97.5	98.5	83.5	97.5
3	302	-	1.00	0.47	0.47	0.47	91.5	97.5	79.0	95.0
4	297	10	0.72	0.48	0.44	0.40	84.0	94.0	75.0	88.5
5	398	-	0.84	0.33	0.33	0.33	83.5	93.5	77.0	83.5
6	387	10	0.79	0.36	0.33	0.30	78.5	90.0	73.5	88.0
7	454	-	1.95	0.25	0.25	0.25	77.0	86.5	68.0	80.5
8	474	10	1.64	0.24	0.22	0.20	75.0	81.0	70.5	74.5
9	482	10	2.76	0.22	0.20	0.19	74.0	75.0	73.0	75.5

x) Mätning av RF i en glaskolv delvis fylld med betong som membranhärdats.

SP62= flyttillsats, torrvikt
w_0=vatten, C=cement, S=silikastoft

6.5.3 Kommentarer

Långtidsuppföljningen ger följande svar på de frågor som uppställdes under punkt 6.5.1:

1: Visst fuktläckage har troligen förekommit genom epoxiskiktet och gummipropparna, som användes för att täta RF-rören. En smärre RF-justering har därför genomförts.

2: RF fortsätter att sjunka vid låga vattenbindetal även om betongen ligger i vatten (skivor typ A). På avståndet 50 mm från den vattenlagrade kanten på skivan av betong med vbt_{eff} mindre än 0.30 understiger RF 90% trots att betongen legat ständigt i vatten under 450 dygn.

3: Det tar längre tid att torka en betongskiva som ligger i luft (typ B) ju högre vct är. Vid vbt_{eff}=0.58 håller betongskivan RF=85% efter 450 dygn i luft mätt 50 mm från den torkande randen. Vid vbt_{eff}=0.29 nås samma värde efter 45 dygn, dvs erforderlig torktid reduceras med 90%. (Den betraktade betongskivan motsvarar på djupet 50 mm geometriskt ett ensidigt uttorkat betongbjälklag med tjockleken 0.25m eller ett dubbelsidigt uttorkat med tjockleken 0.5m).

4: De självtorkande proverna (typ C) visar att en avsevärd sänkning av RF sker mellan 90 och 450 dygn. Sänkningen är särskilt stor för betong med låga vbt. Detta visar att hydratation kan ske trots de mycket torra förhållandena som råder inne i betongen. Detta har veterligen inte observerats tidigare.

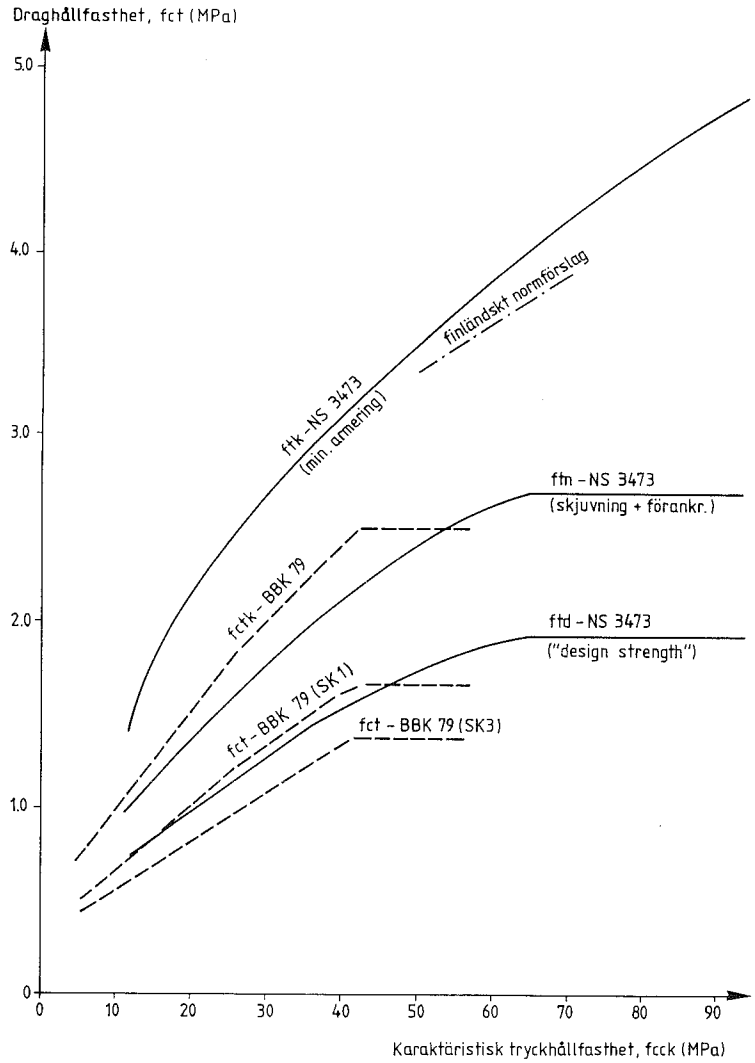
7. HÅLLFASTHETSUTVECKLING

7.1 Faktorer som påverkar resultatet av en hållfasthetsprovning

Hållfasthet eller med modern nomenklatur, brottpåkänning, definieras som brottbelastning per ytenhet. I materialsammanhang talar man om brottpåkänning, karaktäristisk påkänning och dimensionerande påkänning. Hållfastheten blir beroende av bl a fukttillståndet under provningen. I Sverige bestäms brottpåkänningen oftast på en torkad provkropp medan man utomlands tillämpar våtlagring fram till provning. Tryckhållfastheten är den för betong mest omtalade och provade egenskapen. Vad gäller draghållfasthet skiljer man på spräckhållfasthet, böjdraghållfasthet och centrisk draghållfasthet.
Det är känt att hållfasthetsvärdena för normal betong i huvudsak påverkas av följande faktorer:

* Vattencementtal
* Cementsort
* Kompakteringsgrad
* Ålder och härdningsförhållanden
* Ballast
* Fukttillstånd vid provning
* Provkroppsutformning
* Belastningshastighet

I figur 7.1 visas gällande normer för de samband tryck- och draghållfasthet som får användas vid statisk dimensionering. Norsk norm sträcker sig till 105 MPa i karaktäristisk tryckhållfasthet, f_{cck}. Finsk norm begränsas till 70 MPa medan den svenska normen endast ger utrymme för att utnyttja 56.5 MPa i karaktäristisk tryckhållfasthet.

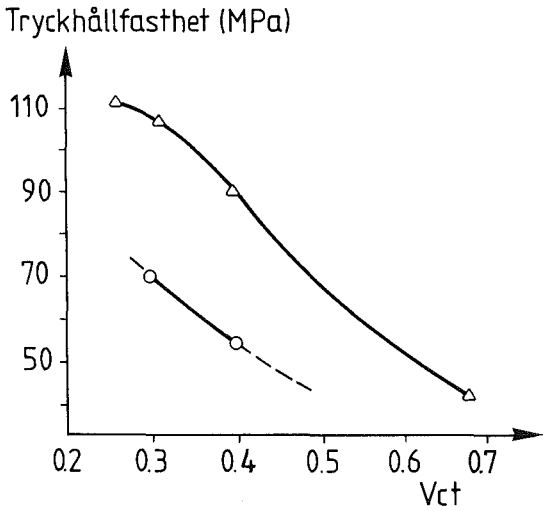


Figur 7.1 Draghållfasthet som funktion av karaktäristisk tryckhållfasthet, f_{cck}, enligt finsk, norsk och svensk norm

Figure 7.1 Tensile strength as function of caracteristic compressive strength, f_{cck}, according to the Finish, the Norwegian and the Swedish code

7.2 Tidigare hållfasthetsmätningar på högpresterande betong

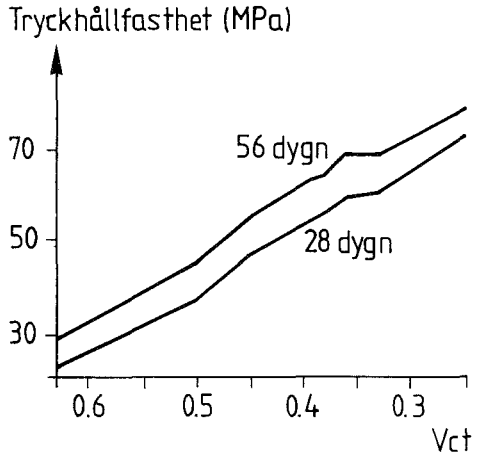
Helland (1987) visar i figur 7.2 samband mellan vattencementtalet, w_0/C, och tryckhållfastheten för betong över ett stort vct-område. Övre kurvan visar betong med 15% silikastoft av cementinnehållet. Kurvorna baserar sig på ett mycket litet försöksunderlag.



Figur 7.2 Samband mellan vattencementtalet, w_0/C, och tryckhållfasthet hos betong. Övre kurvan visar betong med 15% silikastoft av cementinnehållet. Betongålder: 28 dygn Helland (1987).

Figure 7.2 Compressive strength of concrete as function of the water-cement ratio, w_0/C,. The upper curve is valid for concrete with 15% silica fume. Age of concrete: 28 days. Helland (1987)

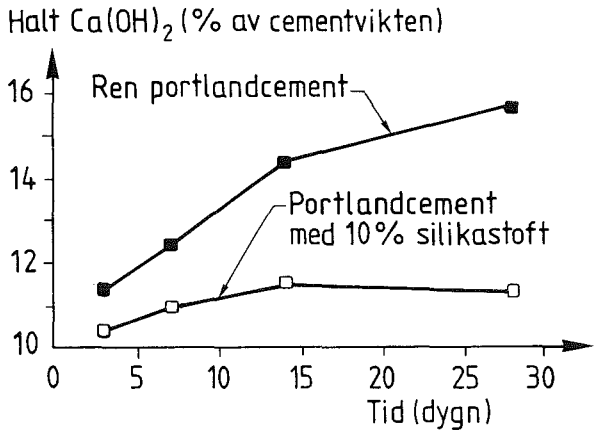
Howard, Leatham (1989) visar i figur 7.3 ett nästan lineärt samband mellan vattencementtal och tryckhållfasthet hos cementpasta. Hållfasthetsnivån är något lägre jämfört med Hellands försök; särskilt för betong med silikastoft.



Figur 7.3 Samband mellan vattencementtal och tryckhållfasthet för cementpasta. Howard, Leatham (1989)

Figur 7.3 Compressive strength for cement paste as a function of the water cement ratio. Howard, Leatham (1989)

Rosenberg, Gaidis (1989) framhåller betydelsen av god vidhäftning mellan pasta och ballast för att uppnå hög hållfasthet. Enligt Rosenberg bildas ett lager med kalciumdihydroxid närmast ballastytan. I figur 7.4 visas att innehållet av kalciumhydroxid i en betong med 10 % silikastoft av cementinnehållet, sjunker från ca 16 % till ca 11 % vid 28 dygns ålder. Innehållet av kalciumhydroxid sjunker även i området närmast ballastfasgränsen. Detta skulle, enligt Rosenberg, vara en av huvudorsakerna till bättre vidhäftning mellan ballast och pasta. Liknande observationer och konstateranden har även gjorts av flera andra författare.



Figur 7.4 Innehåll av kalciumhydroxid i betong som funktion av tiden. Rosenberg, Gaidis (1989)

Figure 7.4 Concentration of free lime (calciumhydroxide, % of C) in concrete as a function of time. Rosenberg, Gaidis (1989)

Altcin et al (1990) har borrat ut och hållfasthetsprovat cylindrar ur en kvadratisk pelare med 1.1 m sida. Receptet för betongen i pelarna såg ut på följande sätt:

Vct	0.24
Cementhalt	500 kg/m^3
Tillsats av silikastoft	30 kg/m^3
Makadam 10 mm (kalksten)	1100 kg/m^3
Naturlig sand	700 kg/m^3
Flyttillsats (naftalen) och retarder	16 kg/m^3

Borrningar utfördes 2 och 4 år efter gjutning. Utborrade cylindrarna med 2 och 4 års ålder hade samma tryckhållfasthet som cylindrar av samma storlek förvarade i kalkhaltigt vatten och provade 28 dygn efter gjutning; ca 85 MPa. Mikrostrukturstudier

visade att det, fortfarande vid 4 års ålder, var mycket god vidhäftning mellan ballast och pasta samt att inga mikrosprickor fanns.

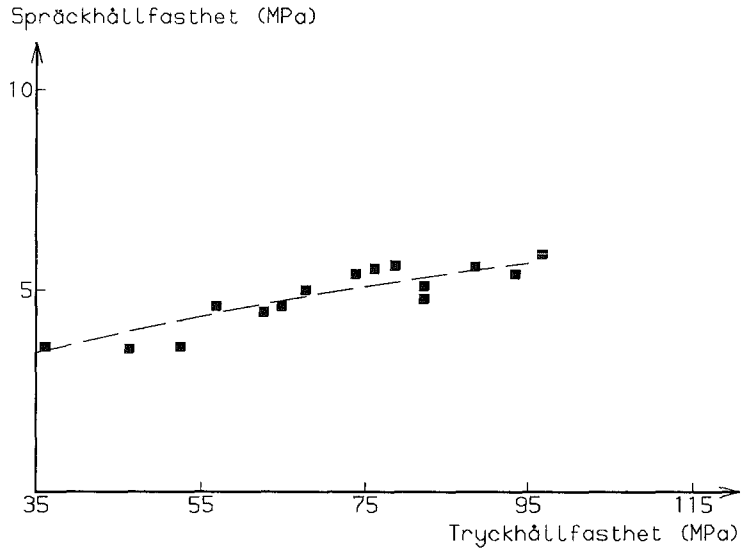
Held (1990) visade ett samband mellan spräck- och tryckhållfasthet hos högpresterande betong, se figur 7.5.

$$f_{spl} = 0.59 \cdot f_c^{0.5} \qquad \text{----------(7.1)}$$

där

f_{spl} = spräckhållfasthet

f_c = tryckhållfasthet

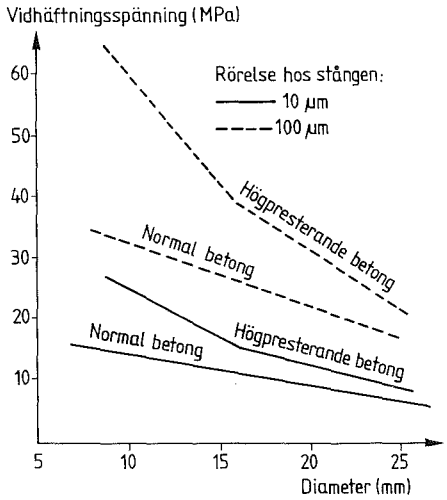


Figur 7.5 Spräckhållfastheten som funktion av tryckhållfasthet hos betong. Held (1990)

Figure 7.5 Split strength, f_{spl}, as function of compressive strength, f_c, for concrete. Held (1990)

Enligt ekv. (7.1) uppgår spräckhållfastheten enbart till 5.9 MPa vid en tryckhållfasthet av 100 MPa. Flera andra mätningar finns som visar betydligt högre spräckhållfastheter.

de Larrard (1990) visar i figur 7.6 vidhäftningsspänningen mellan armeringsstål och betong som funktion av stångdiametern vid olika förskjutning av stången. de Larrard studerade s k normal betong, (béton témoin), med vct=0.44, utan silikastoft och med en 28-dygns tryckhållfasthet av 42 MPa. Han studerade även högpresterande betong, (BTHP, beton a tres hautes performances), med vct=0.24, 10% silikastoft av cementinnehållet samt med en 28-dygns tryckhållfasthet av 95 MPa. Vid 10 mm diameter ökar vidhäftningsspänningen med 80% vid högpresterande jämfört med normal betong medan den ökar med 30% vid diameter 25 mm.



Figur 7.6 Vidhäftningsspänning mellan armering och betong som funktion av armeringsstångens diameter vid olika förskjutning (rörelse) av stången. de Larrard (1990)

Figure 7.6 Adhesion strength between the bar and the concrete as function of diameter of steel bar during different displacements of this. de Larrard (1990)

7.3 Provningsmetoder i föreliggande undersökning

7.3.1 Allmänt

Provningsmetoder behandlas här separat eftersom de är gemensamma för de förförsök och huvudförsök samt den långtidsuppföljning som beskrivs i avsnitt 7.4 och framåt.

7.3.2 Kubprovning

Kubhållfastheten bestämdes på 150 mm kub med mellanlägg av 3.5 mm hård träfiberskiva (Masonite) och med en belastningshastighet av ca 1 s/MPa.

Kubprovningen utfördes i endera 3000 kN eller 10000 kN press vid LTH eller i 5000 kN press vid CEMLAB, Slite. Mellanlägg användes för att så långt som möjligt göra värdena från kubprovningarna jämförbara med de nedan beskrivna cylinderprovningarna på utborrade prover. Måttkontroll utfördes av kuberna och dessa höll toleranserna 150- 1.5 mm eller 150+ 2.8 mm. Provnormen kräver 150± 2 mm. Slutligen utfördes en areakontroll av varje kub.

Kubprovning vid förförsöken utfördes vid en ålder varierande mellan 1 och 14 dygn. Kubprovning vid huvudförsöken utfördes på en våt kub efter 28 dygn samt på en torr och en våt kub 90 dygn efter gjutning. Centreringen av kuben utfördes genom markering på kub och tryckplatta. Vid hållfastheter över 100 MPa erfordrades splitterskydd, eftersom brottet hade en explosiv karaktär.

7.3.3 Tryckprovning på utborrade cylindrar

Tryckhållfastheten bestämdes på utborrade cylindrar med diameter 40 mm, längd 80 mm. Mellanlägg av 3.5 mm hård träfiberskiva (Masonite) användes och belastningshastigheten var ca 1 s/MPa. Vid provningen på CEMLAB i Slite användes inte mellanlägg eftersom cylindrarna där kunde avjämnas genom slipning.

Provkropparna borrades ur de använda betongskivorna vid 28 resp 90 dygns ålder. Placeringen av borrningarna framgår av figur 5.5. Vid varje tillfälle togs 6 st cylindrar ut dvs 2 st från vardera kantavstånden 50, 150 och 350 mm. Cylindrarna kapades, uppmättes och trycktes i 1000 kN eller 400 kN tryckpress. Diametern 40 mm och längden ca 80 mm valdes av laboratoriemässiga skäl för att passa storleken på betongskivor, deglar och ugn. Eftersom avplaningsutrustning saknades på LTH användes ett mellanlägg av 3.5 mm träfiberskiva.

För att undvika uppfuktnings- resp. uttorkningsspänningar avtorkades provkropparna och förvarades i en grov plastpåse mellan de olika arbetsmomenten. Efter varje tryckning finfördelades allt material med hjälp av tryckpressen. Materialet uppsamlades därefter i en aluminiumburk och i en grov plastpåse för att senare kunna användas vid hydratationsbestämningar; se kapitel 8. Centrering utfördes medelst markering på cylinder och tryckplatta. Provningen utfördes i för resp skiva aktuellt fukttillstånd dvs fuktlagrad skiva (typ A), lufttorkad skiva (typ B) och membranhärdad skiva (typ C).

Sedermera utfördes även provning av tryckhållfastheten vid CEMLAB i Slite, utan mellanlägg mellan prover och tryckplattor. Parallellt med dessa senare provningar utfördes även tryckprovning vid LTH för att utröna skillnaden i tryckhållfasthet med och utan mellanlägg vid olika aktuella fukttillstånd hos provkropparna.

7.3.4 Spräckprovning

Kuber:

Spräckhållfasthet bestämdes vid förförsöken på 150 mm kuber med mellanlägg av 3.5 mm hård träfiberskiva (Masonite) och med en belastningstid av minst 30 s.

Utborrade cylindrar:

Spräckhållfastheten bestämdes vid huvudförsöken samt vid uppföljningen på cylindrar med diameter 40 mm och längd 80 mm. Mellanlägg av 3.5 mm hård träfiberskiva (Masonite) med en bredd av 4.2 mm användes. Belastningstiden uppgick till minst 30 s. Cylindrarna borrades ur betongskivorna vid 28 och 90 dygns ålder. Vid varje tillfälle togs tre prover ut. Cylindrarna kapades till rätt längd (80 mm), uppmättes och spräcktes i endera 400 eller 1000 kN tryckpress vid LTH.

För att undvika onaturliga uttorkningsspänningar i cylindern, avtorkades denna snabbt efter varje arbetsmoment och förvarades i en kraftig plastpåse mellan arbetsmomenten. Centrering utfördes genom markering på tryckplatta och cylinder (vid mellanlägget). Spräckhållfastheten beräknades i enlighet med provnormen (dvs multiplikation av påkänningen med $2/\pi$).

Som ett komplement till provningarna av spräckhållfasthet har andelen spräckbrott hos ballastkorn större än 4 mm fastställts genom okulär observation av spräckbrottytorna (räkning av antalet spräckbrott och vidhäftningsbrott).

7.3.5 Felkällor och noggrannhet vid tryckprovning

Kubens area:

Kubhållfastheten, f_1, bestäms som $f_1 = F/A$, där F är kraft och A area. Enligt vad som visas i avsnitt 3.4.4 blir felet $\delta f_1/f_1 = \delta F/F - \delta A/A$. Eftersom tryckpressarna kalibrerats av Statens Provningsanstalt, vilket bör ge ett fel mindre än 0.1% och arean kan bestämmas med ett fel som är mindre än 1 cm^2 av 225 cm^2 blir största felet i f_1: $\delta f_1/f_1 < 0.003$ eller 0.3%.

Cylinderns area:

Inmätning av cylinderdiametern kan utföras med 0.1mm i noggrannhet, varför felet i tryckhållfastheten blir som störst ca 0.15%.

Disparallellitet:

Cylindrarnas tryckytor var inte helt parallella. Inte heller pressens tryckytor var helt parallella. Detta gäller särskilt 1000 kN pressen. Genom ett stort antal provningar kunde ett regressionssamband mellan hållfasthet och disparallellitet tas fram. Efter det att dessa problem konstaterats användes en 400 kN:s press. Vid de fortsatta provtryckningarna inverkade disparallelliteten ej på resultatet vid vinklar på mindre än 0.7^{o}.

7.3.6 Felkällor och noggrannhet vid spräckprovning

Tryckpressens noggrannhet är 0.1% och inmätning av cylinderdiametern kan utföras med 0.1 mm i noggrannhet, varför felet i spräckhållfasthet blir som störst ca 0.15%. Beroende av den utborrade cylinderns form kan böjbrott erhållas. Resultatet har i så fall tagits ur provserien. Vid bestämning av spräckbrottandel kan ballast missas i räkningen. Vid räkning av antal ballastkorn > 4 mm i brottytan kan uppskattningsvis 2 st missas per brottyta varför felet i spräckbrottandel som mest kan uppgå till ca 7%.

7.4 Förförsök

7.4.1 Betongrecept och genomförande

Förförsöken genomfördes i syfte att studera provningsmetodikens noggrannhet samt eventuella felkällor. Samtidigt erhölls den provade betongens hållfasthetsnivå. 15 st betongrecept studerades. Översiktliga recept ges i tabell 5.1. Av de 15 blandningarna tillverkades 150 mm kuber för provning av kub- och spräckhållfastheten. Ur varje blandning vattenlagrades 3 st standardkuber.

För blandning 8:1 tillverkades dessutom små cylindrar med diameter 40 mm och längd 80 mm. En skiva med diametern 1 m och tjockleken 0.1 m. tillverkades. Skivans bägge plana sidor belades med 2 mm epoxi dagarna efter gjutning. Ur denna skiva borrades det vid 28 dygns ålder ett stort antal cylindrar med diameter 40 mm. Provkroppsmått från uppmätning av utborrade cylindrar framgår av DATARAPPORT TVBM-7011; 7.2. Cylindrarna tillkapades med stensåg så att en längd av ca 80 mm erhölls.

7.4.2 Resultat av förförsök

Samtliga mätdata från förförsök ges i DATARAPPORT TVBM-7011; 7.1-7.2. I tabell 7.1 nedan redovisas mätta och omräknade hållfasthetsvärden för kuber tillverkade av förblandningarna. Värdena har omräknats till 28 dygns ålder enligt SS 137207 resp 137213 för att en jämförelse skall kunna utföras mellan de olika blandningarna.

Hållfastheten som funktion av vbt för samtliga förblandningar visas i figur 7.7

Tabell 7.1 Hållfasthetsdata från provningar av kuber vid förförsök (MPa). Medelvärde av ca 60 prover.

Blandning	Provålder	Tryckhållfasthet		Spräckhållfasthet	
no	(dygn)	Mätt	Omräknat	Mätt	Omräknat
1:1	66	60	55	-	-
2:1	13	53	58	3.7	4.1
2:2	-	-	-	-	-
3:1	11	65	70	3.6	3.9
3:2	11	69	75	2.8	3.0
3:3	10	64	72	3.7	4.2
4:1	12	74	81	4.0	4.4
4:2	12	80	87	5.2	5.6
5:1	11	92	102	5.0	5.5
5:2	10	89	99	5.4	6.0
6:1	7	90	102	5.5	6.2
7:1	8	93	106	5.2	5.9
7:2	7	96	110	5.3	6.1
8:1	14	113	145	13.8	16.6
9:1	0.67	55	138	3.4	8.4

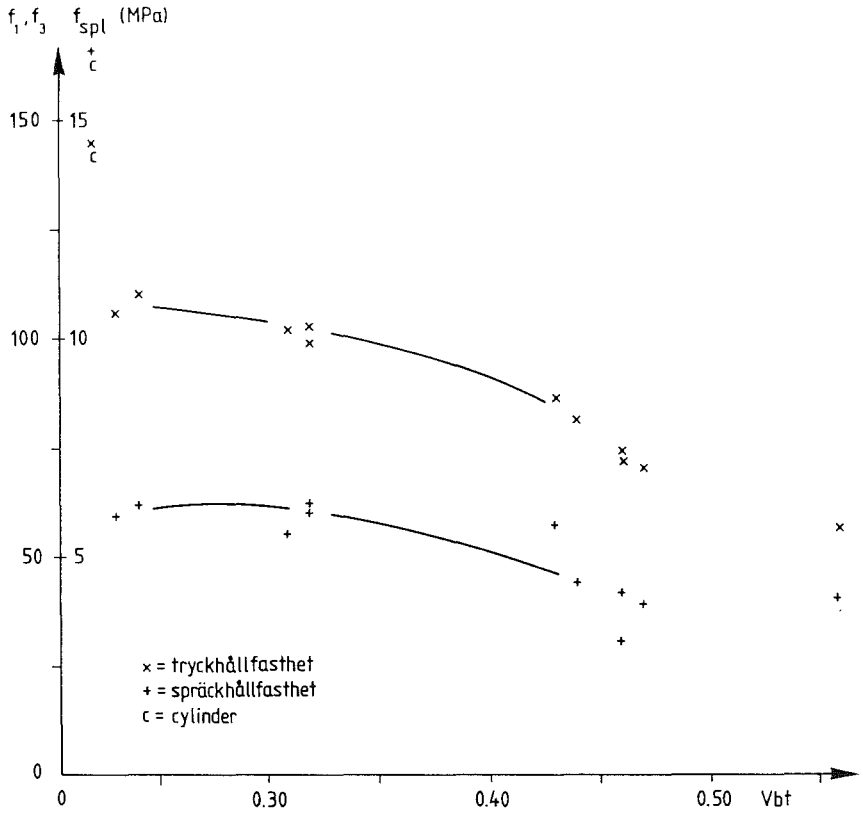
Det är även av intresse att få kunskap om hur ändytornas parallellitet påverkar provningsresultatet. För detta ändamål användes de cylindrar som borrades ur betongskivorna och vars ändytor tillkapades med diamantsåg. Alla cylindrar var borrade ur samma skiva och borde alltså ha samma hållfasthet. Sambandet mellan tryckhållfasthet och ändytornas disparallellitet visas i figur 7.8.

7.4.3 Slutsatser av förförsök

Den viktigaste slutsatsen av förförsöken är, att man kan arbeta med utborrade cylindrar med endast kapade ändytor i samband med provning av tryckhållfasthet, förutsatt att mellanlägg användes i form av 3.5 mm hård träfiberskiva. Vid en vinkelavvikelse av 0°-3° tycks nämligen disparallelliteten inte ha någon nämnvärd inverkan på resultatet; se figur 7.8. Slipning av ändytan hade heller ej någon gynnsam effekt på tryckhållfastheten. Troligen berodde detta på att sliputrustningen var olämplig; gav ej helt

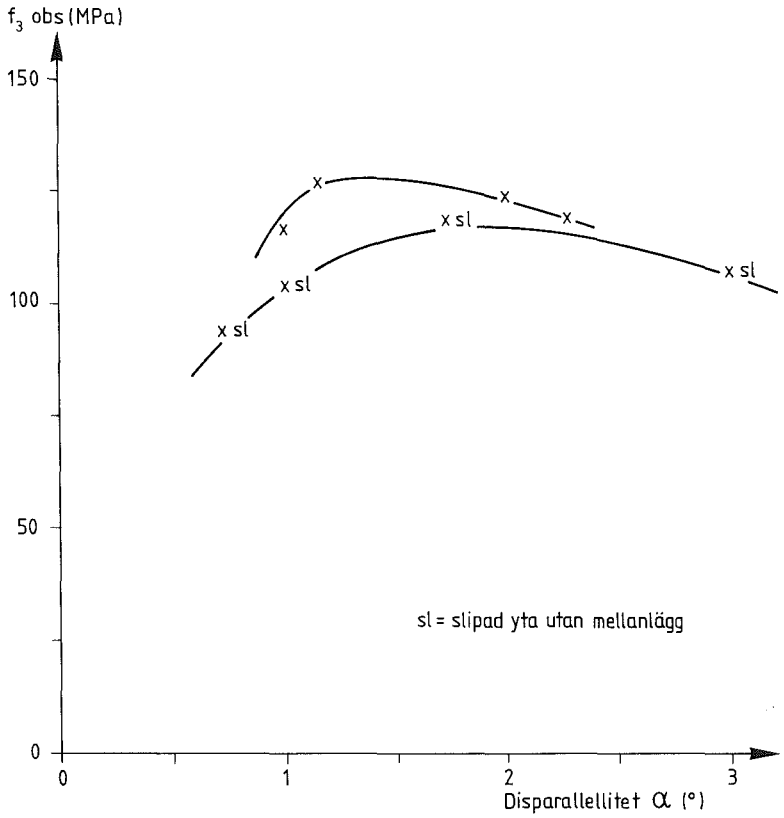
plana ytor. Spridningen hos värdena på tryckhållfasthet vid användning av mellanlägg var dessutom betydligt mindre än då provernas ändytor slipades.

Förförsöket visade att en kubhållfasthet vid 28 dygn av ca 140 MPa erhölls vid ett vct av ca 0.24. Som blandningar vid huvudförsöket valdes nr 2:1, 3:3, 4:2, 5:2, 6:1, 7:2, 8:1 och 9:1.



Figur 7.7 Hållfasthet hos förprover som funktion av vattenbindetalet. Utborrad cylinder anges med c

Figure 7.7 Strength as function of water-binder ratio; cube compressive strength (x), cube split strength (+)



Figur 7.8 Tryckhållfasthet hos utborrade cylindrar som funktion av ändytornas disparallellitet

Figure 7.8 Compressive strength of drilled out cores as function of non-parallelism of pressure plates

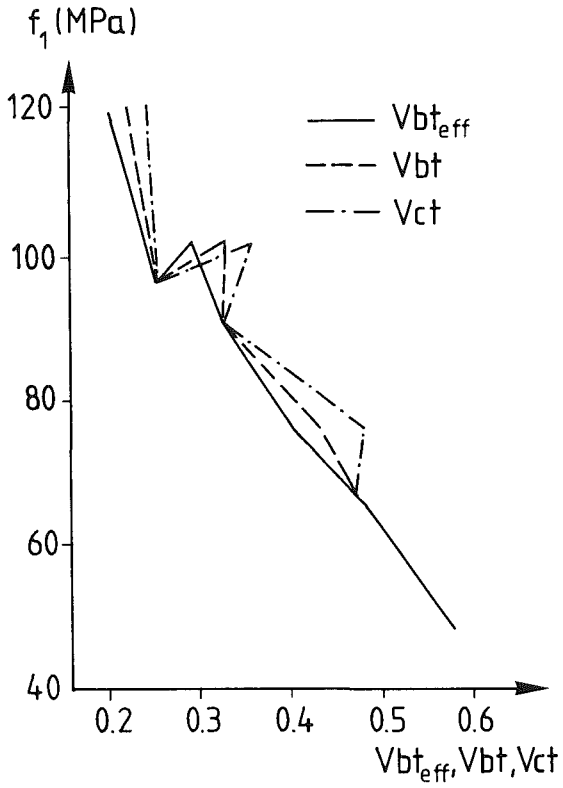
7.5 Huvudförsök; Betongskivor- Allmänt

7.5.1 Målsättning

Avsikten med huvudförsöket var att studera hållfasthetsutvecklingen hos betong av olika hållfasthetsnivå under olika lagringsbetingelser; nedsänkt i vatten (typ A), torkade i luft (typ B) eller membranhärdade (typ C). Alla mätningar gjordes på de stora betongskivor som beskrivs i avsnitt 5.4. Alla mätningar gjordes på utborrade kärnor. Parallellt med hållfasthetsmätningarna gjordes mätning av RF, förångningsbart vatten och hydratationsgrad; se kapitel 6 och 8. Samtidigt med gjutning av skivorna tillverkades också kuber för tryckprovning. Dessa resultat redovisas först (avsnitt 7.5.2) varefter resultat från utborrade prover redovisas i avsnitt 7.6-7.9.

7.5.2 Kubprovningar

Tillverkningen av provskivor och kuber har beskrivits i kapitel 5, där även siktkurvor, fuktinnehåll, glödgningsförluster m m redovisats. 3 st standardkuber 150 mm tillverkades ur varje blandad sats vilken var på 100-110 l dvs eftersom antalet skivor av varje betongtyp var 3 st blev antalet kuber av varje betong 9 st. Sex av kuberna förvarades i vatten fram till provning medan tre kuber luftförvarades från 28 dygns ålder (rumsfuktighet=40-60%). De använda betongrecepten visas översiktligt i tabell 5.2. Kubprovningen skedde vid 28 dygns ålder (3 st våta kuber) och vid 90 dygns ålder (3 st våta och 3 st torra kuber). Provningsresultaten listas i DATARAPPORT TVBM-7011; 7.3-7.5. I figur 7.9 visas (våta) kubhållfastheten vid 28 dygns ålder som funktion av vct samt av de bägge vattenbindemedelstalen, vbt och vbt_{eff}. Figuren visar att tryckhållfastheten är i stort sett omvänt proportionell mot vbt_{eff}. Som synes erfordras ett högsta vbt av ca 0.22 för att ge en (våt) kubhållfasthet vid 28 dygn av 120 MPa.

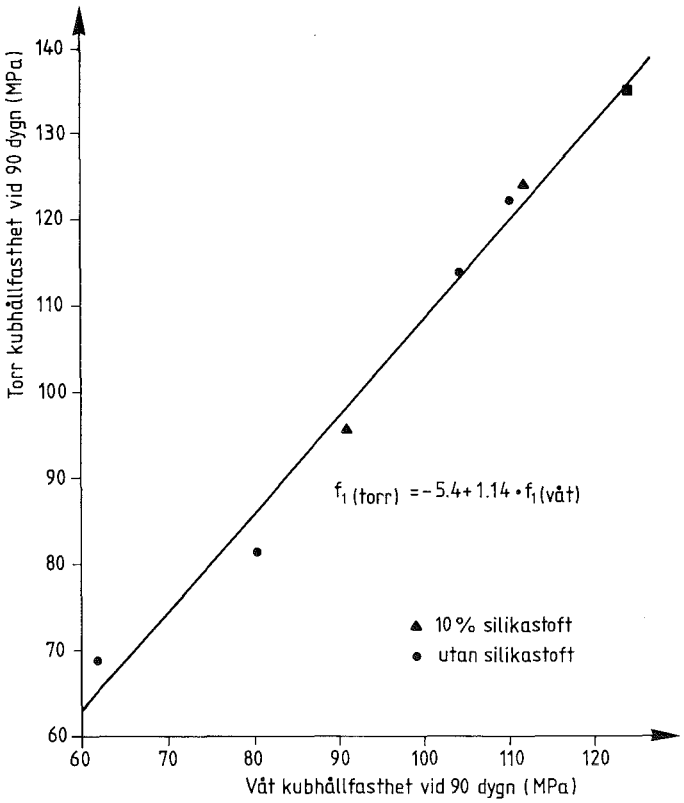


Figur 7.9 Kubhållfasthet som funktion av vct, vbt och vbt_{eff} vid 28 dygns ålder. (Varje markering= 3 st kuber)

Figure 7.9 Cube compressive strength, f_1, as function of water-cement ratio, water-binder ratio and effective water-binder ratio $\{w_0/(C+2\bullet S\}$ at an age of 28 days. (Each mark represents mean value of 3 cubes)

I figur 7.10 visas sambandet mellan tryckhållfasthet för våt och torr kub vid 90 dygns ålder. Ur figur 7.10 erhålls följande samband mellan kubhållfastheten för torr resp våt kub:

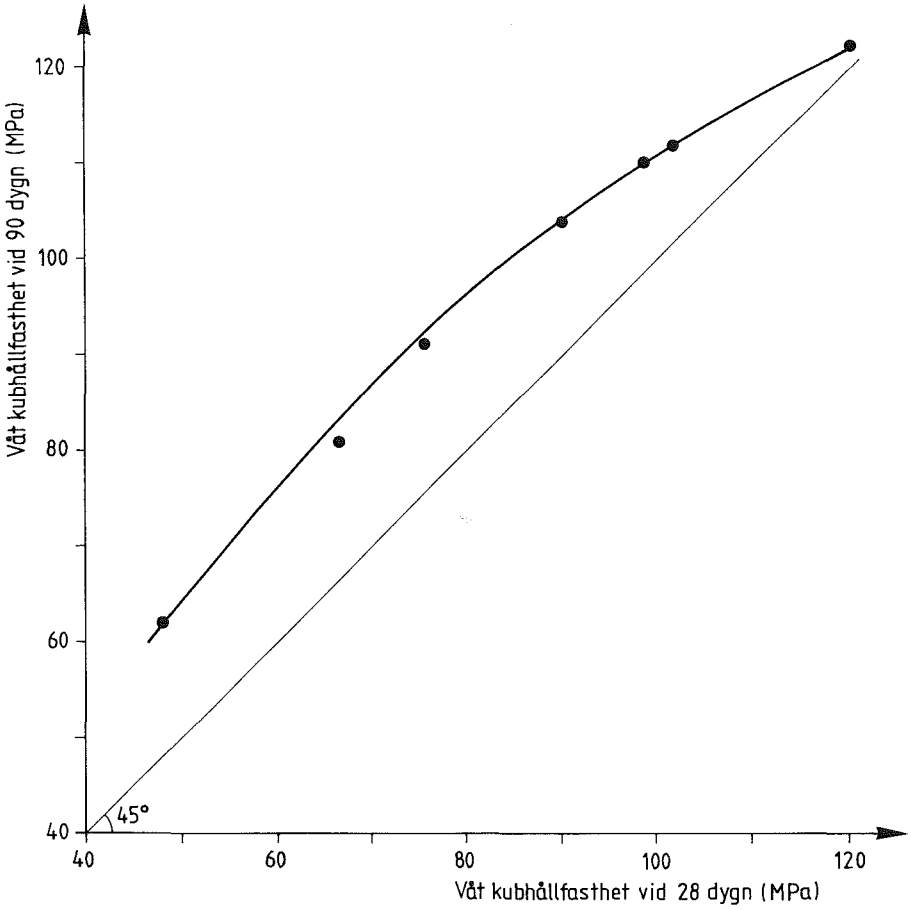
$$f_{1,torr}=-5.4+1.14\bullet f_{1,våt} \qquad (7.2)$$



Figur 7.10 Samband mellan tryckhållfasthet för våt resp torr kub vid 90 dygns ålder. (3 st kuber per markering).

Figure 7.10 Compressive strength for dry cube as function of strength of wet cube- age 90 days.

Av sambandet framgår att uttorkning, relativt sett, ökar hållfastheten något mer vid låga hållfastheter än vid höga. Detta beror med all säkerhet på att man vid låga vbt får en kraftig självuttorkning, vilket gör att även en våtlagrad kub i sitt inre blir rätt torr. Hållfasthetstillväxten hos kuberna mellan 28 dygn och 90 dygn framgår av figur 7.11. Som synes är hållfasthetstillväxten i genomsnitt ca 15%. De starka betongerna med lågt vbt tillväxer dock betydligt mindre än normala betonger.



Figur 7.11 Samband mellan 28 dygns och 90 dygns tryckhållfasthet hos våtlagrade kuber. (Varje markering= 3 st kuber)

Figure 7.11 Relation between 28-day and the 90-day compressive strength of wet cured cubes. (Each mark represents mean value of 3 cubes)

7.6 Huvudförsök med betongskivor- Allmänna hållfasthetsegenskaper och -relationer

7.6.1 Allmänt

Utseendet och tillverkningen av de 24 st betongskivorna- tre av varje betongtyp- beskrivs i avsnitt 5.4. Skivorna visas i figur 5.5. Översiktliga betongrecept visas i tabell 5.2. Recepten gäller samtliga tillverkade betongskivor. Skivorna förvarades i endera vatten, luft eller membranhärdades. De plana sidorna på skivorna var tätade med 2 mm epoxi. På den membranhärdade skivan var även kanten epoxiisolerad.

Vid 28, 90 och 450 dygns ålder borrades cylindrar ur skivorna för provning av tryck- och spräckhållfastheten enligt metoder som anges i avsnitt 7.3.3- 7.3.4. För vissa skivor gjordes även hållfasthetsmätningar vid 140 dygns ålder. Samtliga hållfasthetsresultat redovisas i tabellform i DATARAPPORT TVBM-7011, kapitel 7. Väsentliga data har även ritats upp nedan. I bilaga 1 nedan visas alla hållfasthetsdata som funktion av avståndet till skivans kant.

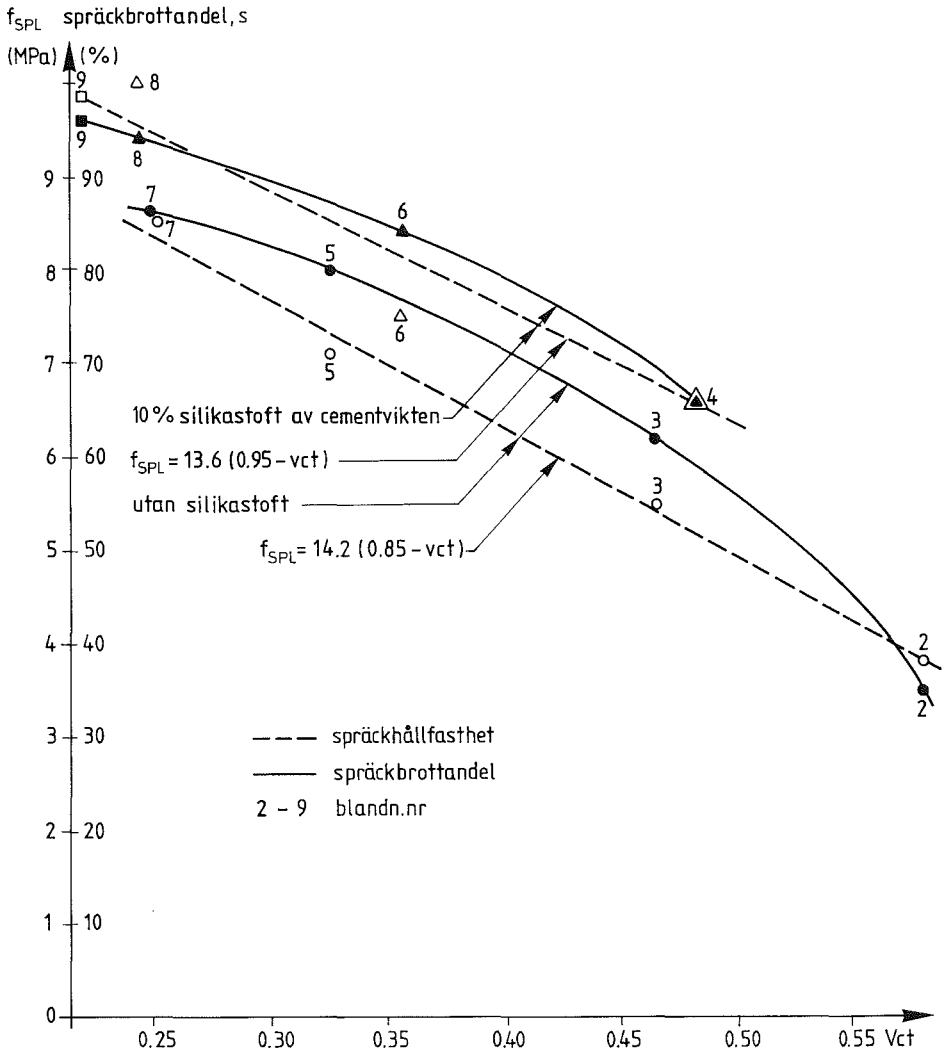
7.6.2 Spräckbrottandel och spräckhållfasthet

I figur 7.12 visas spräckhållfastheten resp spräckbrottandelen av ballastkorn större än 4 mm som funktion av vct, dels med 10% silikastoft av cementinnehållet, dels utan silikastoft. Betongåldern var 28 och 90 dygn.

Spräckbrottandel definieras:

$$s=Sb/(Sb+Vb) \qquad (7.3)$$

där Sb är antal spräckbrott och Vb är antal vidhäftningsbrott hos ballastkorn större än 4 mm.



Figur 7.12 Spräckhållfasthet och spräckbrottandel som funktion av vct

Figure 7.12 Split tensile strength, f_{spl}, (---) and rate of split failure of aggregate larger than 4 mm (——) as function of the water-cement ratio

I avsnitt 7.3.6 uttrycktes farhågor för att spräckbrottandelen ej skulle ha bedömts för en representativ yta. Totala antalet ballastkorn > 4 mm i brottytan har därför jämförts med makadaminnehållet varvid god överensstämmelse erhållits. Enligt figur 7.12 kan spräckhållfastheten då silikastoft används i betongen (10 % av cementhalten) beskrivas av uttrycket (MPa):

$$f_{spl}=13.6\bullet(0.95-vct) \qquad \text{för } 0.22<vct<0.48 \quad \text{----------(7.4)}$$

Då silikastoft ej ingår gäller (MPa):

$$f_{spl} = 14.2\bullet(0.85-vct) \qquad \text{för } 0.25<vct<0.58 \quad \text{----------(7.5)}$$

Sambandet mellan vct och spräckhållfasthet är således i stort sett lineärt. Av figur 7.12 framgår vidare att andelen spräckbrott är stor vid låga vct. Spräckbrottandelen multipliceras med faktorn tio överensstämmer mycket väl med spräckhållfastheten räknad i MPa, vare sig silikastoft användes eller ej. Det senare resultatet bekräftar betydelsen av god vidhäftning mellan ballast och pasta för att uppnå höga hållfastheter.

Man kan också jämföra draghållfastheten i form av spräckhållfastheten med vidhäftningsspänningen mellan stål och betong; se t ex Betonghandboken. Ovanstående resultat kan jämföras med resultat enligt **de Larrard (1990)**. Enligt föreliggande undersökning erhölls för vct=0.44 en spräckhållfasthet av 5.8 MPa. Vid vct=0.24 erhölls en spräckhållfasthet av 9.7 MPa dvs en ökning med ca 65% jämfört med vct=0.44. **de Larrard (1990)** redovisade att ökningen i vidhäftningsspänning vid motsvarande vct varierade mellan 30 och 80% beroende av stångdiameter. Överensstämmelsen med föreliggande undersökning är således god.

7.6.3 Tryckhållfasthet

I bilaga 1 i slutet av denna rapport visas tryckhållfastheten som funktion av den utborrade cylinderns avstånd till betongskivans kant. I figur 7.13 visas tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar som funktion av åldern hos betongen. Även kubhållfasthet har inritats. I figur 7.13 visas även, liksom i figur 6.7, RF-utveckling som funktion av åldern hos betongen. Till höger i figuren visas inverkan av en uttorkning vid 50°C resp en därpå följande återuppfuktning av provkroppen. Trots en mycket kraftig självuttorkning uppnås, enligt vad som framgår av figur 7.13 och bilaga 1, mycket höga värden på tryckhållfastheten.

I figur 7.14 visas tryckhållfastheten hos våta kuber som funktion av tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar med dess naturliga fuktnivå. Följande samband gäller:

$$f_{1,våt}=23.1+0.83\bullet f_3. \qquad \text{----------(7.6)}$$

Ur resultaten i figur 7.10 och figur 7.14 erhålls

$$f_{1,torr}=-5.4+1.14\bullet f_{1,våt}=21+0.95\bullet f_3 \qquad \text{----------(7.7)}$$

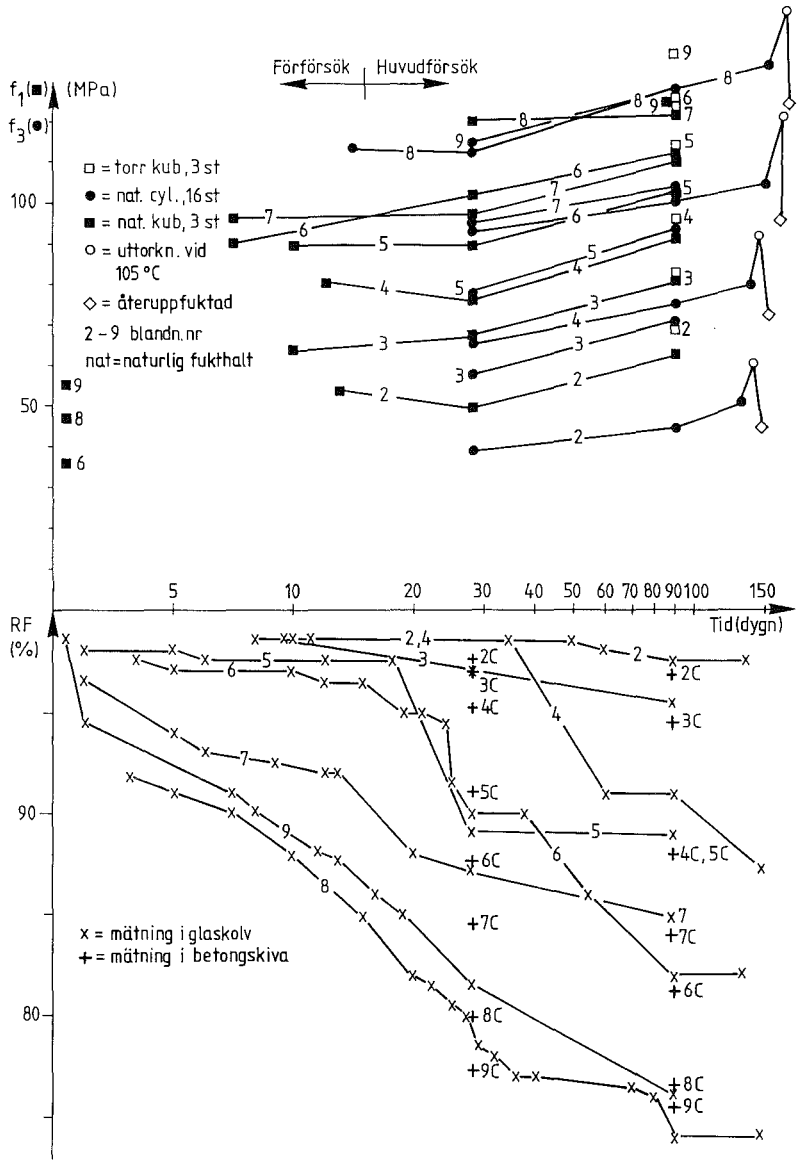
dvs

$$f_3=1.05\bullet f_{1,torr}-22 \qquad \text{----------(7.8)}$$

där $f_{1,torr}$ är tryckhållfasthet för torr kub, $f_{1,våt}$ tryckhållfasthet för våtlagrad kub samt f_3 tryckhållfasthet för utborrad cylinder med naturlig fuktnivå.

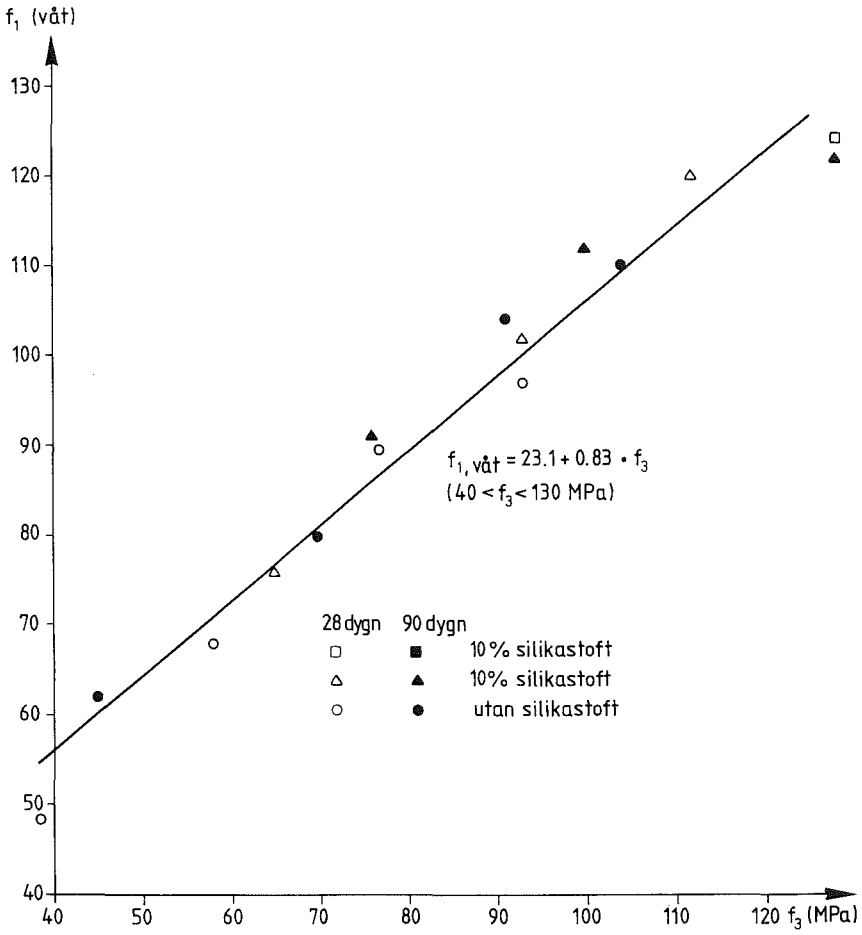
I figur 7.15 visas spräckhållfasthet hos utborrade cylindrar som funktion av tryckhållfasthet hos cylindrar i samma fukttillstånd. Följande samband gäller:

$$f_{spl}=1.22+0.074\bullet f_3=0.078\bullet f_{1,torr}-0.4. \qquad \text{----------(7.9)}$$



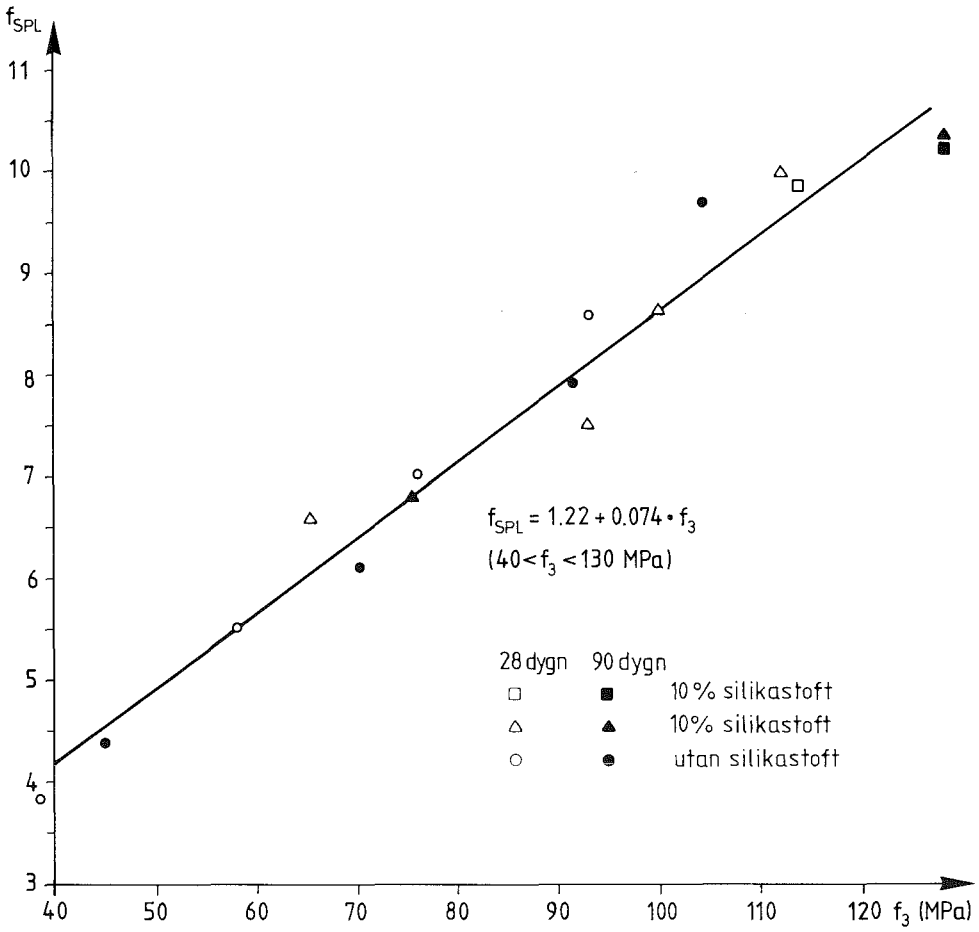
Figur 7.13 Tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar och kuber samt RF som funktion av ålder. Undre del enl fig 6.7

Figure 7.13 Compressive strength for cylinder, f_3, and cube, f_1, and relative humidity, RF, as function of time



Figur 7.14 Tryckhållfasthet hos en våtlagrad kub, $f_{1,våt}$, som funktion av tryckhållfastheten hos en utborrad cylinder med naturlig fuktnivå, f_3. (Varje markering representerar 3 st kuber och 18 st cylindrar)

Figure 7.14 Compressive strength of a water cured cube, $f_{1,våt}$, as function of compressive strength of the drilled out cylinder in natural moisture conditions, f_3. (Each mark represents 3 cubes and 18 cylinders)



Figur 7.15 Spräckhållfasthet hos en utborrad cylinder som funktion av tryckhållfastheten hos en utborrad cylinder. (Varje markering representerar medelvärdet av mätningar på 27 st cylindrar)

Figure 7.15 Split tensile strength of drilled cores, f_{spl}, as function of compressive strength for drilled cores, f_3, both in the same natural moisture condition. (Each mark represents 27 cylinders.)

I figur 7.16 visas sambandet mellan vct och tryckhållfasthet för samtliga cylindrar oberoende av var provet är uttaget eller av hur skivans kant exponerats. I figur 7.17 visas sambandet mellan vct och tryckhållfasthet hos betongskivor som självtorkat (typ C). Av figurerna 7.16 och 7.17 framgår att lineära samband råder mellan vct och tryckhållfastheten oavsett om man betraktar hela materialet eller enbart självuttorkade cylindrar. För betong med silikastoft (10 % av cementvikten) och 90 dygns ålder gäller:

$$f_3 = 212 \cdot (0.835 - vct) \qquad (7.10)$$

För betong utan silikastoft gäller:

$$f_3 = 178 \cdot (0.843 - vct) \qquad (7.11)$$

där f_3 är tryckhållfastheten hos utborrad cylinder i naturligt fukttillstånd (fuktnivåer framgår av kapitel 6). Resultaten kan omräknas till kubhållfasthet med hjälp av sambanden (7.7) och (7.8). Vid 10 % silikastoft erhålls för kubhållfastheten:

$$f_{1,torr} = 202 \cdot (0.94 - vct) \qquad (7.12)$$

För betong utan tillsats av silikastoft gäller:

$$f_{1,torr} = 170 \cdot (0.97 - vct) \qquad (7.13)$$

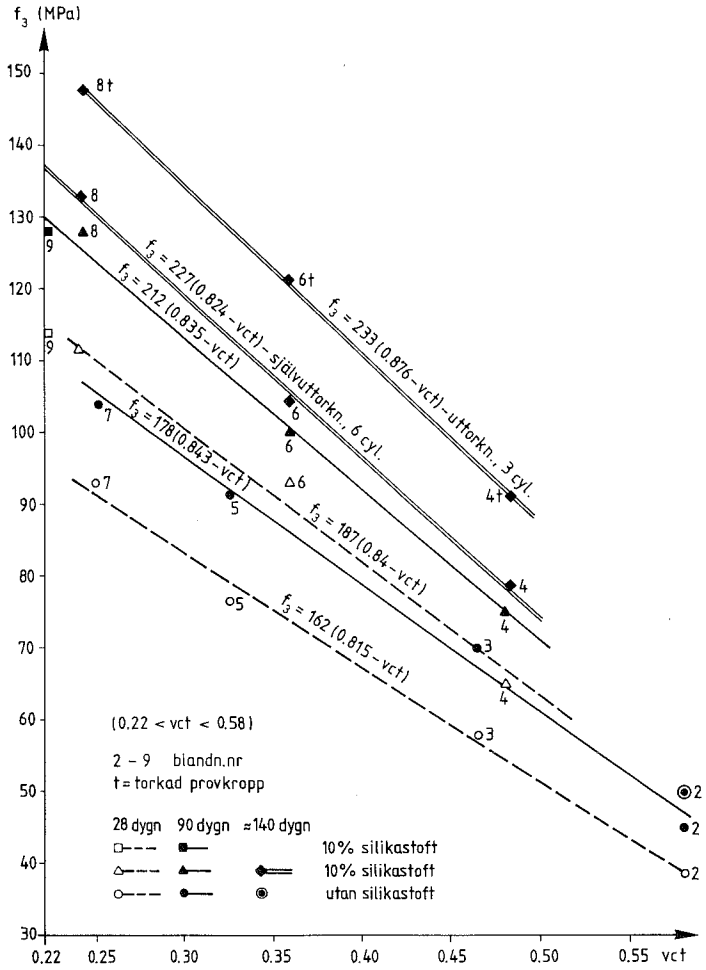
där $f_{1,torr}$ är tryckhållfastheten hos en kub som lagrats i vatten under 28 dygn och därefter i luft fram till 90 dygns ålder.

Vid tillsats av 10 % silikastoft erhålls för kubhållfastheten:

$$f_{1,våt} = 177 \cdot (0.97 - vct) \qquad (7.14)$$

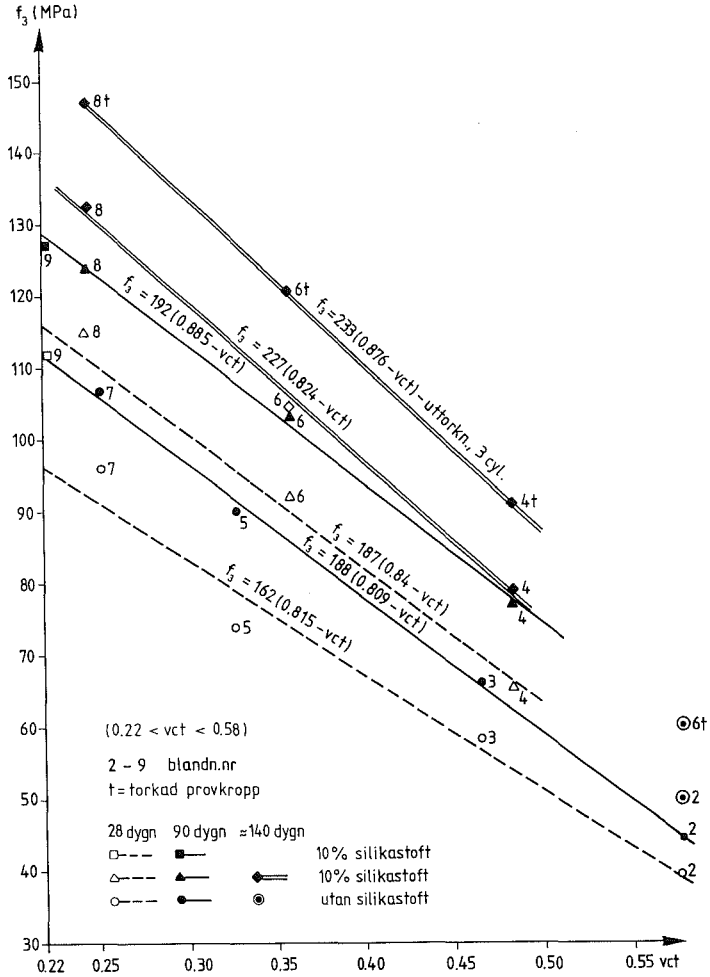
För betong utan silikastoft gäller

$$f_{1,våt} = 148 \cdot (1.00 - vct) \qquad (7.15)$$



Figur 7.16 Samband mellan vct och tryckhållfasthet hos utborrade cylindrar oberoende av var provet är taget eller hur skivans kant exponerats. (Varje markering representerar 18 st cylindrar där ej annat anges)

Figure 7.16 Compressive strength of drilled cores as function of vct disregarding position in the disc or exposure of the rim. (Each mark represents 18 cylinders if not otherwhise stated.)



Figur 7.17 Samband mellan vct och tryckhållfasthet hos utborrade cylindrar vid självuttorkning oberoende av var provet är taget. (Varje markering representerar 6 st cylindrar där ej annat anges)

Figure 7.17 Compressive strength of drilled cores as function of water-cement ratio at self-desiccation disregarding position in the disc. (Each mark represents 6 cylinders if not otherwhise stated.)

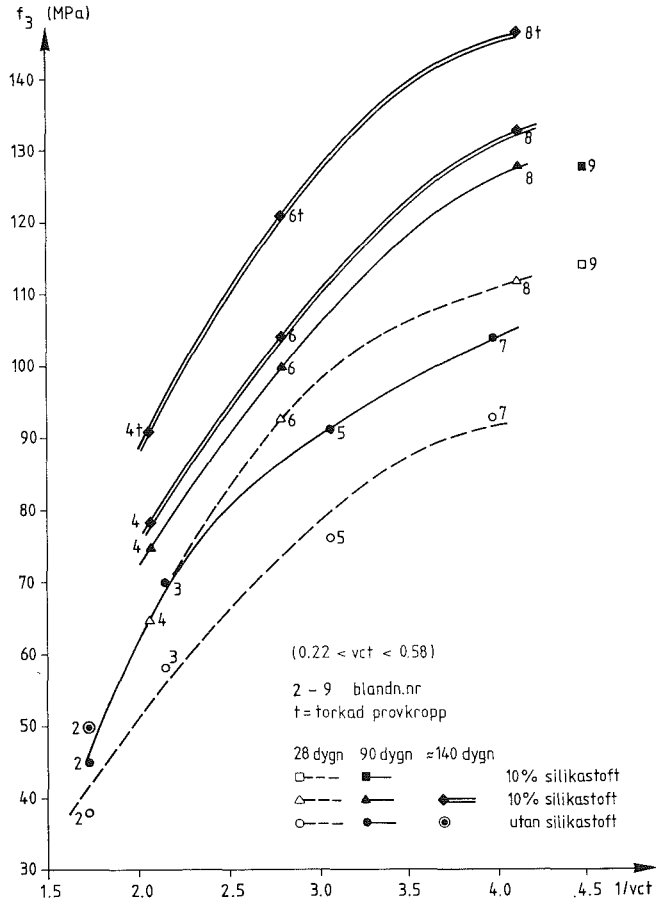
Vidare kan det av sambanden (7.10) och (7.11) konstateras att 10% tillsats av silikastoft räknat på cementinnehållet, höjer tryckhållfastheten med ca 20%.

De lineära sambanden mellan tryckhållfasthet och vct överensstämmer väl med **Helland (1987)** och **Howard, Leatham (1989)**. Däremot avviker de markant från de samband som gäller för normal betong nämligen Abram's formel eller Bolomey's formel. Bolomey's formel, som gäller för betong med samma ålder och härdningssätt, t ex normkuber, förutsäger en direkt proportionalitet mellan hållfasthet och parametern 1/vct. Föreliggande undersökning ger dock kraftigt krökta samband; se figur 7.18. Det är framförallt betong med låga vct som avviker. Orsaken är troligen att ballasthållfastheten börjar bli avgörande för betongens hållfasthet när vct är mycket lågt. Man når därför så småningom ett "tak" för hållfastheten. Taket är olika högt beroende av olika ballast och bindemedelstyp.

Som nämnts i avsnitt 7.3.3 genomfördes vissa jämförande tryckprovningar vid CEMLAB i Slite där tryckytan på cylindrarna kunde slipas på ett fullgott sätt före provningen varför denna utfördes utan mellanlägg. Resultatet av denna jämförande provning visas i tabell 7.3. Som synes medför användning av mellanlägg att hållfastheten sjunker mellan 6 och 12 %. Minskningen blir mindre ju högre hållfasthet betongen har. I tabell 7.3 ges ett sammandrag av tryckprovningarna vid CEMLAB i Slite resp LTH.

Tabell 7.3 Resultat av jämförande tryckprovningar vid CEMLAB, Slite och LTH vid 140 dygns betongålder

Blandning no	2C	4C	6C	8C
Tryckhållfasthet, CEMLAB (MPa)	56.7	84.1	110	142
Tryckhållfasthet, LTH (MPa)	50.0	78.6	104	133
Minskning i tryckhållfasthet vid användande av mellanlägg (%)	11.8	6.5	5.5	6.3



Figur 7.18 Test av Bolomey's formel: samband mellan parametern 1/vct och tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar. (Varje markering representerar 18 st cylindrar utom vid 140 dygn där endast 6 st cylindrar ingår)

Figure 7.18 Test of Bolomey's formula: compressive strength of drilled cylinders as function of 1/vct. (Each mark represents 18 cylinders except for 140 days of age= double lines, where one mark equals 6 cylinders.)

7.7 Huvudförsök; Betongskivor- tryckhållfasthetens beroende av härdningsförhållanden och avstånd till exponerad kant

7.7.1 Inverkan av provets RF och av gjuttekniken

Allmänt:

Som omnämndes ovan (i avsnitt 5.4) belades skivornas plana sidor med 2 mm epoxi medan kanten härdades i endera vatten (A), i luft (B) eller genom förhindrad uttorkning och uppfuktning s k membranhärdning (C). Eftersom provcylindrar togs ut på varierande avstånd från den exponerade kanten kan tryckhållfasthetens beroende av härdningsförhållanden och avstånd till exponerad kant fastställas. Först diskuteras dock inverkan på hållfasthetsresultatet av provkroppens RF och av gjuttekniken, dvs skillnader i komprimeringsgrad på olika avstånd från skivans kant. Dessa båda effekter måste särskiljas från de resultat som efterfrågas.

Inverkan av provets RF:

I bilaga 2 nedan har sambandet mellan provets RF och dess hållfasthet ritats upp. Inom de snäva RF-områden som vi arbetat, kan en viss inverkan av RF på tryckhållfastheten endast konstateras för blandning 6 (28 dygn) och blandning 9 (28 och 90 dygn).

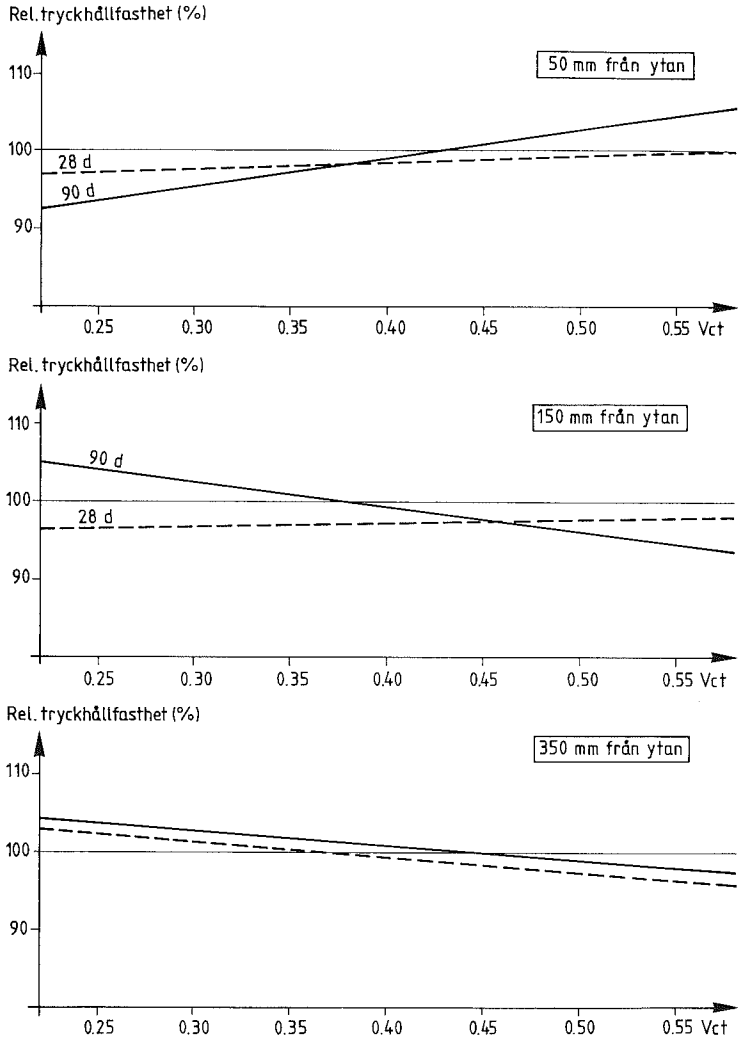
Inverkan av gjuttekniken:

En uppfattning av gjutteknikens inverkan på tryckhållfastheten vid olika vct får man genom att, för skivor som självuttorkat (typ C), studera relativa hållfastheten på prover som uttagits på olika avstånd från exponerad kant på betongskivan, se bilaga 3.1 nedan. Närmast kanten får man uppenbarligen en något sämre betong hos betonger med högre vct. För betong med låga vct kan ingen randeffekt konstateras. Detta kan bero på att betong med högre vct har större tendens att separera. Betongen tömdes i mitten av formen varför viss separation kunde uppträda.

7.7.2 Resultat

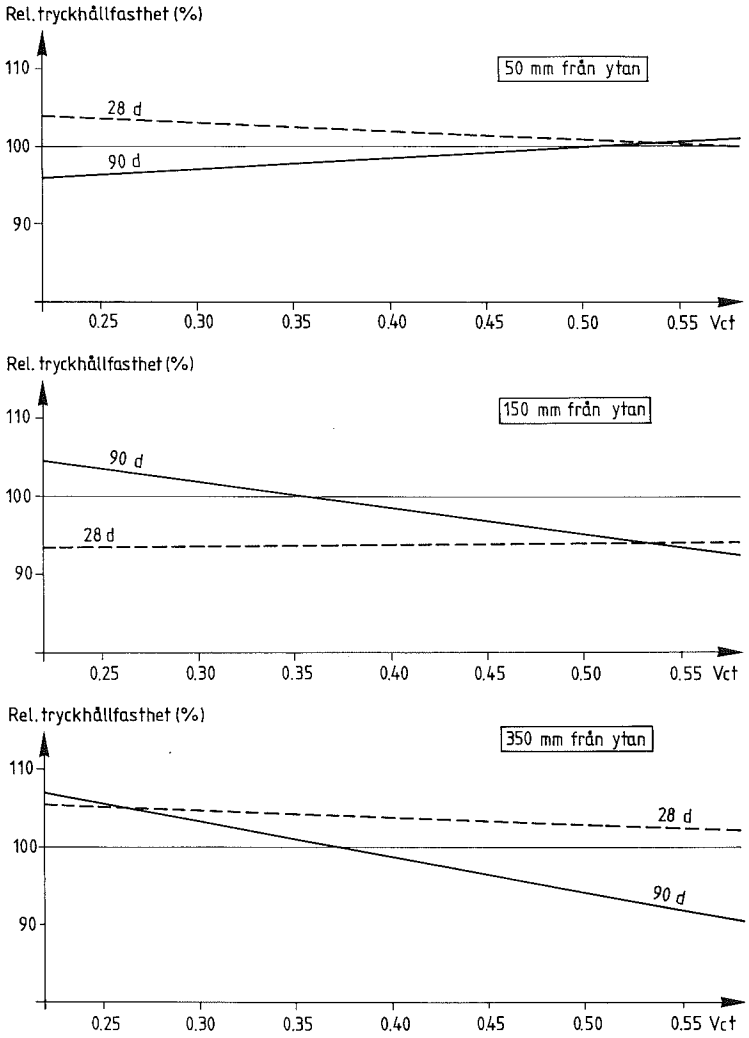
I bilaga 3 i slutet av denna rapport visas relativa hållfastheten som funktion av vct vid olika avstånd till den exponerade kanten på betongskivan. Kanten exponerades endera för vatten eller luft. I figur 7.19-20 visas en sammanlagring av såväl gjutteknikens som ytexponeringens inverkan på relativa hållfastheten. I figuren betecknas tryckhållfasthet med f_3 medan medeltryckhållfastheten inom resp skiva betecknas med f_{3m}.

I figur 7.19 visas korrigerad relativ hållfasthet som funktion av vct då kanten exponeras för vatten (lagring A). I figur 7.20 visas korrigerad relativ hållfasthet som funktion av vct då kanten exponeras för luft (lagring B). Figurerna ger en indikation på att betong med låga vct får ökad tryckhållfasthet med ökande avstånd från den exponerade kanten både i vatten och luft. Motsatt förhållande gäller för betong med höga vct. Man bör också ha i åtanke att relativa hållfastheten för blandning 6 och 9 dvs för låga vct (vid vattenexponering) bör höjas något nära kanten p g a inverkan av RF jfr bilaga 2 nedan. Detta förstärker ytterligare tendensen för betonger med låga vct till ökad relativ hållfasthet med avståndet till exponerad kant.



Figur 7.19 Korrigerad relativ hållfasthet på olika avstånd från kanten som funktion av vct då kanten exponeras för vatten (lagring A)

Figure 7.19 Adjusted relative strength at different distances from exposed rim as function of the water-cement ratio (rim submerged)



Figur 7.20 Korrigerad relativ hållfasthet på olika avstånd från kanten som funktion av vct. Kanten exponerad för luft (lagring B)

Figure 7.20 Adjusted relative strength at different distance from exposed rim placed in air, as function of water-cement ratio

7.7.3 Slutsatser

50 mm från kanten:

Vid vattenlagring (A) för betong med låga vct ca 7% lägre hållfasthet och betong med högre vct (0.58) ca 5% högre hållfasthet.

Vid luftlagring (B) för betong med mycket låga vct (0.22) ca 4% lägre hållfasthet medan betong med högre vct har samma hållfasthet som längre in i provkroppen.

350 mm från kanten:

Vid vattenlagring för betong med mycket låga vct (ca 0.22) ca 7% högre hållfasthet och betong med högre vct (0.58) ca 9% lägre hållfasthet.

Kommentar:

De relativa förändringarna i hållfasthet är alltså små och kan ligga inom felmarginalen. Mest intressant är dock att notera att betong med låga vct synes bli starkare, relativt sett, längre in i en konstruktion, oberoende av ytexponering. Detta är ett oväntat resultat, eftersom man på basis av studier av normal betong ansett att fri vattentillgång skulle vara en grundläggande förutsättning för hög hållfasthet hos betong.

Detta understryker resultaten från kapitel 6, dvs att högpresterande betong "lever sitt eget liv" oberoende av omgivningen, både vad gäller fukttillstånd och hållfasthet.

7.8 Huvudförsök; Betongskivor- tryckhållfasthetens beroende av uttorkning samt av uttorkning och uppfuktning

7.8.1 Försöksmetodik

Allmänt:

Inverkan på tryckhållfastheten av en kraftig uttorkning och av sådan uttorkning följd av en återuppfuktning har studerats på provcylindrar som borrats ur betongskivorna. Endast membranhärdade betongskivor (typ C) har studerats. Med avsteg från provningsmetoden som anges i avsnitt 7.3 har endast en cylinder provats för varje avstånd 50, 150 och 350 mm till kanten; en i uttorkat tillstånd och en i återuppfuktat tillstånd.

Uttorkning:

Totalt torkades 24 st cylindrar med diameter 40mm och med längd 80mm, under 1 månad. Torkningen utfördes med hjälp av blågel, som ger en relativ fuktighet på någon procent, samt vid en något förhöjd temperatur, 50°C. Vid starten för uttorkningen hade betongen en ålder av 135-150 dygn. Mängden uttorkad fukt bestämdes medelst vägning före och efter uttorkningen varvid avsvalning till rumstemperatur först utfördes i exsickator. Efter uttorkningen i 50°C provades tryckhållfastheten på halva antalet cylindrar. Uttorkning av fragment från dessa provningar utfördes sedan vid 105°C under 1 månads tid. Fragmenten glödgades därefter i 1050°C för kontroll av hydratvatten. Vid uträkning av hydratvatten tillämpades rutinerna som tidigare beskrivits i avsnitt 3.4.2.

Uppfuktning:

Resterande av de under 1 månads tid uttorkade cylindrarna återuppfuktades medelst nedsänkning i vatten under 1 månads tid vid

20°C. Vägning utfördes före varje ändring av fukttillstånd. Efter provning av tryckhållfastheten hos de återuppfuktade proverna vägdes de uppkomna fragmenten. Uttorkning av dessa utfördes därefter vid 105°C samt glödgning i 1050°C för kontroll av hydratvatten.

7.8.2 Resultat

Allmänt:

Samtliga mätdata återfinns i DATARAPPORT TVBM-7011; 7.25.

Fuktförhållanden:

Andelen uttorkad fukt relativt allt förångningsbart vatten som funktion av vct visas i figur 7.21. Vid låga vct uttorkas endast ca 70% av återstående fukt på 1 mån. Vid högre vct avgår däremot nästan all fukt. Provkropparna tar sedan i genomsnitt upp ca 6% à 12% mer fukt jämfört med vad de ursprungligen innehöll då torkningen påbörjades. Prover med höga vct resp låga vct tog upp mindre vatten än prover med mellanliggande vct.

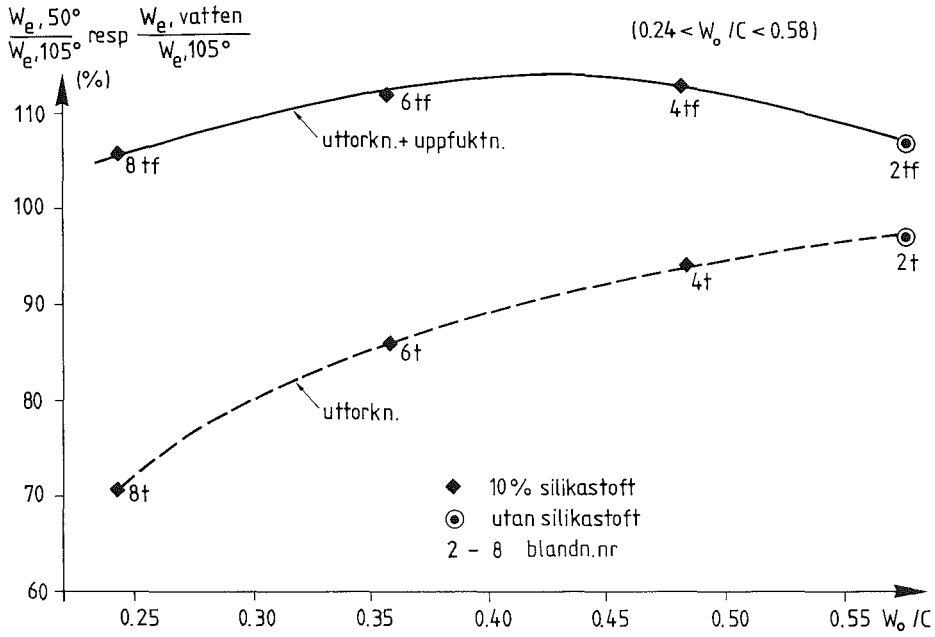
Hydratvatten:

Förändringar i kemiskt bundet vatten som funktion av vct visas i figur 7.22. Man kan spåra en smärre ökning av hydratationen hos betong med låga vct när provet torkats. Denna ökning kvarstår vid låga vct även då provet återuppfuktats.

Tryckhållfasthet:

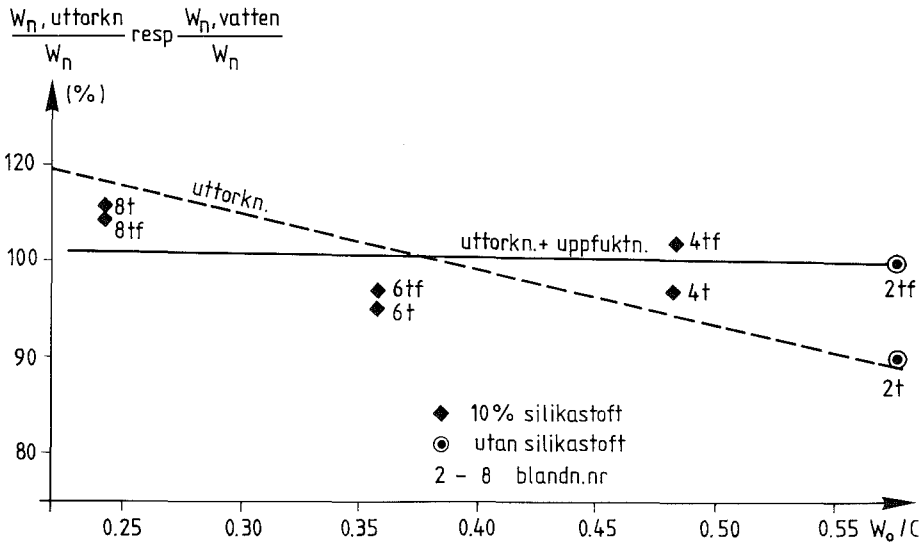
Hållfastheten relaterad till hållfastheten hos självuttorkade prover visas i figur 7.23. Som synes medför uttorkningen ökningar i hållfastheten på mellan 11 och 21 % p g a uttorkning jämfört med de värden som gäller för självuttorkat tillstånd. Den genomsnittliga ökningen (p g a uttorkning) är ca 16 %. Efter

återuppfuktning sker en viss hållfasthetsnedgång. Denna uppgår till 9% jämfört med de värden som gäller för självuttorkat tillstånd. Uttorkningen skapar tydligen vissa skador som sedan inte läker vid återuppfuktningen. Någon effekt av vct kan dock inte noteras, dvs högpresterande betong drabbas procentuellt inte av mer skador än normal betong.



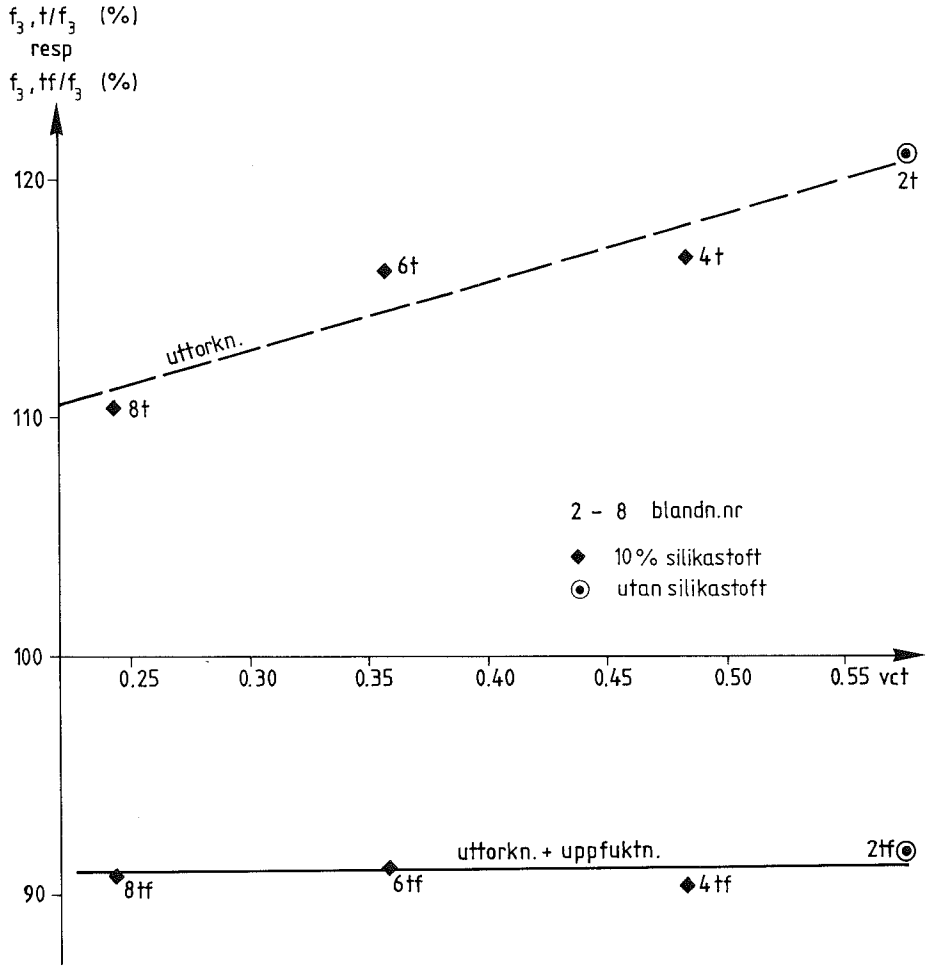
Figur 7.21 Andel uttorkad fukt över blågel under 1 mån vid 50°C samt andel vattenupptagning vid återuppfuktning i vatten under 1 mån, bägge som funktion av vct

Figure 7.21 Fraction of evaporated moisture after drying over silica gel for 1 month and fraction of absorbed water after resaturation for 1 month as function of water-cement ratio



Figur 7.22 Ändringar i mängden hydratvatten efter uttorkning samt efter återuppfuktning som funktion av vct

Figure 7.22 Alteration of nonevaporable water after drying and after resaturation as function of water-cement ratio



Figur 7.23 Tryckhållfastheten hos en uttorkad resp återuppfuktad provkropp relativt hållfastheten vid självuttorkat tillstånd som funktion av vct

Figure 7.23 Compressive strength of dried or resaturated concrete in relation to strength at self-desiccated conditions as function of water-cement ratio

7.8.3 Kommentarer

1 månads uttorkning höjer tryckhållfastheten med ca 10 % vid låga vct och med ca 20 % vid vct=0.58 jämfört med värdet för självuttorkat tillstånd. Trots uttorkning under en månads tid var det, vid låga vct, ej möjligt att torka ut allt fysikaliskt bundet vatten.

Om den uttorkade cylindern efter uttorkning vattenförvaras under 1 månad sjunker hållfastheten ca 10% jämfört med ursprungliga värdet för självuttorkat tillstånd.

Som även framgått av kapitel 6 lever högpresterande betong från fuktsynpunkt i hög grad "sitt eget liv" oberoende av om förvaring sker i vatten eller luft, åtminstone inom de tidsrymder som varit aktuella för hållfasthetsprovningar vid vårt försök (i huvudsak 28 och 90 dygn). I vårt försök har vi därför valt att utföra merparten av hållfasthetsprovningarna vid för betongen aktuellt fukttillstånd. Detta innebär i allmänhet självuttorkat tillstånd. Det skulle tagit alltför lång tid att ändra fuktigheten jämnt i hela provkroppen på spänningsfritt sätt. Provningen skulle då kommit att utföras på betydligt äldre betong än avsett.

Det är möjligt att man vid högpresterande betong får definiera hållfastheten som den som erhålls i självuttorkat tillstånd, eftersom det är förenat med stora svårigheter att få betongen att följa omgivningens fuktighet åtminstone vid en ålder av mindre än ett halvt år.

7.9 Huvudförsök; Betongskivor- Långtidsuppföljning av hållfastheten

7.9.1 Allmänt

En uppföljning av hållfasthetsutvecklingen i betongskivorna ägde rum vid ca 450 dygns ålder. Provkropparna hade förvarats under samma betingelser som tidigare dvs 8 st med den exponerade kanten i vatten (A), 8 st med kanten i luft (B) samt 8 st membranhärdade. Tryckhållfastheten resp spräckhållfastheten bestämdes för 2 resp 1 st utborrad cylinder per kantavstånd. Materialet från provningarna av tryckhållfastheten uppsamlades därefter för bestämning av fuktkvot och kemiskt bundet vatten. De i avsnitt 7.3 beskrivna provningsmetoderna tillämpades.

7.9.2 Mätresultat

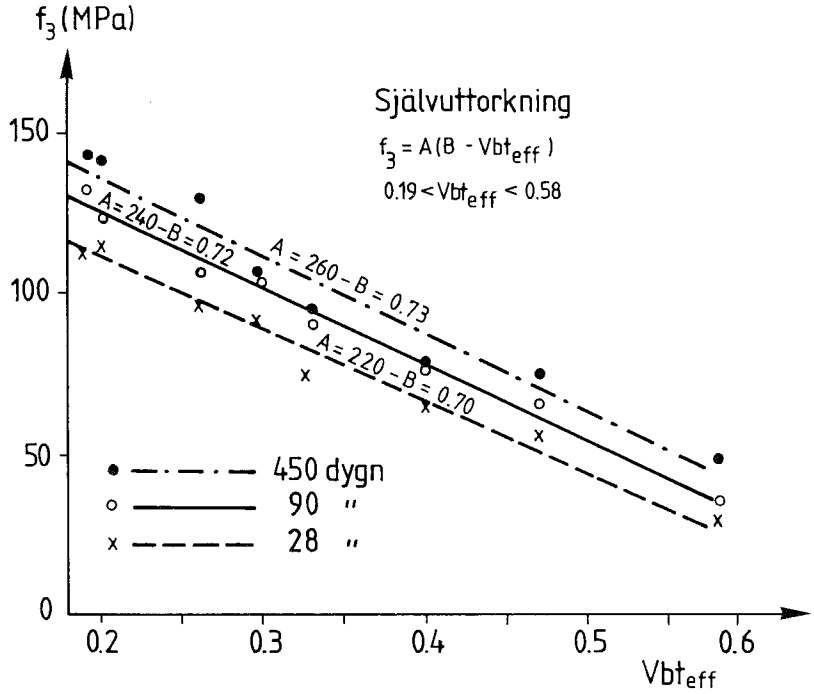
Tryck- och spräckhållfasthet:

Samtliga rådata på tryckhållfasthet och spräckhållfasthet redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 7.28-7.36.

I figur 7.24 visas tryckhållfastheten hos självuttorkad betong som funktion av vbt_{eff} vid 28, 90 och 450 dygns ålder. Varje markering motsvarar medelvärdet av 6 st mätningar. Sambanden mellan tryckhållfasthet och vbt_{eff} är i stort sett lineära.

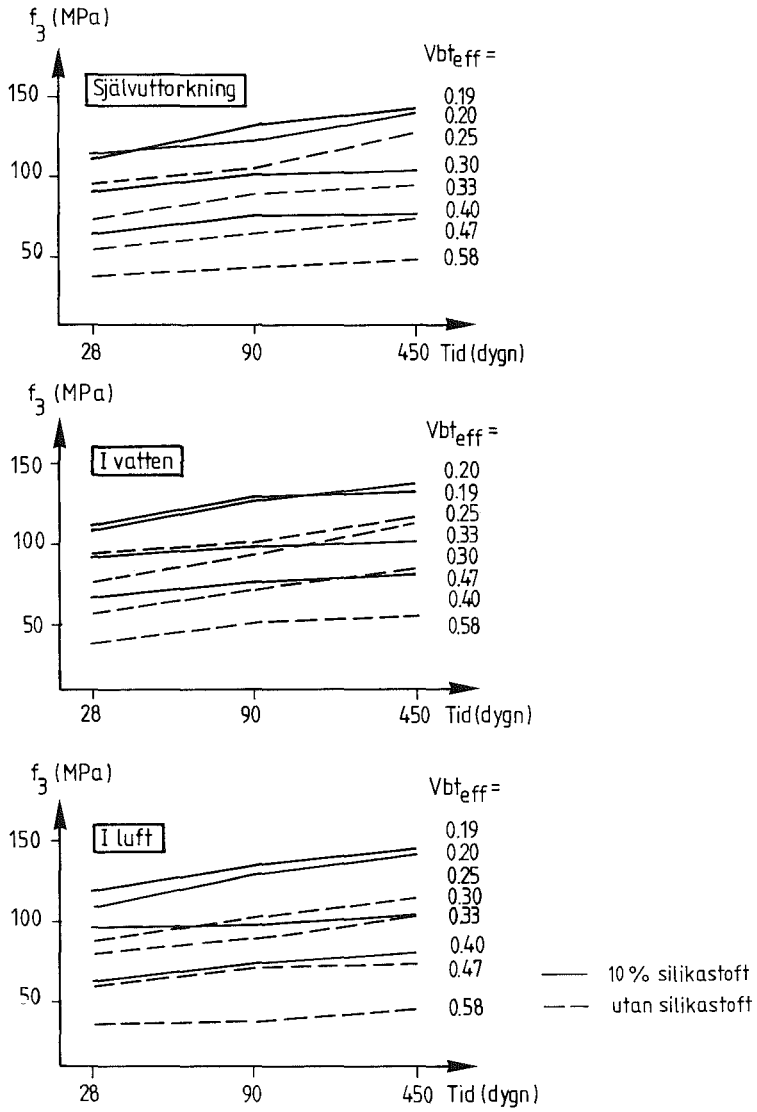
I figur 7.25 visas tryckhållfastheten som funktion av tiden vid olika exponering av skivans kant, dels tät yta (C), dels yta i vatten (A), dels yta i luft (B). Vbt_{eff} anges till höger i figuren. Vid åldern 28, 90 och 450 dygn och vid varje angivet vbt_{eff} markeras medelvärdet av 6 st mätningar.

I figur 7.26 visas spräckhållfastheten vid 28, 90 och 450 dygns ålder som funktion av tryckhållfastheten. Varje markering motsvarar medelvärdet av 27 st mätningar.



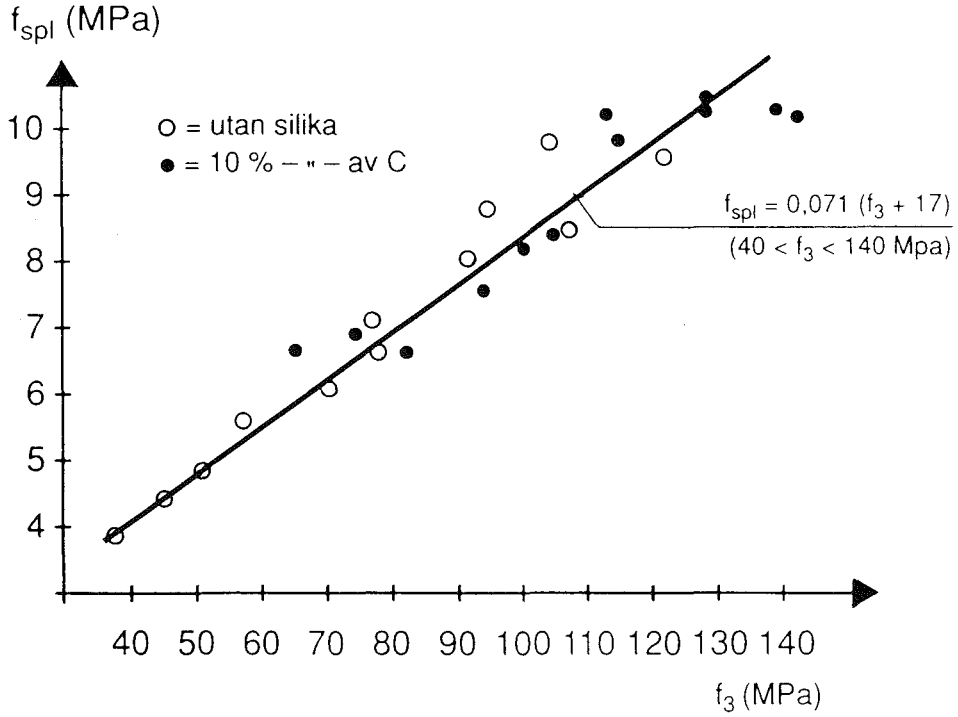
Figur 7.24 Tryckhållfastheten, f_3, hos självuttorkad betong vid 28, 90 och 450 dygn som funktion av vbt_{eff}. (Varje markering motsvarar medelvärdet av 6 st mätningar)

Figur 7.24 Compressive strength of concrete, f_3, at self-desiccation at 28, 90 and 450 days of age as function of effective water-cement ratio, vbt_{eff}. (Each mark equals mediumvalue of 6 measurements.)



Figur 7.25 Tryckhållfastheten, f_3, som funktion av tiden vid olika exponering av kanten på betongskivan.

Figure 7.25 Compressive strength, f_3, as function of time (days) with different rimexposures.

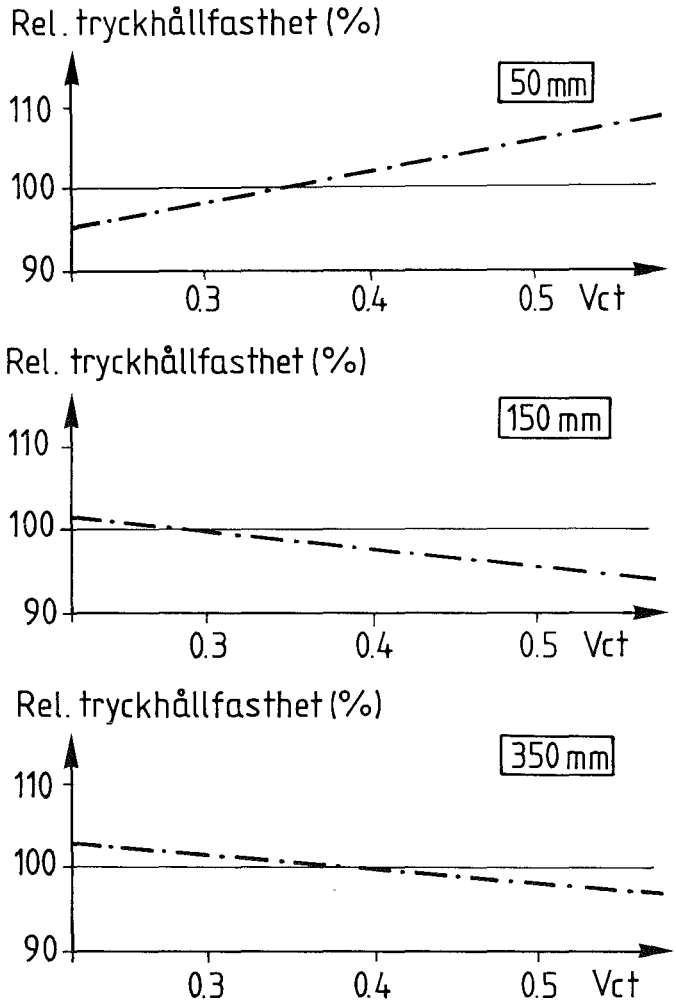


Figur 7.26 Spräckhållfastheten, f_{spl}, vid 28, 90 och 450 dygns ålder som funktion av tryckhållfasthet, f_3. Varje markering motsvarar medelvärdet av 27 st mätningar.

Figur 7.26 Split (tensile) strength, f_{spl}, at 28, 90 and 450 days of age as function of compressive strength, f_3. (Each mark equals 27 measurements.)

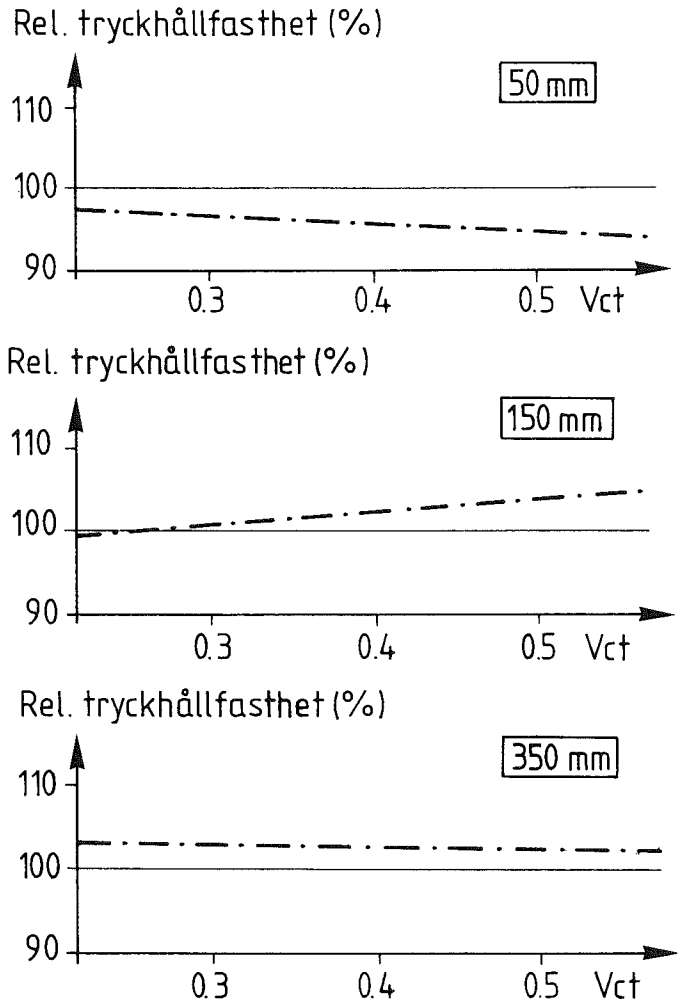
I bilaga 3.5 nedan visas hållfastheten hos självuttorkade betongskivor på olika avstånd från kanten. Avvikelserna i hållfasthet kan bero på olika komprimeringsgrad i olika delar av plattan och återspeglar därför en effekt av gjuttekniken; jfr avsnitt 7.7.1 ovan.

I bilaga 3.6-3.7 visas relativa tryckhållfastheten som funktion av vct vid kanten i vatten resp i luft. Relativa tryckhållfastheten har därvid redovisats för kantavstånden 50, 150 och 350 mm. I figur 7.27 resp i figur 7.28 visas de (med avseende på gjuttekniken) korrigerade relativa tryckhållfastheterna som funktion av vct, dels vid den exponerade kanten i vatten, dels vid kanten i luft.



Figur 7.27 Korrigerad relativ tryckhållfasthet som funktion vct. Skivans kant i vatten.

Figure 7.27 Adjusted relative compressive strength indicated for distances of 50, 150 och 350 mm to rim as function of water-cement ratio. Rim submerged.



Figur 7.28 Korrigerad relativ tryckhållfasthet som funktion vct. Skivans kant i luft.

Figure 7.28 Adjusted relative compressive strength indicated for distances of 50, 150 och 350 mm to rim as function of water-cement ratio when rim kept in air

7.9.3 Slutsatser

Tryckhållfasthet

Följande slutsatser efter långtidsuppföljningen kan dras:

1) Figur 7.24 bekräftar huvudförsökets lineära samband mellan vbt_{eff} och tryckhållfasthet. Som generellt uttryck för tryckhållfastheten, f_3, erhålles vid självuttorkning

$$f_3=A\bullet(B-vbt_{eff}) \quad \text{för } 0.18< vbt_{eff}< 0.58 \quad \text{----------(7.16)}$$

där vbt_{eff} definieras enligt ekv. (6.1). Värdena A och B ges i tabell 7.4

Tabell 7.4 Värden på A och B i ekv. (7.16) vid olika ålder

Ålder (dygn)	A (MPa)	B
28	220	0.70
90	240	0.72
450	260	0.73

Ekv. (7.16) skiljer sig från tidigare givna ekv. (7.10) och (7.11) eftersom sambandet i ekv. (7.16) avser självuttorkande prover medan de övriga omnämnda ekvationerna avser hela materialet oberoende av hur det exponerats. Dessutom avser ekv. (7.16), med regressionsanalysens hjälp, ett genomsnittligt samband mellan vbt_{eff} och tryckhållfasthet för betong med och utan silikastoft. Silikastoftets inverkan på tryckhållfastheten beaktas med effektivitetsfaktorn 2.

2) Det tidsmässiga sambandet för tryckhållfastheten i figur 7.25 kan för betongålder överstigande något dygn studeras enligt ansatsen

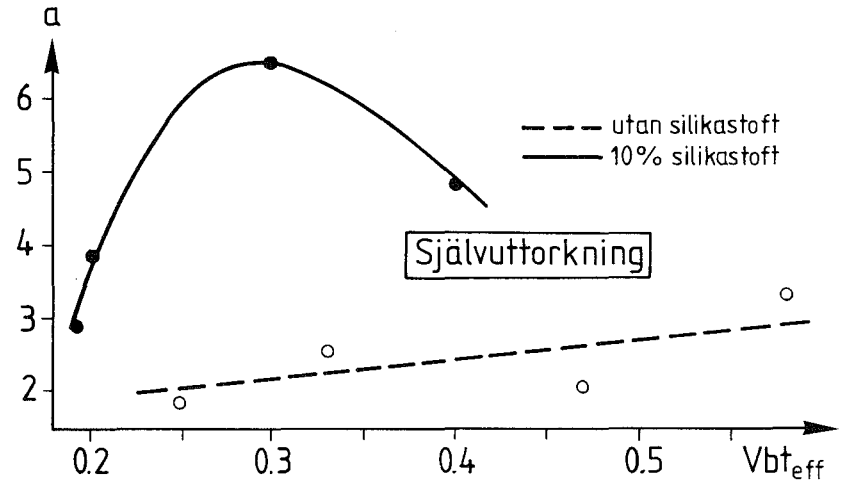
$$f_3=b\bullet(\log(t)+a) \quad \text{----------(7.17)}$$

där t betecknar tiden i dygn. Koefficienterna a och b (MPa) visas i figur 7.29-30. Vid en ålder mellan 28 och 450 dygn är faktorn a vid självtorkning större om silikastoft användes i betongen än om silikastoft ej ingår i receptet. Detta gäller speciellt i området $0.30<vbt_{eff}<0.40$. Koefficienten b är mindre för betong med silikastoft, än för betong utan silikastoft.

3) Av figur 7.31 framgår att betong utan silikastoft har en gynnsammare utveckling av tryckhållfastheten jämfört med betong med 10% silikastoft (räknat på cementinnehållet). Kurvorna i figur 7.31 baseras på hela försöksmaterialet dvs varje markering motsvarar medelvärdet av 36 st mätningar.

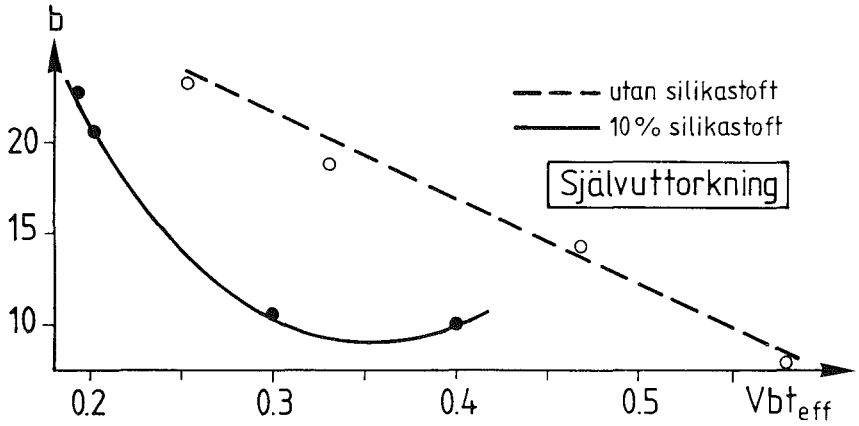
4) Den sämre utvecklingen av hållfasthet för betong med silikastoft jämfört med betong utan silikastoft, är, enligt figur 7.25, speciellt accentuerad då betongytan befunnit sig i vatten (typ A). Även för betongskivor med kanten i luft är tillväxten i hållfasthet något sämre för betong med silikastoft jämfört med betong utan silikastoft, se figur 7.25.

   Den sämre utvecklingen av hållfasthet på lång sikt för betong med silikastoft kan troligen förklaras av att betong med silikastoft snabbare får en låg inre RF, vilket innebär att mindre vatten finns tillgängligt för cementets fortsatta hydratation; se kapitel 6. Silikastoftet ger dessutom tätare betong vilket försvårar inflödet av vatten hos prover som vattenlagrats.



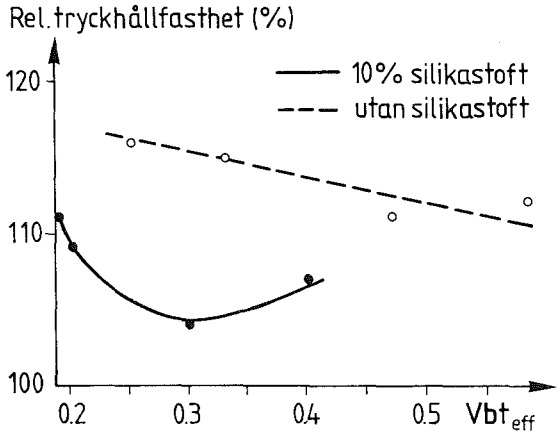
Figur 7.29 Faktorn, a, i ekv. (7.17) som funktion av vbt_{eff}

Figure 7.29 The coefficient, a, in eq. (7.17) as function of the effective water-binder ratio



Figur 7.30 Faktorn b i ekv. (7.17) som funktion av vbt_{eff}

Figur 7.30 Coefficient b in eq. 7.17 as function of the effective water-binder ratio



Figur 7.31 Tryckhållfasthetens, f_3, utveckling mellan 90 och 450 dygns ålder relaterat till 90-dygnsvärdet. (Kurvorna baseras på hela försöksmaterialet dvs varje markering motsvarar medelvärdet av 36 st mätningar)

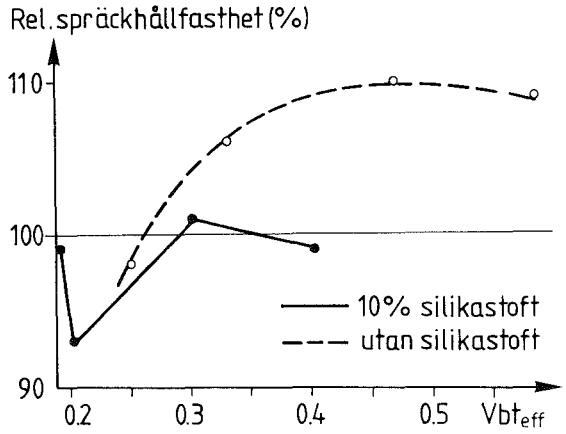
Figure 7.31 Development of compressive strength, f_3, between 90 and 450 days of age related to 90-day strength. (The curves are based on the whole material, ie each mark equals the medium value of 36 measurements.)

Spräckhållfasthet

Följande slutsatser efter långtidsuppföljningen kan dras:

1) Figur 7.32 visar relativa utvecklingen av spräckhållfastheten mellan 90 och 450 dygns ålder. Vid låga vbt$_{eff}$ uppvisar spräckhållfastheten en tendens till minskning mellan 90 och 450 dygns ålder. Detta är något oroväckande och får följas upp vid fortsatta långtidsförsök. Samtliga skivor i denna

undersökning finns kvar för en uppföljning vid 5 års ålder. Å andra sidan har man även i andra undersökningar för normal betong funnit att nedgångar i draghållfastheten inte menligt påverkat konstruktionens goda bestånd.



Figur 7.32 Utveckling av spräckhållfasthet, f_{spl}, mellan 90 och 450 dygns ålder relaterat till 90-dygnsvärdet. (Kurvorna basereras på hela försöksmaterialet dvs varje markering motsvarar medelvärdet av 18 st mätningar)

Figure 7.32 Development of split strength, f_{spl}, between 90 and 450 days of age related to 90-days strength. (Curves are based on the whole material ie each mark equals the medium value of 18 measurements.)

2) Som generellt uttryck för spräckhållfastheten, f_{spl}, erhålls ur figur 7.26 följande samband

$$f_{spl}=0.071\bullet(f_3+17) \quad \text{för } 40< f_3< 140 \text{ MPa} \qquad (7.18)$$

där f_3 är tryckhållfastheten för cylinder.

Tryckhållfasthetens beroende av härdningsförhållanden och avstånd till exponerad kant:

Tryckhållfastheten närmast ytan på en vattenförvarad betong med lågt vct, är ca 95% av medelvärdet medan den är ca 110% av medelvärdet närmast ytan på betong när vct= 0.58. På större avstånd blir förhållandena det omvända dvs betong med lågt vct förvarad i vatten får relativa hållfastheter på mer än 100% medan betong med vct= 0.58 får minskad relativ hållfasthet. Vid luftexponerad betong erhålls en relativ hållfasthet av 95-98% närmast betongytan, både för betong med lågt vct och högt vct. På avståndet 350 mm från betongytan ligger relativa hållfastheten vid luftförvaring på 103% för all betong oberoende av vct.

7.10 Sammanfattande slutsatser av hållfasthetsprovningar

Resultaten av hållfasthetsbestämningarna fram till ca 450 dygns ålder visar entydigt att man får en mycket god hållfasthetsutveckling i det inre av en simulerad pelare med diameter 1 m och med vbt_{eff} varierande mellan 0.18 och 0.58.

Följande hållfasthetsrelationer visade sig gälla:

$$f_{1,torr}=-5.4+1.14\bullet f_{1,våt}=21+0.95\bullet f_3;\ 40<\{f_1,\ f_3\}<140\ \text{MPa} \quad --(7.7)$$

där $f_{1,torr}$ är tryckhållfasthet för torr kub, $f_{1,våt}$ tryckhållfasthet för vattenlagrad kub samt f_3 tryckhållfasthet för utborrad cylinder med naturlig fuktnivå.

$$f_3=A\bullet(B-vbt_{eff}) \quad \text{för } 0.18< vbt_{eff}< 0.58 \quad ----------(7.16)$$

där vbt_{eff} ges enl ekv. (6.1) och värdena A och B i tabell 7.4

Tabell 7.4 Värden på A och B i ekv. (7.16) vid olika ålder

Ålder (dygn)	A (MPa)	B
28	220	0.70
90	240	0.72
450	260	0.73

$$f_{spl}=0.071\bullet(f_3+17) \quad \text{för } 40< f_3< 140 \text{ MPa} \qquad \text{----------(7.18)}$$

där f_{spl} är spräckhållfastheten hos utborrad cylinder och f_3 är tryckhållfastheten hos utborrad cylinder bägge i naturlig fuktmiljö.

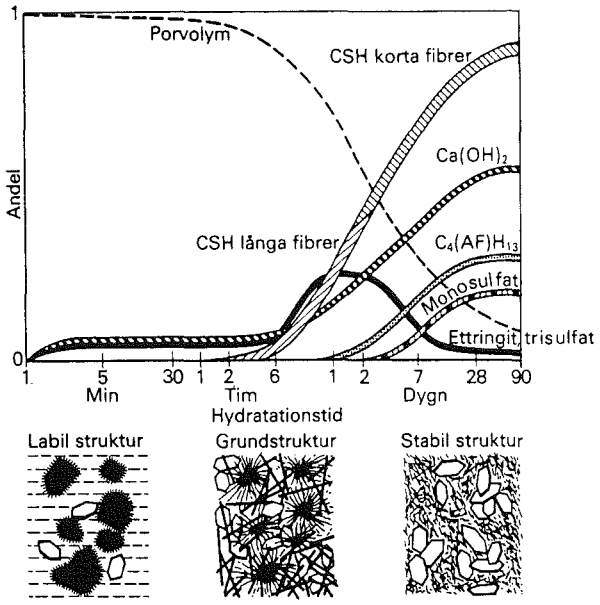
Hållfastheten har, vid låga vct, visat sig öka snarare än att minska med avståndet till den exponerade kanten av betongskivan oberoende av om kanten utsätts för vatten, luft eller är tät. Uttorkning under 1 månads tid har visat sig öka hållfastheten med ca 10% vid vct=0.24 och med ca 20% vid vct=0.58. Återuppfuktning i vatten under 1 månad av uttorkad provkropp sänker hållfastheten med ca 10% jämfört med ursprungsvärdena för självuttorkat tillstånd.

Betong med innehåll av silikastoft får på lång sikt en sämre hållfasthetsutveckling än en betong utan silikastoft.
Den sämre utvecklingen av hållfasthet för betong med silikastoft kan förklaras av att silikastoftet på ett tidigt stadium av härdningsprocessen sänker relativa fuktigheten i betongen så lågt, att möjligheten till fortsatt hydratation av cementet reduceras. Silikastoftet tätar dessutom betongen så effektivt att vattenlagring ej nämnvärt ökar tryckhållfastheten hos betongen. Trots en sämre utveckling av tryckhållfastheten för betong med silikastoft jämfört med betong utan, ökar dock dess hållfasthet på lång sikt. Uppföljningen visar att det vid låga vct finns en tendens till nedgång i spräckhållfasthet mellan 90 och 450 dygns ålder.

8. HYDRATATION

8.1 Hydratationsprodukter

Vid cementreaktionen, då vatten binds till cement och eventuellt silikastoft, bildas en rad reaktionsprodukter, vilka tillsammans med ballast betecknas betong. I figur 8.1 visas det huvudsakliga reaktionsförloppet som funktion av tiden.

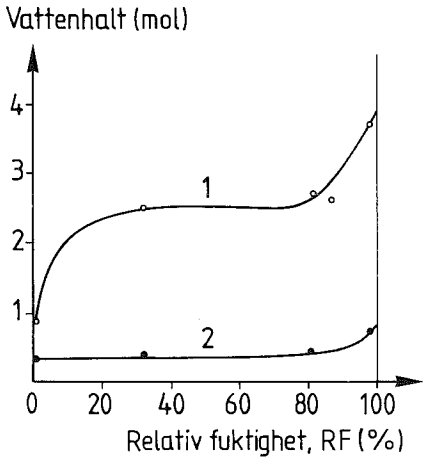


Figur 8.1 Reaktionsförloppet vid hydratation av portlandcement. Locher et al (1976)

Figure 8.1 Hydration of portland cement. Locher et al (1976)

Kalciumsilikathydratet, C-S-H, är den mest väsentliga produkten från hållfasthetssynpunkt. Övriga reaktionsprodukter bidrar i betydligt mindre grad till hållfastheten hos den hårdnade betongen. På lång sikt, när silikastoft används, sker även en

polymerisation varvid längre kedjor av kisel och syre utbildas. Ju större del av det till betongen ursprungligen tillförda vattnet, w_0, som binds kemiskt (hydratiseras) desto högre blir hållfasthetsvärdet. Från hållfasthetssynpunkt strävar man således efter att erhålla en så hög kvot mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_0, som möjligt. På lång sikt kan dock hydratvattenmängden minska något även om hållfastheten höjs, detta beroende på den ovannämnda polymerisationen. Då kedjan av kisel och syre förlängs med ett steg, avges nämligen en vattenmolekyl, se **Kühl (1967)**. Kalciumsilikathydrat, C-S-H, kan enligt **Kühl (1967)** vara mer eller mindre gelformig dvs mer eller mindre finkornig. I figur 8.2 visas jämviktsfuktkurvor dels för gelformigt, C-S-H, dels för kristallint C-S-H.

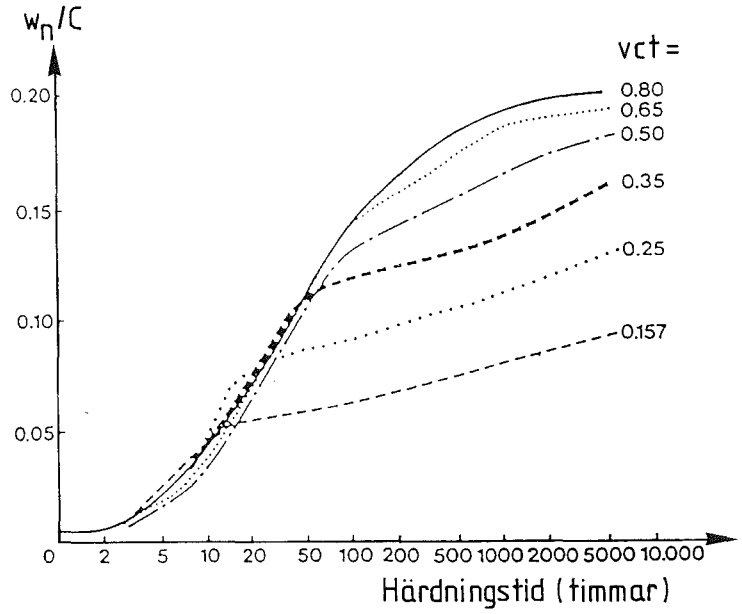


Figur 8.2 Vattenhalten som funktion av relativa fuktigheten, dels för gelformig kalciumsilikathydrat, C-S-H (1), dels för kristallin, (2). Kühl (1967)

Figure 8.2 Water content as function of relative humidity for C-S-H in gel form (1) and in crystalline form (2). Kühl (1967)

8.2 Tidigare mätningar av hydratation vid låga vct

Taplin (1959) visar i figur 8.3 mätningar av kemiskt bundet vatten hos rena portlandcementpastor med olika vct. Vid vct=0.8 och 200 dygn är w_n/C, dvs kemiskt bundet vatten dividerat med cementhalt, ca 0.20 medan det vid vct=0.25 enbart är ca 0.12.

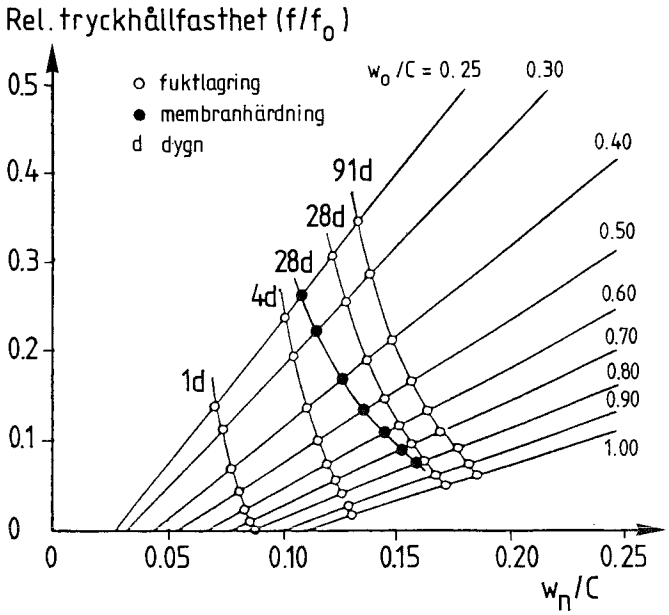


Figur 8.3 Kemiskt bundet vatten hos rena portlandcementpastor som funktion av tiden. Taplin (1959)

Figure 8.3 Chemically bound water of pure portland cement paste as function of time. Taplin (1959)

Man kan visa att det teoretiskt högsta möjliga värdet på w_n/C är ca 0.64•vct när vct<0.39 och 0.25 när vct>0.39; se ekv. (8.11) nedan. Detta innebär att samtliga pastor i figur 8.3 i stort sett nått ca 80% av sina maximalt möjliga hydratationsgrader efter ca 200 dygn.

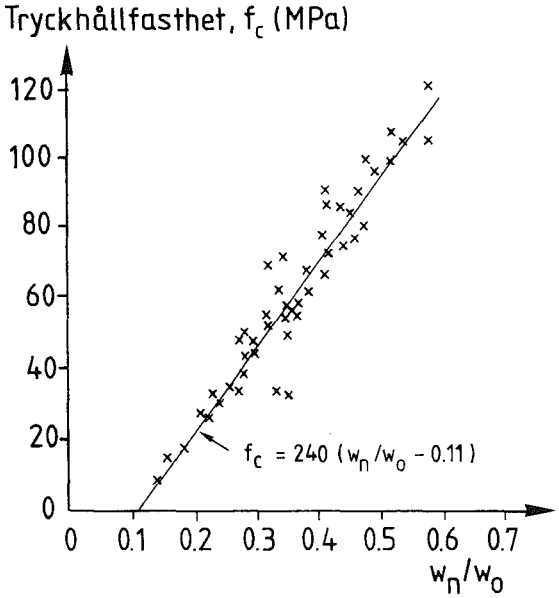
Fagerlund (1987B) redovisar i figur 8.4 teoretiskt beräknade värden på den relativa hållfastheten, f/f_o, som funktion av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, vid olika vattencementtal, w_o/C, och olika ålder. f betecknar betongens tryckhållfasthet och f_o tryckhållfastheten hos porfri cementpasta.



Figur 8.4 Beräknade värden på den relativa hållfastheten, f/f_o, i ren portlandcementpasta som funktion av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, vid olika vattencementtal, w_o/C, och olika ålder i dygn, d. G Fagerlund (1987B). (f_0: tryckhållfasthet hos porfri pasta)

Figure 8.4 Theoretically calculated values of relative strength, f/f_o, of portland cement pastes as function of ratio of nonevaporable water to cement, w_n/C, at different water-cement ratios, w_o/C, and different ages of the concrete in days= d. Fagerlund (1987B). f_o is the intrinsic strength of a paste that is free from pores

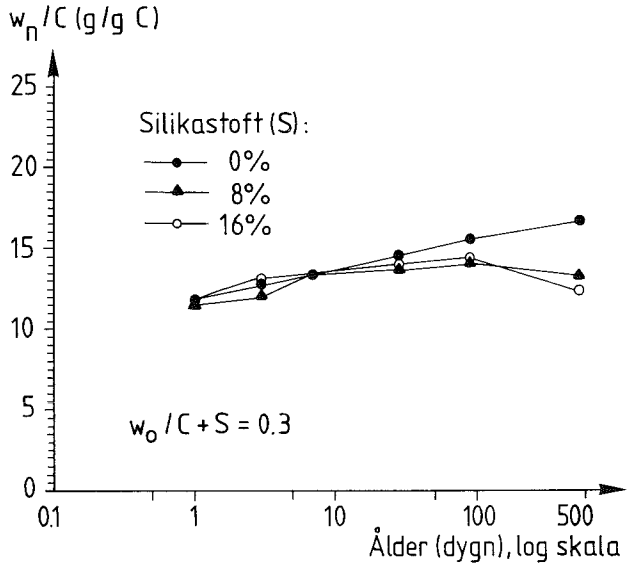
Powers & Brownyard (1948) redovisar i figur 8.5 tryckhållfastheten, f_c, som funktion av relativa hydratationsgraden, w_n/w_o, hos cementpasta. w_n betecknar därvid kemiskt bundet vatten och w_o ursprungligt vatten vid blandning. Som mest har därvid 0.57 uppmätts i relativ hydratationsgrad, resulterande i en tryckhållfasthet på 120 MPa. Figuren 8.5 har medtagits i detta kapitel eftersom samband mellan hydratationsutvecklingen och hållfasthetstillväxten kommer att ges nedan.



Figur 8.5 Tryckhållfasthet, f_c, hos ren portlandcementpasta som funktion av relationen w_n/w_o. Powers & Brownyard (1948). (Provkropp: kub 50x50 mm)

Figure 8.5 Compressive strength, f_c, of portland cement mortars as function of the relation w_n/w_o. Powers & Brownyard (1948). (Specimen: cube 50x50 mm)

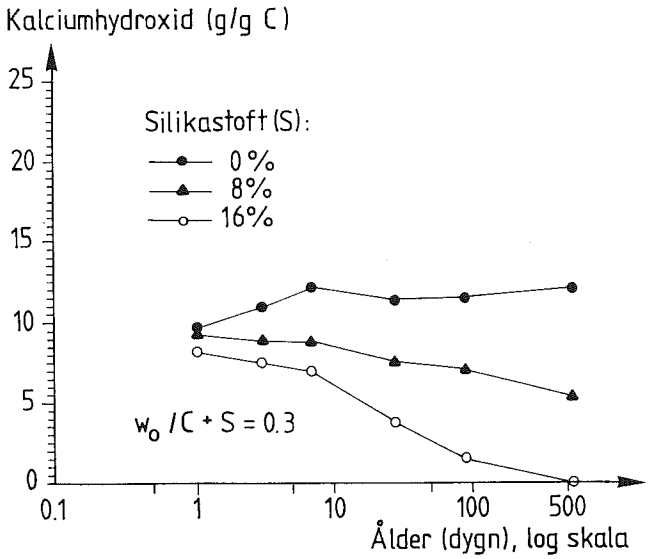
Zhang och Gjörv (1991) konstaterade en minskning med tiden av mängden kemiskt bundet vatten, w_n, hos cementpasta med mer än 8% silikastoft räknat på cementinnehållet och vid vattenbindetal, vbt, i området 0.20 och 0.40, se figur 8.6. Minskningen i kemiskt bundet vatten startar vid 90 dygns ålder och uppgår fram till 550 dygn till mellan 10 och 20% av mängden kemiskt bundet vatten vid 90 dygn.



Figur 8.6 Kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C, hos cementpasta med vbt=0.30 som funktion av tiden. Zhang och Gjörv (1991)

Figure 8.6 Ratio of nonevaporable water to cement, w_n/C, of cement paste as function of time. Water-binder ratio= 0.30. Zhang and Gjörv (1991)

Zhang och Gjörv (1991) studerade även mängden kalciumhydroxid (C-H) hos cementpasta som funktion av tiden. I figur 8.7 visas mängden kalciumhydroxid i cementpasta med vbt=0.30 som funktion av tiden. 0, 8 eller 16% silikastoft räknat på cementinnehållet studerades. Som synes sker en mycket kraftig reduktion av kalciumhydroxidmängden när pastan innehåller silikastoft. Vid 16% silikastoft konsumeras all kalciumhydroxid efter ca 500 dygn. Denna reaktion sker utan att vatten utifrån erfordras. Icke beständig kalciumhydroxid omvandlas till kalciumsilikatgel, vilket påverkar såväl hållfasthet som täthet (porositet) gynnsamt.



Figur 8.7 Mängd kalciumhydroxid som funktion av tiden hos cementpasta med vbt=0.30. 0, 8 eller 16% silikastoft räknat på cementinnehållet. Zhang och Gjörv (1991)

Figure 8.7 Amount of calcium hydroxide as function of time for cement paste with a water-binder ratio of 0.30. 0, 8 or 16% silica fume. Zhang and Gjörv (1991)

8.3 Försök med cementpasta

8.3.1 Allmänt

Två försöksserier genomfördes med cementpasta, dels en serie 1 med vct=0.30, dels en serie 2 med konstant vattenbindemedelstal, vbt=w_0/(C+S)=0.30. w_0 betecknar vatteninnehåll vid blandning, C betecknar innehåll av Anläggningcement och S betecknar mängd silikastoft. I bägge försöksserierna varierades innehållet av silikastoft. Totalt tillverkades 12 st cementpastor med recept enligt tabell 8.1.

Tabell 8.1 Recept vid hydratationsförsök med cementpasta (kg).

Serie 1			Serie 2		
(w_0/C=0.30)			(w_0/(C+S)=0.30		
Blandning littera	C	S	Blandning littera	C	S
1:000	1.000	0.000	2:025	0.975	0.025
1:025	1.000	0.025	2:050	0.950	0.050
1:050	1.000	0.050	2:075	0.925	0.075
1:075	1.000	0.075	2:100	0.900	0.100
1:100	1.000	0.100	2:150	0.850	0.150
1:150	1.000	0.150	2:200	0.800	0.200

8.3.2 Mätmetod

Bestämningen av hydratationsgrad utfördes enligt följande kronologiska schema:

1) Blandning och gjutning av ca 5 kg pasta av varje sort. Som gjutform användes för varje blandning en stålplåthink med diameter 0.29 m. Pastalagrets tjocklek var 0.04 m.

2) Vattentäckning av pastan utfördes efter ca 1 timme.

3) Krossning av pastan utfördes efter ca 16 tim.

4) 150 gram ur resp. pastasort placerades i 10 st behållare. Behållarna var av aluminium med diameter 0.065m.

5) Vattentäckning utfördes av pastan i behållarna.

6) Aluminiumbehållarna tömndes på vatten och placerades i torkugn (105°C) vid 2, 5, 7, 9, 22, 35, 58, 70, 90 och 120 dygns pastaålder.

7) Kylning utfördes i exsickator efter minst 1 månads uttorkning.

8) Vägning utfördes på 1/1000- dels grams våg.

9) Glödgning i 1050°C utfördes under minst 16 tim.

10) Kylning utfördes i exsickator till ca 20°C efter det att pastan fått svalna till ca 700°C i ugnen.

11) Vägning utfördes på 1/1000- dels grams våg.

12) Uträkning av hydratiserad cementmängd utfördes enl **Byfors (1980)** se ekv. (3.11).

8.3.3 Felkällor och noggrannhet

Felkällorna kan i huvudsak beskrivas på följande sätt:

Felvägning och homogenitet:

Möjligheterna till felvägning motverkas av det enkla receptet samt av att så stor mängd pasta som 5 kg tillverkades. Den stora mängden pasta ger även en god homogenitet.

Vågnoggrannhet:

Vid tillverkningen av pastan användes 1/10 grams våg samt vid hydratationsmätningarna 1/1000- dels grams våg med ett fel av +/- 0.004 gram.

Tidpunkt för hydratationens upphörande:

Hydratationen fortgår någon timme efter det att behållaren tömts på vatten fram tills dess provet uppnått 105°C. Vid låg pastaålder kan detta inverka på resultatet.

Uppkomst av membranskikt i cementpastan:

Resultaten i avsnitt 6 visar att det vid låga vbt troligen utbildas ett tätare membranskikt nära överytan, vilket skulle kunna hindra insugning av vatten och därmed försvåra fortsatt hydratation. Detta kan leda till att något för låga hydratationsgrader uppmäts för de allra tätaste pastorna.

Med beteckningar enligt nedan erhålles följande uttryck för relativa felet $\delta k/k$ i hydratvattenmängden, w_n/C:

$$\delta k/k = \delta D/D - \delta E/E \qquad \text{----------(8.1)}$$

$$D = w^{105} \cdot (1-{}^{n}) - w^{1050}$$

$$E = w^{1050} - \epsilon \cdot \frac{\Gamma}{1+\Gamma} \cdot w^{105}$$

w_n/C andel kemiskt bundet vatten i förhållande till cementmängd
w^{105} vikt vid 105°C
w^{1050} vikt vid 1050°C
Γ viktsförhållande mellan ballast och cement
ϵ $1-\mu_a$
μ_a glödgningsförlust för ballasten

$$n = \frac{\mu_c + \Gamma \cdot \mu_a}{1+\Gamma}$$

μ_c är glödgningsförlusten för cement.

Tabell 8.3 visar aktuella värden på de bedömda felen i vägningarna insatta i ovanstående uttryck vid en pastaålder av 7 dygn. Felet är av storleksordningen $0.5^{o}/_{oo}$. Vid högre ålder minskar det relativa felet p g a att viktsskillnaden mellan 105°C och 1050°C blir större. Felen beroende av felaktig tidpunkt då hydratationen upphör eller beroende av eventuellt membranskikt i pastan är då troligen större än vågfelet. För att fastställa noggrannheten med avseende på dessa felkällor krävs dock mer forskning.

Tabell 8.3 Av felvägning förorsakat relativt fel, $\delta k/k$, i mängd hydratvatten hos cementpasta vid 7 dygns ålder.

Blandning no	$\delta D/D$	$\delta E/E$	$\delta k/k$
1:000	$0.008/18=4.6\cdot10^{-4}$	$0.008/149=6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$
1:025	$0.008/17=4.8\cdot10^{-4}$	$0.008/142=6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$
1:050	$0.008/18=4.6\cdot10^{-4}$	$0.008/144=6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$
1:075	$0.008/17=4.8\cdot10^{-4}$	$0.008/142=6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$
1:100	$0.008/15=5.3\cdot10^{-4}$	$0.008/119=7\cdot10^{-5}$	$5\cdot10^{-4}$
1:150	$0.008/18=4.6\cdot10^{-4}$	$0.008/142=6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$
2:025	$0.008/16=5.0\cdot10^{-4}$	$0.008/133=6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$
2:050	$0.008/16=5.0\cdot10^{-4}$	$0.008/127=6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$
2:075	$0.008/17=4.8\cdot10^{-4}$	$0.008/129=6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$
2:100	$0.008/19=4.2\cdot10^{-4}$	$0.008/142=6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$
2:150	$0.008/18=4.6\cdot10^{-4}$	$0.008/132=6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-4}$
2:200	$0.008/15=5.3\cdot10^{-4}$	$0.008/105=8\cdot10^{-5}$	$5\cdot10^{-4}$

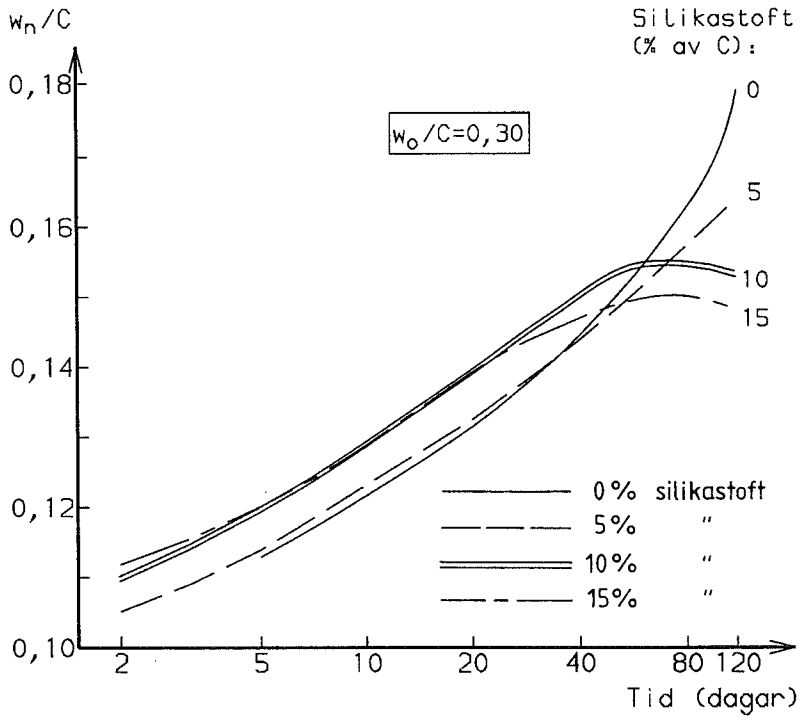
8.3.4 Resultat

Uppmätt kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C, vid pastaförsöken, redovisas i tabell 8.2. I figur 8.8 visas utvecklingen av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, för serie 1 dvs hos cementpasta med vct=0.30, vid ett innehåll av silikastoft på mellan 0 och 15% räknat på cementinnehållet. I figur 8.9 visas utvecklingen av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, hos cementpasta med vbt= 0.30, vid ett innehåll av silikastoft på mellan 2.5 och 20% räknat på mängden bindemedel.

Tabell 8.2 Mängd hydratvatten, w_n/C (promille) vid olika ålder

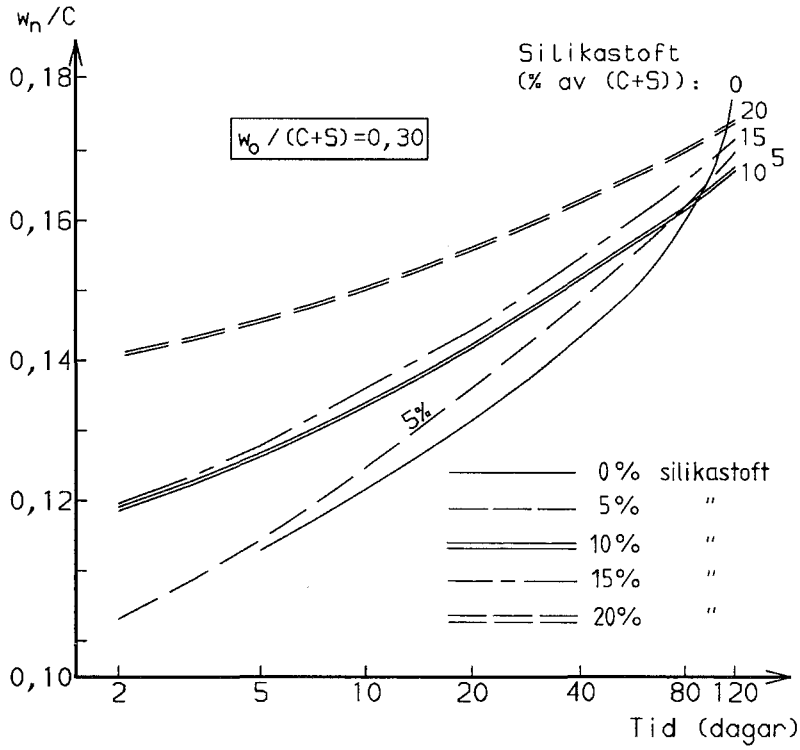
Blandning			Ålder (dygn)									
litt	Vct	Vbt	2	5	7	9	22	35	58	70	90	120
1:000	300	300	-	113	115	122	132	-	151	162	162	178
1:025	300	293	109	118	116	120	133	146	151	154	160	176
1:050	300	286	102	115	119	121	134	148	154	148	157	162
1:075	300	279	104	115	117	120	133	143	150	146	155	163
1:100	300	273	109	118	123	128	135	148	153	149	154	152
1:150	300	261	111	121	124	127	135	152	145	145	146	147
2:025	308	300	98	117	119	124	137	150	156	152	165	159
2:050	316	300	101	118	121	126	137	147	157	154	164	172
2:075	324	300	109	119	126	130	141	151	163	152	154	173
2:100	333	300	122	132	130	133	142	159	-	152	167	169
2:150	353	300	116	133	135	139	151	166	166	159	173	168
2:200	375	300	141	150	153	147	156	171	170	164	176	168

Värdena på mängden hydratvatten, w_n/C, har en tendens att börja minska efter 90 dygns ålder i det fall då mer än 10% silikastoft räknat på cementinnehållet ingår i blandningen. Denna tendens är mest märkbar vid konstant vct=0.30 medan den är oklar vid konstant vbt=0.30. **Zhang och Gjörv (1991)** har funnit en brytpunkt vid ca 90 dygns pastaålder för minskning av värdena på mängden hydratvatten, w_n/C, vid vbt=0.30. De studerade då hydratationsutvecklingen under mycket längre tid varför effekten blir mera tydlig, se figur 8.6.



Figur 8.8 Kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C, hos cementpastor från serie 1. Konstant vct=0.30.

Figure 8.8 Ratio of nonevaporable water to cement, w_n/C, for cement pastes of serie 1 as function of time. $w_0/C=0.30$.



Figur 8.9 Kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C, hos cementpasta för serie 2. Konstant vbt=0.30

Figure 8.9 Ratio of nonevaporable water to cement, w_n/C, for cement pastes of serie 2 as function of time. $w_0/(C+S)=0.30$.

8.3.5 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras av cementpastaförsöken:

1) Det finns en tendens till att mängden hydratvatten, w_n/C, börjar minska hos cementpasta efter 90 dygns ålder vid konstant vct=0.30.

2) Försök måste genomföras under en längre tidsperiod, om den exakta tidpunkten när hydratvattenmängden börjar minska, skall kunna fastställas.

3) Försök måste genomföras på tunna pastaskikt (< 5mm) så att effekten av eventuellt membranskikt i pastan kan undvikas; se även avsnitt 3.

8.4 Huvudförsök med betongskivor

8.4.1 Målsättning

Den primära avsikten med denna studie var att studera om hydratationsutvecklingen hos högpresterande betong skiljer sig från hydratationsutvecklingen hos normal betong.

En annan avsikt var att studera sambandet mellan hydratationsgraden och hållfasthetsutvecklingen. Av de kortfattade litteraturhänvisningar som gjordes ovan (se avsnitt 8.2) framgår att det för normal betong råder ett relativt lineärt samband mellan hydratationsgrad och hållfasthet. Det är okänt om samma typ av samband gäller för betong med mycket låga vbt.

8.4.2 Provade betonger

Samma betongskivor utnyttjades som i avsnitten 6 och 7; översiktliga recept ges i tabell 5.2. Detaljerade recept, konsistens, lufthalt och kornstorleksfördelning ges i DATARAPPORT

TVBM-7011, 5.4-5.6. Totalt tillverkades 24 st skivor med diametern 1 m och tjockleken 0.1 m, dvs ca 5 ton betong. Efter blandningen göts betongen i stålform, vibrerades och täcktes med en plastfolie som tejpades runt formen. 1 till 3 dygn efter gjutning epoxibelades skivornas plana sidor. Medan ena plana sidan på skivan behandlades behölls den diffusionstäta täckningen på den andra sidan.

Samtliga skivor membranhärdades på sina bägge plana sidor. 8 st av skivorna förvarades med kanten exponerad för vatten (typ A), 8 st skivor förvarades i luft (typ B) medan resterande 8 st skivor epoxibelades även på den runda kanten (typ C). Med den senare åtgärden simulerades en perfekt membranhärdad provkropp medan de båda första åtgärderna simulerade en tjock pelare som placerats dels i vatten, dels i luft.

8.4.3 Provtagning

Vid den provning av tryckhållfasthet som ägde rum vid 28, 90 och i vissa fall även vid ca 140 dygns ålder av utborrade cylindrar, vilken redovisas i avsnitt 7, bildades fragment. Dessa användes för bestämning av förångningsbart vatten resp hydratvatten. På så sätt kunde hållfasthet och hydratation provas på identiskt samma provkropp som hade en storlek av ca 300 g betong. Totalt tryckprovades och glödgades ca 200 kg betong.

Samtidigt är fuktförhållandena i betongen kända genom mätning av RF i för ändamålet i skivorna ingjutna mätrör. En långtidsuppföljning av hydratationsutvecklingen genomfördes vid 450 dygns ålder. Även hållfasthetsutvecklingen följdes upp se avsnitt 7.9. Betongskivorna finns sparade för en framtida uppföljning av hydratationsutvecklingen.

8.4.4 Mätmetod

Bestämningen av hydratationsutvecklingen gjordes enligt följande kronologiska schema:

1) De i avsnitt 7 beskrivna cylindrarna som använts för mätning av tryckhållfastheten, fragmenterades (krossades) inneslutna i plastfolie.

2) Fragmenten vägdes samt torkades i 105°C under minst 30 dygn.

3) Fragmenten fick svalna i exsickator.

4) Vägning utfördes.

5) Kontroll gjordes av att proverna kommit i jämvikt dvs att kvoten mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, stabiliserats. Data redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 8.1.

6) Provet flyttades till en degel, vars vikt var känd.

7) Provet vägdes.

8) Provet glödgades vid 1050°C under minst 16 timmar.

9) Efter avsvalning i ugn till 700°C flyttades provet till exsickator för kylning till rumstemperatur.

10) Slutligen utfördes vägning varefter kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, uträknats enligt **Byfors (1980)** se ekv. (3.11).

8.4.5 Felkällor och noggrannhet

Den största felkällan utgjordes av eventuell fuktförlust eller fuktupptagning under hantering av proverna. I görligaste mån motverkades detta dels genom att proverna transporterades i plastpåsar med tjockleken 0.2 mm, dels genom att exsickator användes vid avkylning till rumstemperatur.

En annan felkälla kunde ha varit att ej allt vid 105°C förångningsbart vatten verkligen avgått ur provet. Denna felkälla motverkades genom att uttorkning utfördes under mycket lång tid av finfördelade prover. Torkskåpet var vidare placerat i en miljö utan direkt fuktpåverkan med RF≈40%. En uppföljning som gjordes av en mycket tät provkropp ur blandning 8, visade att stabila värden på kvoten mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, nås redan efter 3-4 dygns torkning; se DATARAPPORT TVBM-7011; 8.11.

Under uppvärmning till 105°C skedde en viss hydratation. Kompensation för denna hydratation utfördes dock ej .

Om man bortser från de svårbestämda felkällorna enligt ovan och endast beaktar vågfel erhålles för det relativa felet i kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C enligt avsnitt 8.3.3

$$\delta k/k = \delta D/D - \delta E/E \qquad \text{----------} \quad (8.1)$$

För 28 dygns ålder gäller de relativa fel som redovisas i tabell 8.5 (membranhärdad skiva, 50 mm från kanten). För stigande ålder på betongen ökar glödgningsförlusten och därvid minskar det relativa felet. Felet är av storleksordningen 1.5‰.

Fel i sambandet mellan parametrarna p och x (se figur 8.14) beror i huvudsak på precisionen i fuktmätning i betongen. Enligt avsnitt 6 har noggrannheten i RF bedömts till ±2%. Sammantaget får därför noggrannheten i RF enl figur 8.14 bedömas till ±3%.

Tabell 8.5 Relativa felet i kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, (50 mm från kanten på membranhärdad skiva)

Blandning no	$\delta D/D$	$\delta E/E$	$\delta k/k$
2	$0.008/5.8=1.4\cdot10^{-3}$	$0.008/25=3\cdot10^{-4}$	$1.1\cdot10^{-3}$
3	$0.008/5.7=1.4\cdot10^{-3}$	$0.008/25=3\cdot10^{-4}$	$1.1\cdot10^{-3}$
4	$0.008/5.5=1.5\cdot10^{-3}$	$0.008/25=3\cdot10^{-4}$	$1.3\cdot10^{-3}$
5	$0.008/5.9=1.4\cdot10^{-3}$	$0.008/35=3\cdot10^{-4}$	$1.1\cdot10^{-3}$
6	$0.008/6.1=1.3\cdot10^{-3}$	$0.008/35=3\cdot10^{-4}$	$1.0\cdot10^{-3}$
7	$0.008/6.6=1.2\cdot10^{-3}$	$0.008/39=2\cdot10^{-3}$	$1.0\cdot10^{-3}$
8	$0.008/6.0=1.3\cdot10^{-3}$	$0.008/43=2\cdot10^{-3}$	$1.1\cdot10^{-3}$
9	$0.008/5.8=1.4\cdot10^{-3}$	$0.008/42=2\cdot10^{-3}$	$1.2\cdot10^{-3}$

8.4.6 Resultat

Mätdata:

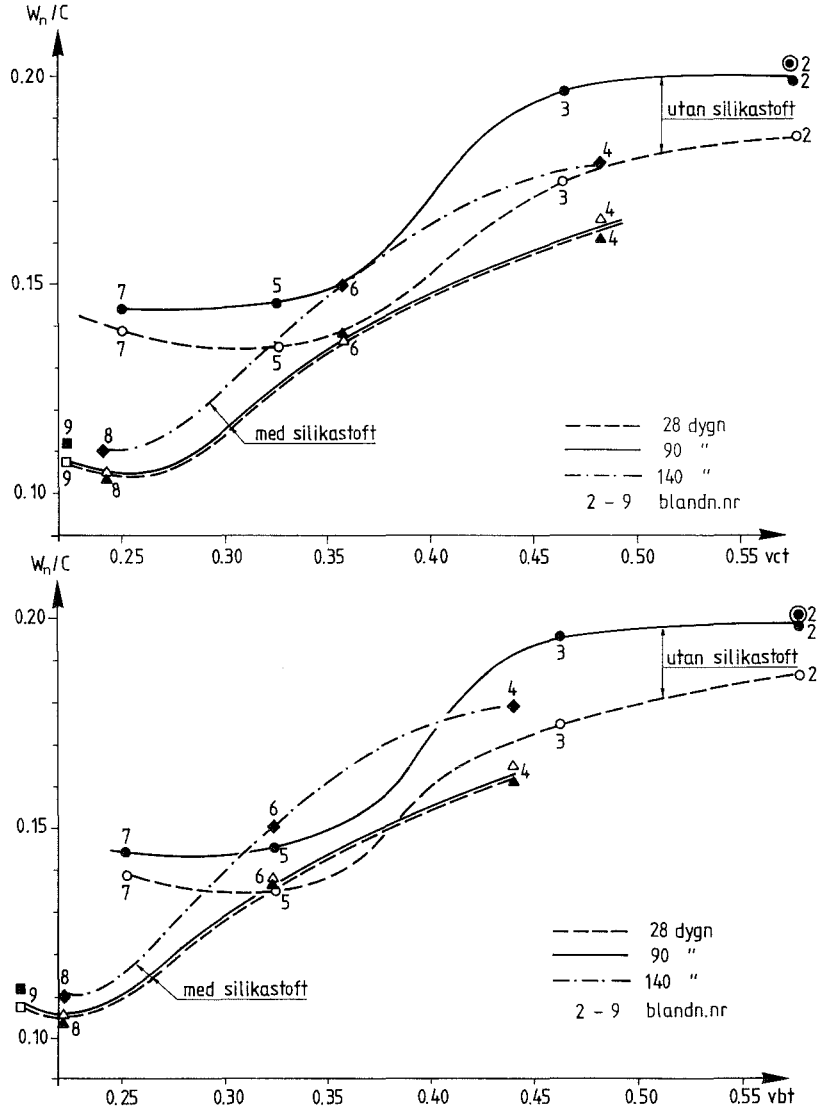
Samtliga mätdata över kvoten mellan förångningsbart vatten och cement, w_e/C, samt över kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, för 28, 90 och 140 dygns ålder inkl. sammanfattningar redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 8.2-8.45. Data redovisas även i figurform i bilagor 1, 4 och 6 nedan.

Vattencementtalet och hydratation:

I figur 8.10 visas kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, som funktion av vct och vbt hos skivor som självuttorkat 28, 90 och i vissa fall 140 dygn.

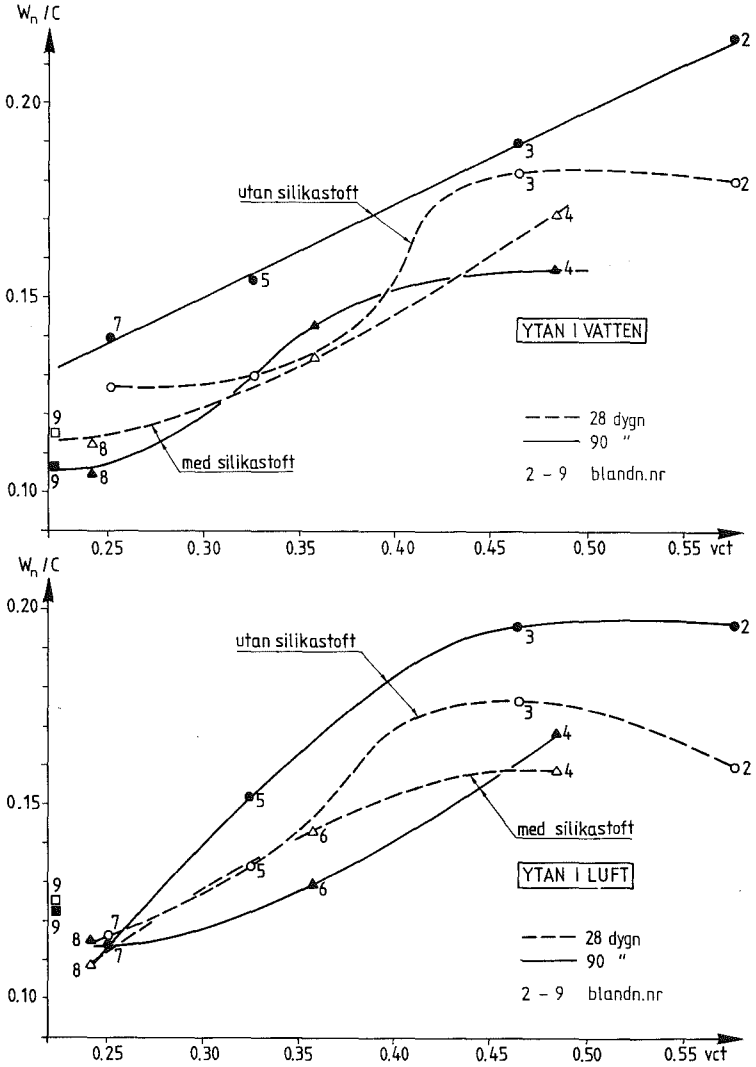
Avstånd till exponerad kant och hydratation:

I figur 8.11 visas kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C som funktion av vct 50 mm från skivans kant i vatten eller luft.



Figur 8.10 Kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, som funktion av vct och vbt vid självuttorkning.

Figure 8.10 Ratio of nonevaporable water to cement, w_n/C, as a function of vct and vbt at self-dessication.



Figur 8.11. Kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, på avståndet 50 mm från skivans kant som funktion av vct. Kanten exponerad för vatten (A) eller i luft (B).

Figure 8.11 Ratio of nonevaporable water to cement, w_n/C, at a distance of 50 mm from rim of slab as function of water-cement ratio. Rim submerged or in air.

I bilaga 4 nedan visas på motsvarande sätt kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, som funktion av vct på ett avstånd av 150 mm och 350 mm från kanten på betongskivan. I bilaga 1 redovisas en sammanställning av hydratationsutveckling, w_n/C, liksom av RF-utveckling, tryck- samt spräckhållfasthet för samtliga blandningar och skivor.

Tryckhållfastheten och hydratation:

Figur 8.12 visar tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar, f_3, som funktion av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C. Man kan av figuren tydligt avläsa inverkan av en tillsats av silikastoft på tryckhållfastheten i betongen; t ex vid vct=0.47 och vid vct=0.48. Den förra blandningen innehöll ej silikastoft.
I figur 8.13 visas tryckhållfasthet, f_3, som funktion av kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_0. Blandningsnummer anges i figuren. Varje markering motsvarar 36 mätvärden.

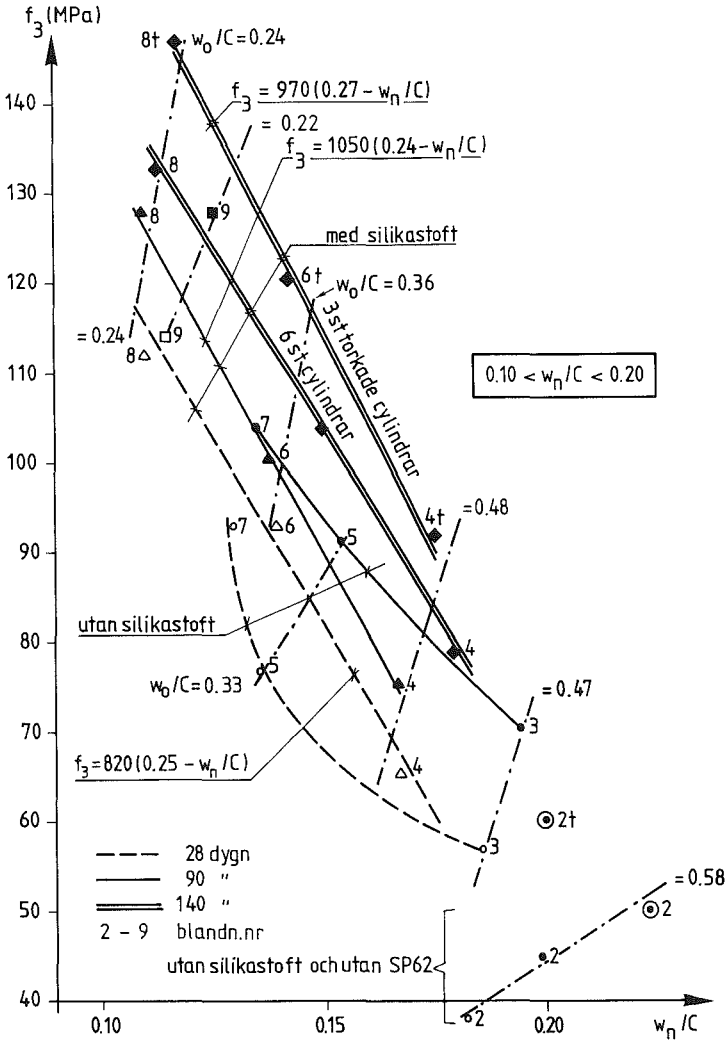
Relativ fuktighet och hydratation:

I bilaga 5 nedan visas samband mellan relativa fuktigheten, RF, hos provet och kvoten mellan dess hydratvattenmängd och dess förångningsbara vattenmängd, w_n/w_e. I figurerna används på de bägge axlarna parametrarna p och x, vilka definieras av ekv. (4.10) och (4.8):

$$p=RF/x \qquad \text{----------(4.10)}$$

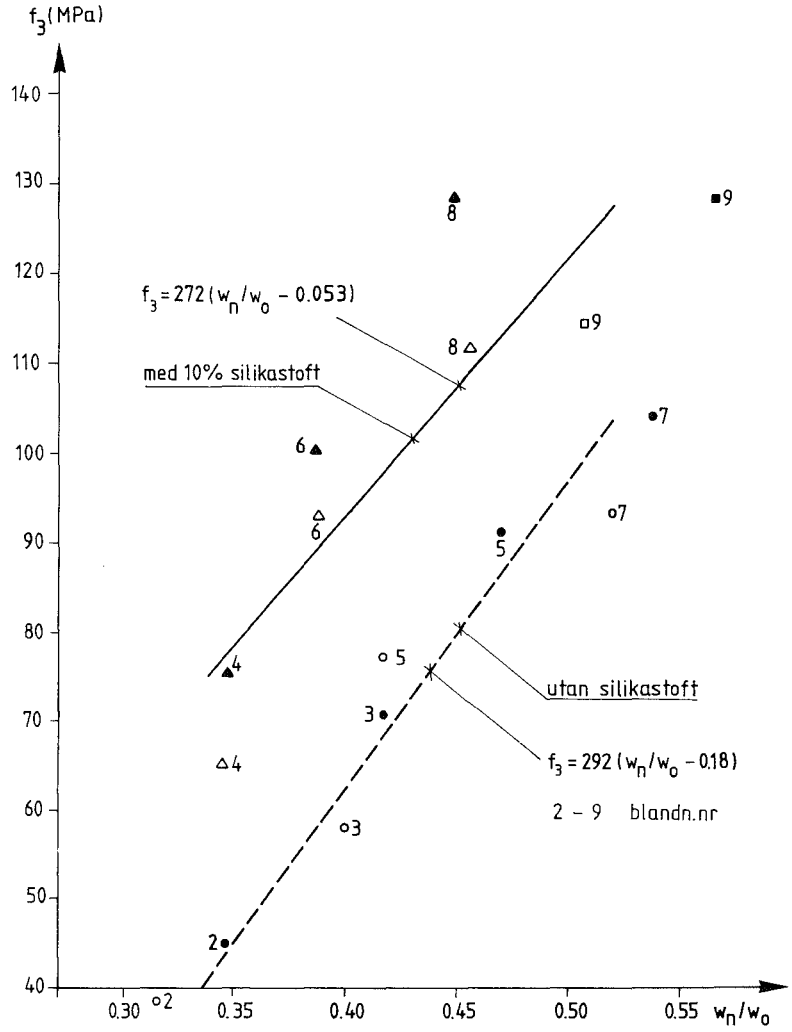
$$x=1/S_0 \qquad \text{----------(4.8)}$$

där S_0 är porfyllnadsgraden hos en självuttorkad betong. S_0 minskar med ökande hydratationsgrad. Beträffande härledning av relationen mellan x och S_0 se avsnitt 4.3.3. I figur 8.14 visas det principiella sambandet mellan parametrarna p och x för betong med och utan silikastoft.



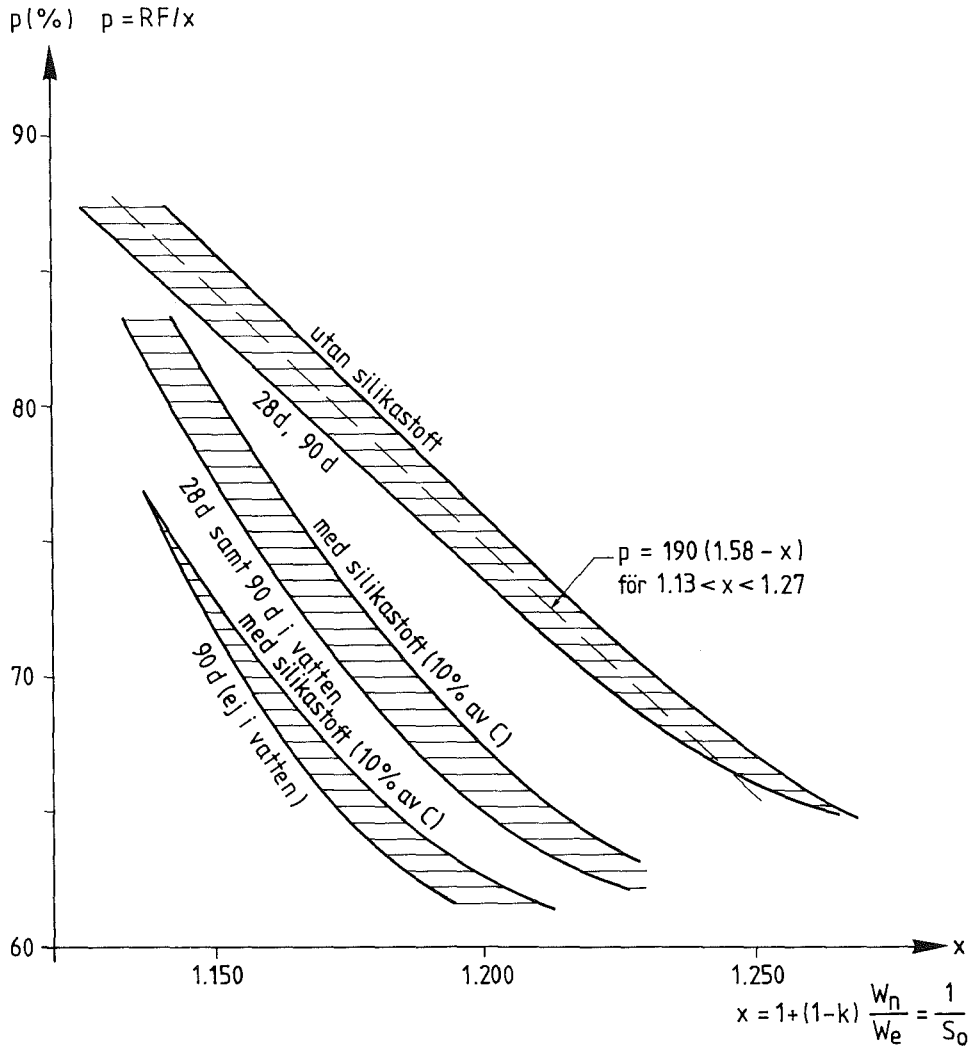
Figur 8.12 Tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar, f_3, som funktion av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, vid olika vct.

Figure 8.12 Compressive strength of drilled cores as function of ratio of nonevaporable water to cement, w_n/C, for different water-cement ratios.



Figur 8.13 Tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar, f_3, som funktion av kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o. Ålder: 28 och 90 dygn

Figure 8.13 Compressive strength of drilled cores, f_3, as function of ratio of nonevaporable to mixing water, w_n/w_o. Age: 28 and 90 days.



Figur 8.14 Samband mellan parametrarna p och x för betong med 0 eller 10% silikastoft

Figure 8.14 Relation between parameters p and x for concrete with 0 or 10% silica fume.

Härdningsbetingelser och hydratation:

I bilaga 6 visas hur kvoten mellan uppmätt hydratvatten och medelvärdet av hydratvattnet för skivan varierar med avståndet till skivans kant som funktion av vct vid olika härdningsbetingelser.

8.4.7 Diskussion

Vattencementtalet och hydratation:

Av figur 8.10- 8.12 framgår att hydratationsgraden ökar med ökat vct. Detta är logiskt dels med tanke på att maximalt möjliga hydratationsgrad minskar med sänkt vct- se figur 8.3- dels med tanke på att pastans täthet ökar med sänkt vct och hydratationen därmed försvåras.

Ett frapperande resultat är att vid låga vbt minskar hydratationen mycket kraftigt när betongen innehåller silikastoft.

Tryckhållfasthet och hydratation:

Figur 8.12 kan jämföras med figur 8.4. Bägge figurerna visar samma tendenser nämligen att hållfastheten för en given blandning (konstant vct) ökar i stort sett lineärt med hydratvattenmängden och att olika blandningar med olika vct vid konstant ålder följer i stort sett lineära kuvor. Vid betong utan tillsats av silikastoft blir, enligt figur 8.12, sambandet mellan kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, och tryckhållfastheten, f_3, något mera krökt.

För betong med 10% silikastoft räknat på cementhalten gäller vid 28 dygns ålder följande relation för tryckhållfastheten, f_3 (MPa):

$$f_3=820\bullet(0.25-w_n/C) \qquad \text{för } 0.10<w_n/C<0.18 \qquad \text{----------(8.2)}$$

För betong med 10% silikastoft räknat på cementhalten gäller vid 90 dygns ålder följande relation för tryckhållfastheten, f_3 (MPa):

$$f_3=1050\bullet(0.24-w_n/C) \quad \text{för } 0.10<w_n/C<0.18 \quad \text{----------(8.3)}$$

För torkade provkroppar med 10% silikastoft i betong och 140 dygns ålder erhålles följande samband:

$$f_3=970\bullet(0.27-w_n/C) \quad \text{för } 0.10<w_n/C<0.18 \quad \text{----------(8.4)}$$

Resultaten överensstämmer i princip med vad **Fagerlund (1987B)** funnit teoretiskt; jfr figur 8.4.

Figur 8.13 kan jämföras med figur 8.5. Bägge figurerna ger i stort sett samma tendenser nämligen att hållfastheten för blandningar med ett givet bindemedel, t ex 100% portlandcement av viss typ, är i stort sett proportionell mot kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o. Samma resultat gäller för alla åldrar. Ålderseffekten kommer nämligen in i hydratvattenmängden w_n.

Lineär regression mellan tryckhållfastheten, f_3, och kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, i figur 8.13, ger för betong med 10% silikastoft (MPa):

$$f_3=272\bullet(w_n/w_o-0.053) \quad \text{för } 0.35<w_n/w_o<0.55 \quad \text{----------(8.5)}$$

Vid betong utan tillsats av silikastoft blir, enligt figur 8.13, sambandet mellan kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o,och tryckhållfasthet, f_3, något mera krökt. Följande relation gäller för materialet utan silikastoft (MPa):

$$f_3=292\bullet(w_n/w_o-0.18) \quad \text{för } 0.35<w_n/w_o<0.55 \quad \text{----------(8.6)}$$

För t ex w_n/w_o=0.35 erhålles med silikastoft en tryckhållfasthet av ca 80 MPa medan endast 45 MPa erhålles utan silikastoft för blandningar med samma typ av ballast och samma proportioner av ballast.

Silikastoftet har således en stor betydelse för tryckhållfastheten. Det är främst fasgränserna som påverkas gynnsamt från hållfasthetssynpunkt i och med att kalciumhydroxiden i betongen förbrukas av silikastoftet. Förutsatt att betongen innehåller en god ballast kan således silikastoftets egenskaper utnyttjas.

Powers (1948) har för cementpasta utan silikastoft funnit andra konstanter i sin relation mellan w_n/w_o och tryckhållfastheten, f_c (MPa):

$$f_c=240\bullet(w_n/w_o-0.105) \quad \text{för } 0.10<w_n/w_o<0.60 \qquad (8.7)$$

För t ex w_n/w_o=0.35 finner han $f_c\approx$ 60 MPa och för w_n/w_o=0.45 $f_c\approx$ 80 MPa. Skillnaderna mellan ekvationerna (8.5), (8.6) och (8.7) visar inverkan av silikastoft resp. av ballast.

Relativ fuktighet och hydratation:

I figur 8.14 har förutom resultat för betong i detta avsnitt även tagits med de värden från självuttorkning av bruk vilka redovisades i kapitel 4. Totalt baserar sig resultaten i figur 8.14 på ca 800 st mätvärden. Lineär regression för betong och bruk utan silikastoft ger

$$p=190\bullet(1.58-x) \quad \text{för } 1.13<x<1.27 \qquad (8.8)$$

där parametrarna p och x definieras av ekv. (4.10) och (4.8). Parametern p saknar fysikalisk relevans och är endast ett medel att beräkna ett samband mellan relativ fuktigheten, RF och porfyllnadsgraden vid självuttorkning, S_0. Således gäller enligt ekv. (8.8), (4.8) och (4.10) följande relation:

$$RF = \frac{190}{S_0} \cdot \left(1.58 - \frac{1}{S_0}\right) \quad \text{för } 0.78 < S_0 < 0.89 \qquad \text{----------(8.9)}$$

Mer forskning krävs för att utröna om relationen gäller även för lägre värden på porfyllnadsgraden.

För betong med tillsats av silikastoft är sambanden mera krökta.

Inverkan av härdningsbetingelser och avstånd till skivans kant:

Vad beträffar hydratationens beroende av tillgång på vatten visas i bilaga 6.1 den relativa hydratationsgraden vid självuttorkning, $w_n/w_{n,medel}$, som funktion av vct vid självuttorkning. Av figuren framgår att gjuttekniken har mycket liten inverkan på utvecklingen av den relativa hydratationsgraden, $w_n/w_{n,medel}$, varför någon korrektion för gjutteknik ej behövt utföras.

I bilaga 6.2 nedan visas utvecklingen av relativa hydratationen 50 mm från den exponerade ytan. Då ytan befinner sig i vatten minskar den relativa hydratationsgraden, $w_n/w_{n,medel}$, till ca 95% vid låga vct och 90 dygns ålder.

Detta resultat är svårförklarligt eftersom man även vid låga vbt förväntat sig ett högre värde på w_n så nära den vattenexponerade ytan som 50 mm. Förväxling av prover är utesluten eftersom dessa dubblerats. Dessutom glödgades ca 300 g betong.

Då ytan befunnit sig i luft finns en liten reduktion (ca 2%) av hydratationen 50 mm från den exponerade ytan jämfört med medelhydratationen för hela skivan.

I bilaga 6.3 nedan visas att i stort sett inga förändringar sker av kvoten $w_n/w_{n,medel}$, oavsett ytpåverkan, på prover som är uttagna 150 mm från ytan.

I bilaga 6.4 nedan visas förhållandena 350 mm från skivans kant. I detta fall ökar den relativa hydratationsgraden, $w_n/w_{n,medel}$ ca 5% med tiden till ca 105% vid förvaring i vatten och vid låga vct. Även detta resultat är svårförklarligt. Var kommer vattnet ifrån i en så tät betong? Möjligen skulle det kunna härröra från den allt fortgående polymerisationen av cementgelen.

Då ytan befunnit sig i luft finns ingen effekt av vct på hydratationen 350 mm från de exponerade ytan.

8.5 Långtidsuppföljning av hydratationsutvecklingen hos betongskivor

8.5.1 Allmänt

Vid 450 dygns ålder gjordes en uppföljning av hydratationsutvecklingen hos samma betongskivor som beskrivs i avsnitt 8.4. Fram till mättillfället förvarades betongen som tidigare, dvs endera i vatten (A), i luft (B) eller membranhärdad (C). Mätmetoder enligt avsnitt 8.4 tillämpades.

8.5.2 Mätresultat

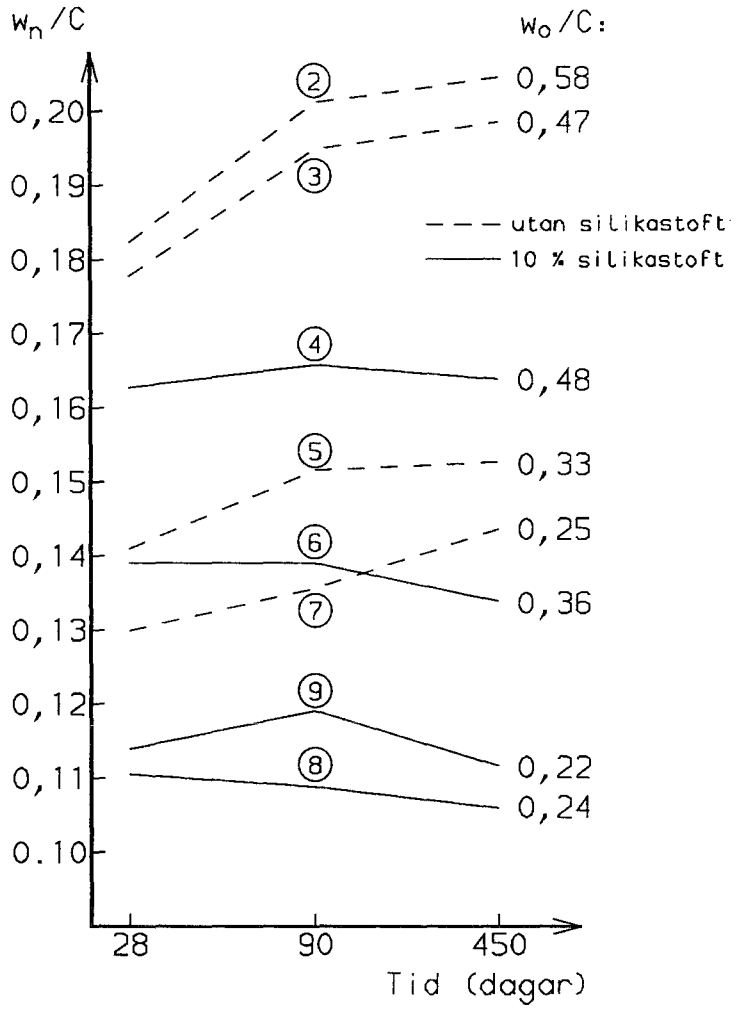
En sammanfattning av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, för samtliga blandningar och exponeringssätt, ges i tabell 8.6.

I bilaga 7 och 8 nedan visas hydratationsutvecklingen för självuttorkade betongskivor (typ C). Hydratationen definieras antingen som kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, eller som kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_0.

I figur 8.15 och 8.16 visas medelvärden av hydratationsutvecklingen för alla tre härdningssätten.

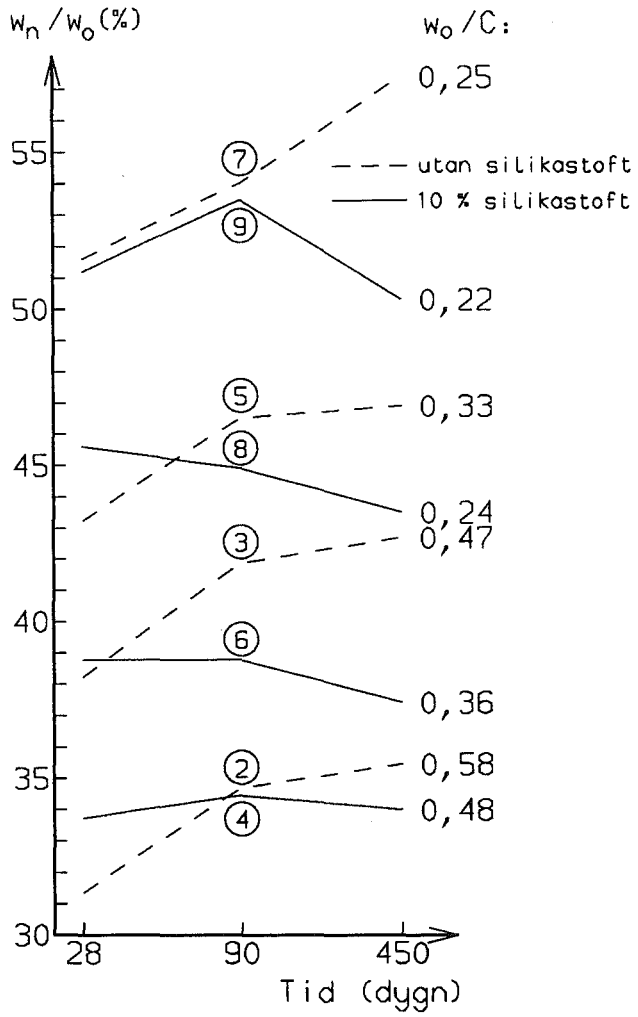
Tabell 8.6 Kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, vid olika ålder (promille) och härdningssätt; med= medelvärde, A= i vatten, B= i luft, C= membranhärdad skiva

Bland-ning litt.	Härd-nings-sätt	Å l d e r					
		28 dygn		90 dygn		450 dygn	
		w_n/C	w_n/C_{med}	w_n/C	w_n/C_{med}	w_n/C	w_n/C_{med}
2	A B C	188 173 186	182	207 197 198	201	204 195 216	205
3	A B C	178 180 175	178	191 198 197	195	201 192 205	199
4	A B C	168 167 154	163	164 176 161	167	157 166 168	164
5	A B C	133 154 137	141	157 154 146	152	158 156 144	153
6	A B C	140 141 137	139	141 136 139	139	137 130 135	134
7	A B C	132 118 139	130	142 120 145	136	151 128 152	144
8	A B C	114 113 106	111	112 113 103	109	104 110 103	106
9	A B C	117 117 109	114	118 126 113	119	113 117 106	112



Figur 8.15. Kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C, som funktion av tiden. Medelvärden av alla härdningssätt. (Blandningsnummer anges i figuren).

Figure 8.15 Ratio of nonevaporable water to cement, w_n/C, as function of time. Mean value of three curing methods. (Batch number indicated in the figure).



Figur 8.16 Kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o, som funktion av tiden. Medelvärden av alla härdningssätt. (Blandningsnummer anges i figuren).

Figure 8.16 Ratio of nonevaporable water to mixing water, w_n/w_0, as function of time. Mean value of three curing methods. (Batch number indicated).

För en tät betong med ett lågt vct utgör den ursprungliga mängden vatten i betongen (blandningsvattnet), w_o, en begränsande faktor för hydratationens fortskridande. Det är av denna anledning som kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o, i bilaga 8 och i figur 8.16 använts som ett mått på "hydratationsgraden" för betong med lågt vct. Samma synsätt har använts av Powers & Brownyard (1948). I tabell 8.7 redovisas utvecklingen av medelvärdet av kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, $w_n/w_{o,medel}$ vid varierande ålder. De högsta värdena $w_n/w_0 \approx 0.57$, överensstämmer väl med de högsta värdena som Powers & Brownyard (1948) redovisar.

Tabell 8.7 Medelvärden av kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, $w_n/w_{o,medel}$, vid varierande ålder.

Blandning	Vct	$w_n/w_{o,medel}$		
no	w_o/C	Å l d e r		
		28 dygn	90 dygn	450 dygn
2	0.58	0.315	0.348	0.355
3	0.47	0.383	0.419	0.428
4	0.48	0.338	0.345	0.340
5	0.33	0.433	0.466	0.469
6	0.36	0.388	0.388	0.374
7	0.25	0.518	0.542	0.574
8	0.24	0.457	0.449	0.436
9	0.22	0.513	0.536	0.504

Maximal hydratationsgrad:

Rent teoretiskt kan, som nämnts i avsnitt 3.2 och som bevisats av **Fagerlund (1992)**, högsta maximala hydratationsgraden, α_{max}, högst uppgå till

$$\alpha_{max} = \frac{w_0}{0.39 \bullet C} \qquad \text{för } 0<vct<0.39 \qquad \text{----------(3.6)}$$

Hydratationsgraden kan också definieras som

$$\alpha = \frac{w_n}{0.25 \bullet C} \qquad \text{----------(8.10)}$$

där faktorn 0.25 är mängd hydratvatten vid fullständig hydratation och C är cementhalten. Division av ekv. (8.10) med ekv. (3.6) ger följande relation för det maximalt möjliga värdet på parametern $(w_n/w_0)_{max}$

$$(w_n/w_0)_{max}=0.64 \qquad \text{för } 0<vct<0.39 \qquad \text{----------(8.11)}$$

För betong med vct>0.39 gäller att $\alpha_{max}=1$ dvs

$$(w_n/w_0)_{max}=0.25/vct \qquad \text{för } vct>0.39 \qquad \text{----------(8.12)}$$

I figur 8.17 visas (w_n/w_0) som funktion av vct enligt denna undersökning. Regressionsanalys för betong utan silikastoft ger följande relation vid 450 dygns ålder:

$$\left\{\frac{w_n}{w_0}\right\}_{450} = 0.55 \bullet (1.24-vct) \qquad \text{för } 0.25<vct<0.58 \qquad \text{----------(8.13)}$$

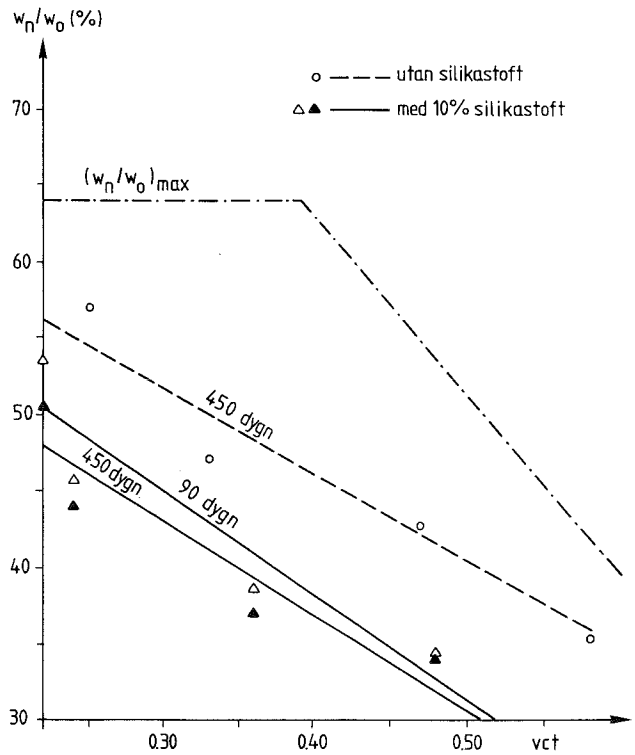
Vid 90 dygns ålder erhålles för betong med 10% silikastoft:

$$\left\{\frac{w_n}{w_0}\right\}_{90} = 0.67 \bullet (0.97-vct) \qquad \text{för } 0.22<vct<0.48 \qquad \text{----------(8.14)}$$

samt vid 450 dygns ålder för betong med 10% silikastoft:

$$\left\{\frac{w_n}{w_0}\right\}_{450} = 0.61\bullet(1-vct) \qquad \text{för } 0.22<vct<0.48 \qquad \text{----------(8.15)}$$

Den empiriskt funna maximala hydratationsgraden är således större för betong utan silikastoft än för betong med silikastoft. För betong med 10% silikastoft förefaller den maximala hydratationsgraden vara störst vid ca 90 dygns ålder för att sedan minska med tiden; se även kapitel 3 och 4.

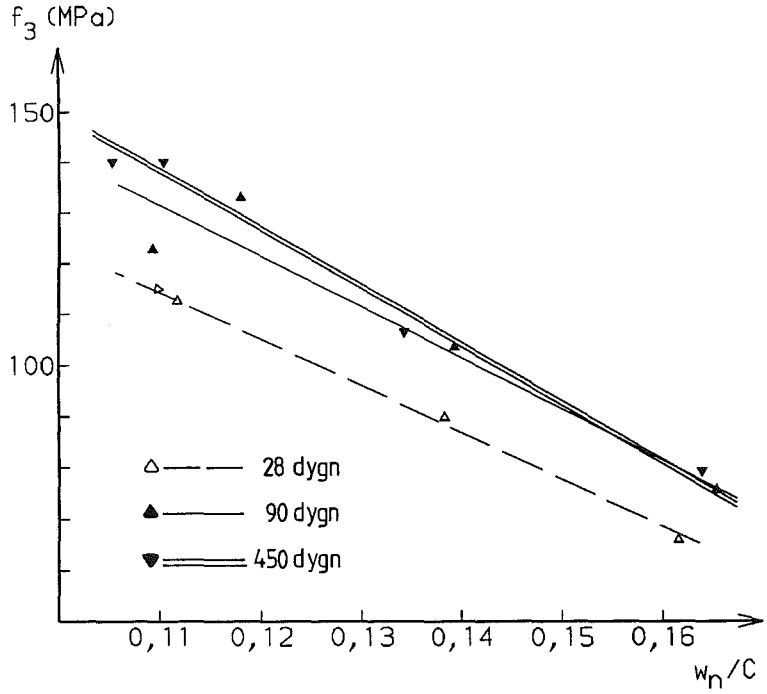


Figur 8.17. Medelvärde av faktorn w_n/w_0 som funktion av vct för alla härdningssätten.

Figure 8.17. Mean value of the parameter w_n/w_0 as function of water-cement ratio at all three types of curing.

Tryckhållfasthet och hydratation:

I figur 8.18 visas tryckhållfastheten hos utborrade självtorkade prover, f_3, som funktion av w_n/C. Betong med 10% silikastoft.



Figur 8.18 Tryckhållfastheten hos utborrade självtorkade prover, f_3, som funktion av kvoten mellan hydratvatten och cement, w_n/C. Betong med 10% silikastoft.

Figure 8.18 Compressive strength of self-desiccating drilled cores, f_3, as function of ratio of non- evaporable water to cement, w_n/C. 10% silica fume.

Ett lineärt samband konstaterades mellan tryckhållfastheten, f_3, och kvoten, w_n/C, när betongen innehöll 10% silikastoft (MPa):

$$f_3=E\bullet(F-w_n/C) \qquad \text{----------(8.16)}$$

Konstanterna E och F erhålls ur tabell 8.8.

Tabell 8.8 Konstanter E (MPa) och F i ekv. (8.16)

Ålder	E (MPa)	F
28 dygn	920	0.235
90 dygn	1040	0.240
450 dygn	1160	0.230

Figur 8.19 visar tryckhållfastheten för utborrade cylindrar, f_3, som funktion av kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_0. Blandningsnummer och härdningssätt anges i figuren. Varje markering motsvarar 12 mätvärden. Ur figur 8.19 erhölls följande relation mellan tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar, f_3, och kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o, då 10% silikastoft ingick i betongen (MPa):

$$f_3=376\bullet(w_n/w_o-0.104) \quad \text{för } 0.30<w_n/w_o<0.65 \qquad \text{----------(8.17)}$$

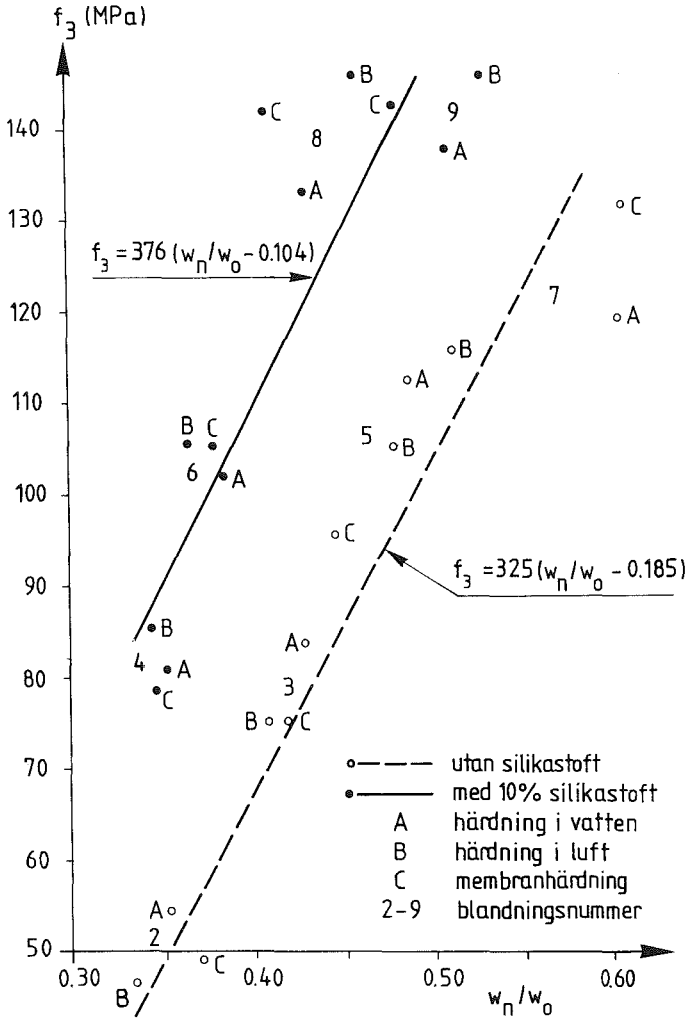
Vidare erhölls för betong utan silikastoft följande relation mellan tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar, f_3, och kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o (MPa):

$$f_3=325\bullet(w_n/w_o-0.185) \quad \text{för } 0.30<w_n/w_o<0.65 \qquad \text{----------(8.18)}$$

Silikastoft och tryckhållfasthet:

Inverkan av silikastofttillsats (10% av cementinnehållet) på betongens tryckhållfasthet, $f_{3,silikastoft}$, kan enklast konstateras genom subtraktion av ekvation (8.17) med ekvation (8.18) varvid erhålles (MPa):

$$f_{3,silikastoft}=51\bullet(w_n/w_o+0.41);\ 0.30<w_n/w_o<0.65 \qquad \text{---------(8.17a)}$$



Figur 8.19 Tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar, f_3, som funktion av kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o. Ålder: 450 dygn.

Figure 8.19 Compressive strength of drilled cores, f_3, as function of ratio of nonevaporable to mixing water, w_n/w_o. Age: 450 days.

Polymerisation och tryckhållfasthet:

Det är av intresse att jämföra figur 8.13 med figur 8.19. Man erhåller då uppfattning om den inverkan som polymerisationen har på långtidsutvecklingen av tryckhållfastheten hos betongen. Veterligt gör sig polymerisationen av betongen först gällande efter 90 dygns ålder; **Zhang och Gjörv (1991)** samt figur 8.16. Ekv. (8.5) avser betong med 10% silikastoft vid 28 och 90 dygns ålder medan ekv. (8.17) ger ett samband mellan tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar, f_3, och kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o, vid 450 dygns ålder då 10% silikastoft ingår i betongen. Genom att subtrahera ekv. (8.5) från ekv. (8.17) kan man således erhålla ett samband för den inverkan som polymerisationen har på tryckhållfastheten mellan 90 och 450 dygns ålder, $f_{3,polymerisation}$ (MPa):

$$f_{3,polymerisation}=104\bullet(w_n/w_o-0.24) \text{ för } 0.30<w_n/w_o<0.65 \quad ---(8.19)$$

För en normal betong med 10% silikastoft ($w_n/w_o=0.34$) ger polymerisationen exempelvis ett hållfasthetstillskott av 10 MPa medan ökningen i tryckhållfasthet för en betong med lågt vct ($w_n/w_o=0.44$) blir dubbelt så stor (20 MPa).

Ballast och tryckhållfasthet:

Man erhåller en uppfattning om ballastens inverkan på tryckhållfastheten genom att jämföra figurerna 8.5 (**Powers, 1948**), 8.13 och 8.19. För betong utan silikastoft finner man mycket snarlika ekvationssamband mellan tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar, f_3, och kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o, vid 28, 90 och 450 dygns ålder, jfr ekv. (8.6) med ekv. (8.18). Som ett gemensamt samband erhölls relationen (MPa):

$$f_3=309\bullet(w_n/w_o-0.183) \quad \text{för } 0.30<w_n/w_o<0.65 \quad ----------(8.20)$$

För att jämföra ekv. (8.7) med ekv. (8.20) används lämpligen omräkningsfaktorer av tryckhållfastheten hos högpresterande betong enligt **Berglund (1992)**. I detta fall skall tryckhållfastheten hos en kub med sidan 50 mm, f_c, omräknas till tryckhållfastheten hos en cylinder med diameter 40 mm och längd 80 mm, f_3. Detta kan med mycket litet fel anses motsvara omräkning av tryckhållfastheten hos en kub med sidan 150 mm till en cylinder med diameter 150 mm och längd 300 mm enligt följande samband (MPa):

$$f_c=1.14\bullet(f_3-6.5) \qquad \text{för } 40<f_3<140 \text{ MPa} \qquad \text{----------(8.21)}$$

Efter insättning av ekv. (8.21) i ekv. (8.7) erhålles följande relation mellan cylindertryckhållfastheten hos cementpasta, f_3, och kvoten mellan hydratvatten och blandningsvatten, w_n/w_o:

$$f_3\approx211\bullet(w_n/w_o-0.136) \qquad \text{för } 0.10<w_n/w_o<0.60 \qquad \text{----------(8.22)}$$

Berglund (1992) använde sig, vid beräkning av omräkningsfaktorerna, av exakt samma typ av ballast och bindemedel som använts i detta projekt. Vid undersökningen enligt **Powers (1948)** användes en ren cementpasta baserad på ett cement med lågt C_3A-innehåll. Således kan man med ett inte alltför stort fel erhålla ballastens inverkan på tryckhållfastheten, $f_{3,ballast}$, hos högpresterande betong utan silikastoft, genom subtraktion av ekv. (8.20) med ekv. (8.22):

$$f_{3,ballast}\approx98\bullet(w_n/w_o-0.28) \qquad \text{för } 0.30<w_n/w_o<0.60 \qquad \text{--------(8.23)}$$

Porfyllnadsgrad vid självuttorkning och hydratation:

Även vid långtidsuppföljningen studerades sambandet mellan relativ fuktigheten, RF och porfyllnadsgraden vid självuttorkning, S_0, jfr ekv. (4.8), (4.10) och (8.8) ovan samt sambandet i ekv. 8.9. För betong med 10% silikastoft erhölls vid 450 dygn (%):

$$RF = \frac{255}{S_0} \bullet (1.43 - \frac{1}{S_0}) \quad \text{för } 0.82<S_0<0.92 \qquad \text{----------(8.24)}$$

För betong utan silikastoft erhölls vid 450 dygn (%):

$$RF = \frac{180}{S_0} \bullet (1.61 - \frac{1}{S_0}) \quad \text{för } 0.78<S_0<0.88 \qquad \text{----------(8.25)}$$

Inverkan av silikastoft på relativa fuktigheten, $\delta RF_{silikastoft}$, erhölls genom subtraktion av ekv. (8.25) med ekv. (8.24), (%):

$$\delta RF_{silikastoft} = \frac{75}{S_0} \bullet (\frac{1}{S_0} - 1) \quad \text{för } 0.82<S_0<0.88 \qquad \text{----------(8.26)}$$

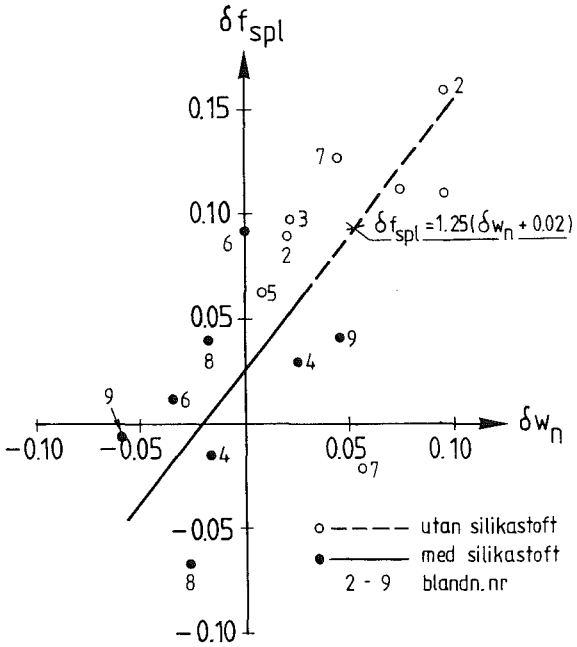
Vid en porfyllnadsgrad av 0.85 erhölls exempelvis 16% lägre relativ fuktighet i betongen, då den innehöll 10% silikastoft räknat på cementinnehållet, jämfört med betong utan silikastoft.

Spräckhållfasthet och hydratation:

I figur 8.20 visas spräckhållfastheten vid 450 dygn i relation till värdet vid 90 dygn, δf_{spl}, resp. spräckhållfastheten vid 90 dygn i relation till värdet vid 28 dygn, bägge som funktion av mängden kemiskt bundet vatten vid 450 dygns ålder i relation till värdet vid 90 dygn, δw_n, resp. mängden kemiskt bundet vatten vid 90 dygns ålder i relation till värdet vid 28 dygn. Blandningsnummer ges i figuren. Totalt baseras figuren på 648 mätvärden. Ett svagt lineärt samband konstaterades mellan utvecklingen av spräckhållfasthet, δf_{spl}, och utvecklingen av kemiskt bundet vatten, δw_n:

$$\delta f_{spl} = 1.25 \bullet (\delta w_n + 0.02) \qquad \text{----------(8.27)}$$

En ökning av hydratvattenmängden gav således en ökad spräckhållfasthet undantaget blandning 7 (vct=0.25; betong utan silikastoft). Sambandet (8.27) uppvisade dock en dålig signifikans.



Figur 8.20 Spräckhållfastheten vid 450 dygn i relation till värdet vid 90 dygn, δf_{spl}, resp spräckhållfastheten vid 90 dygn i relation till värdet vid 28 dygn, bägge som funktion av mängden kemiskt bundet vatten vid 450 dygn i relation till värdet vid 90 dygn, δw_n, resp mängden kemiskt bundet vatten vid 90 dygn i relation till värdet vid 28 dygn. (648 st mätvärden)

Figure 8.20 Development of split strength between 28 and 90 days of age and between 90 and 450 days of age, δf_{spl}, as function of development of chemically bound water, δw_n. (648 measurements)

Analogt med kapitel 3, där det visades att hydratationen gav upphov till en minskning av volymen hos det kemiskt bundna vattnet med ca 24%, torde en dehydratation kunna ge upphov till en ökning av volymen hos det kemiskt bundna vattnet då det avges. Denna ökning av volymen, då det kemiskt bundna vatten avges, skulle i sånt fall kunna förklara en nedgång av spräckhållfastheten beroende av inre tryckspänningarna.

8.5.3 Slutsatser

Långtidsuppföljningen visade att en nedgång av hydratvattenmängden ägde rum efter 90 dygns ålder då silikastoft (10% av cementinnehållet) ingick i betongen. Orsaken till nedgången i hydratvattenmängd är inte helt klarlagd. Troligen beror den på polymerisation av betongen. Utan silikastoft i betongen växte däremot hydratvattenmängden även efter 90 dygns ålder.

Vid långtidsuppföljningen konstaterades det, liksom vid huvudförsöket, ett lineärt samband mellan å ena sidan kvoten mellan mängden hydratvatten och mängden blandningsvatten och å andra sidan tryckhållfastheten hos utborrade cylindrar (av identiskt samma prov från vilket hydratationen bestämdes).

Vidare ställdes det upp relationer för inverkan av silikastoft respektive av polymerisation på betongens tryckhållfasthet samt en relation för ballastens inverkan på tryckhållfastheten hos betongen.

Slutligen konstaterades det ett (svagt) samband mellan minskningen av hydratvattenmängden i betongen och minskningen av betongens spräckhållfasthet. En dehydratation torde kunna ge upphov till en ökning av volymen hos det kemiskt bundna vattnet vilket i sin tur skulle kunna förklara uppkomsten av inre tryckspänningar i betongen med minskande spräckhållfasthet som följd.

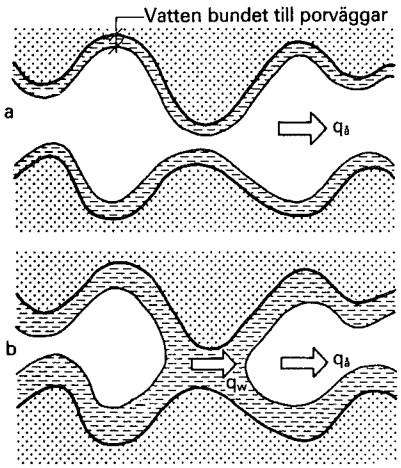
9. FUKTDIFFUSIVITET OCH KAPILLARITET

9.1 Teori

9.1.1 Diffusivitet

Fukt vandrar från en fuktigare del av betongen till en torrare. Transporthastigheten bestäms av en s k diffusivitet vars storlek dels beror på betongkvaliteten men även av fukttillståndet.

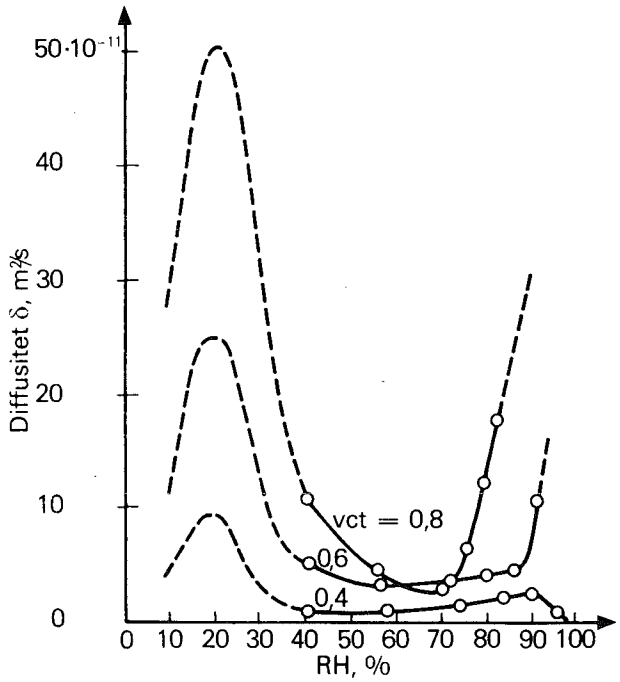
Vid låga värden på relativa fuktigheten, RF, anses fukttransporten i normal betong huvudsakligen ske genom ren ångdiffusion i porluften, $q_å$, se figur 9.1. Vid högre RF sker även transport i vattenfas, q_w, se figur 9.1; **Fagerlund (1980A)**.



Figur 9.1 Vattentransport i en por- principiellt. a: låg RF, b: hög RF. Fagerlund (1980A)

Figure 9.1 Water transport in pores in principle. a: low relative humidity, RH, b: high RH. Fagerlund (1980A)

Eftersom transportmekanismen av fukt i betong är så olika vid låga RF och vid höga, kommer diffusiviteten att variera kraftigt med RF. I figur 9.2 visas diffusiviteten som funktion av RF och vct för cementbruk; **Nilsson (1977)**. Diffusivitetens RF-beroende minskar vid låga vct, vilket är rimligt eftersom man vid låga vct i stort sett saknar grövre kapillärporer.



Figur 9.2 Diffusivitet, δ_w, för cementbruk av olika vct som funktion av RF. Nilsson (1977)

Figure 9.2 Diffusivity, δ_w, of cement mortar at different water-cement ratios as function of relative humidity. Nilsson (1977)

Fuktdiffusiviteten kan enl. **Fagerlund (1980A)** beskrivas på tre olika sätt:

$$q = -\delta_w \cdot \frac{dw_e}{dx} \qquad \text{----------(9.1)}$$

$$q = -\delta_p \cdot \frac{dp}{dx} \qquad \text{----------(9.2)}$$

$$q = -\delta_c \cdot \frac{dc}{dx} \qquad \text{----------(9.3)}$$

där

q är flödet i $kg/m^2 \cdot s$.

$\frac{dw_e}{dx}$, $\frac{dp}{dx}$ och $\frac{dc}{dx}$ är fuktgradienten uttryckt i vattenhalt (kg/m^3), ångtryck (Pa) resp. ånghalt (kg/m^3). Följande samband råder mellan de tre transportkoefficienterna:

$$\delta_p = \delta_w \cdot \frac{dw_e}{d(RF)} \cdot \frac{1}{p_0} \qquad \text{----------(9.4)}$$

där

$\frac{dw_e}{d(RF)}$ är lutningen på sorptionsisotermen vid aktuell RF-nivå

p_0 är mättnadsångtrycket vid aktuell temperatur.

$$\delta_c = \frac{\delta_p \cdot (273.2+T)}{2.17 \cdot 10^{-3}} \qquad \text{----------(9.5)}$$

Samtliga transportkoefficienter kallas "diffusivitet". Koefficienterna δ_c och δ_p kallas ibland även "ångpermeabilitet" eller "ånggenomsläpplighet".

Transportkoefficienterna δ_c och δ_p bestäms enklast genom den s k koppmetoden; **Nilsson (1980), Hedenblad (1991C)**.

Transportkoefficienten δ_w kan bestämmas med den s k sorptionsmetoden. Man följer då uttorkningen av en enaxiellt torkande betongskiva. Den mätta uttorkningskurvan jämförs med den ur diffusionsteorin beräknade teoretiska kurvan. Kurvorna uttrycks i dimensionslös form genom användning av den s k fuktpotentialen U_m och det s k Fouriertalet F_0. U_m anger andelen verkligen uttorkad fukt av den totala fuktmängden som torkar ut vid jämvikt. Fouriertalet definieras

$$F_0 = \frac{\delta_w \cdot t}{h^2} \qquad \text{----------(9.6)}$$

där

t är torktiden (s)
h är skivans halva tjocklek.

Uttorkningskurvan är entydigt bestämd av F_0 och U_m; **Fagerlund (1980A)**. Genom att mäta fuktpotentialen efter en viss tids torkning kan man direkt ur den teoretiska uttorkningskurvan bestämma Fouriertalet varefter δ_w kan beräknas ur ekv. (9.6). δ_w-värdet blir något beroende vid vilken fuktpotential det bestäms. Normalt används U_m=0.50 dvs den tid när halva uttorkningen skett.

9.1.2 Kapillaritet

Kapillaritetsegenskaperna definieras av de bägge koefficienterna m och k. Dessa definieras av

$$m = \frac{t}{z^2} \qquad \text{----------(9.7)}$$

där

m är motståndstalet (s/m^2)
t är tiden det tar för vätskefronten att tränga in sträckan z (m).

$$k = \frac{W_a}{\sqrt{t}} \qquad \text{----------(9.8)}$$

där

k är kapillaritetstalet ($kg/(m^2 \bullet \sqrt{s})$)
W_a är uppsugen vattenmängd (kg/m^2)
t är tidsrymden för uppsugning (s)

Följande samband råder mellan m och k:

$$k = \frac{1000 \bullet P_K}{\sqrt{m}} \qquad \text{----------(9.9)}$$

där

P_K är den aktiva porositeten, dvs den porositet som fylls med kapillärvatten under uppsugningen (m^3/m^3)

Kapillaritetsdata kan bestämmas med metoden som visas i figur 9.3. Motståndstalet ges av den s k "knickpunktstiden", t_k, när fuktfronten nått överytan dvs enligt ekv. (9.7)

$$m = \frac{t_K}{H^2} \qquad \text{----------(9.10)}$$

där

H är provkroppstjockleken (m)

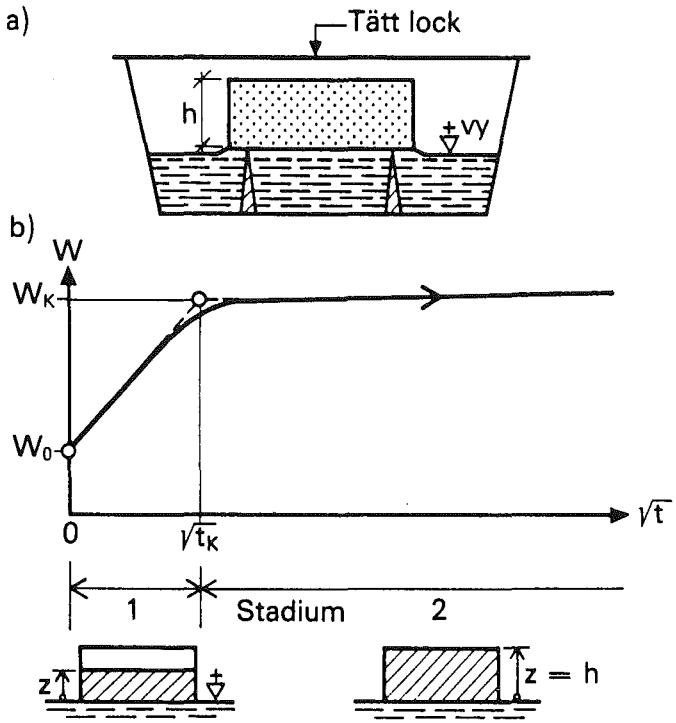
Kapillaritetstalet fås enligt ekv. (9.8) ur

$$k = \frac{W_K - W_0}{\sqrt{t_K}} \cdot \frac{1}{A} \qquad \text{----------(9.11)}$$

där

W_K och W_0 är provkroppsvikten vid knickpunkten resp. före sugningen start (kg)

A är sugytan storlek (m^2)



Figur 9.3 Metod för bestämning av kapillaritetsdata. Fagerlund (1980)

Figure 9.3 Method for determining capillarity data. Fagerlund (1980)

9.2 Tidigare undersökningar betr diffusivitet och kapillaritet

9.2.1 Diffusivitet

Becker och MacInnis (1973) analyserade krympförloppet hos ett stort antal betonger och beräknade därur en variation i diffusiviteten, δ_w, definierad enligt ekv. (9.1), mellan $30 \cdot 10^{-12}$ och $116 \cdot 10^{-12}$ m^2/s. $63 \cdot 10^{-12}$ m^2/s redovisades som ett medelvärde för normal betong.

Hedenblad (1991B) genomförde ett stort antal mätningar på betong med vct=0.4 baserade på koppmetoden. Vid RF= 33% på ena sidan provkroppen och vatten på andra sidan, erhölls en medeldiffusivitet, δ_c, definierad enligt ekv. (9.3) av storleksordningen $2 \cdot 10^{-7}$ till $3 \cdot 10^{-7}$ m^2/s.

Persson (1991D) sammanställde av danska forskare framtagna värden på ångpermeabiliteten, δ_c, för cementpasta med vbt_{eff}= 0.35. δ_p varierande mellan $6.4 \cdot 10^{-14}$ (28 dygns membranhärdning) och $9.3 \cdot 10^{-14}$ kg/Pa•m•s (4 dygns membranhärdning) dvs en ångpermeabilitet, δ_c, varierande mellan $0.009 \cdot 10^{-6}$ och $0.013 \cdot 10^{-6}$ m^2/s. 10% silikastoft och 3% flygaska, räknat på cementinnehållet, ingick därvid i pastan.

9.2.2 Kapillaritet

I tabell 9.1 ges värden ur **Fagerlund (1980A)** på kapillariteten och motståndstalet hos betong av Portlandcement

Tabell 9.1 Värden på kapillariteten, k, och motståndstalet, m, hos betong av Portlandcement; Fagerlund (1980)

Hållfast-	Vct	m	k_{max}	k_{90}
hetsklass		s/m^2	$kg/(m^2 \cdot \sqrt{s})$	$kg/(m^2 \cdot \sqrt{s})$
K40	0.5	$48 \cdot 10^6$	0.013	0.005
K30	0.6	$31 \cdot 10^6$	0.019	0.007
K25	0.7	$17 \cdot 10^6$	0.028	0.012

k_{max} är maximala kapillaritetstalet. Erhålls när betongen står i jämvikt vid ca 50% RF vid sugningens start.

k_{90} är kapillaritetstalet när betongen står i jämvikt vid ca 90% RF vid sugningens start

9.3 Mätningar av diffusivitet och kapillaritet

9.3.1 Allmänt- provberedning

Provade betonger:

På ett tidigt stadium av försöket stod det klart att högpresterande betong har en anmärkningsvärt stor självuttorkning, även då betongytan exponeras för vatten. En förklaring till detta fenomen kan ligga i att högpresterande betong har betydligt lägre diffusivitet och kapillaritet än normal betong. Ett smärre försök att bestämma dessa parametrar genomfördes därför. Hälften av betongskivorna var då gjutna varför undersökningen fick avgränsas till att omfatta blandningarna 3B, 5B, 7B och 9A. Recept ges i tabell 9.2. Provkropparna göts i form av cylindrar med diametern 100 mm och längden 200 mm.

Tabell 9.2 Översiktliga betongrecept. Se även tabell 5.2

Blandning	Cement	Silika-stoft	Ballast (kg/m^3)		SP 62	Vct	Vbt
no	(kg/m^3)	(kg/m^3)	0-8	8-12	(kg/m^3)		
3B	302		844	1149	3.01	0.47	0.47
5B	398		721	1213	3.35	0.33	0.33
7B	454		628	1305	8.84	0.25	0.25
9A	482	48	524	1357	13.32	0.22	0.20

SP 62= flyttillsats, torrvikt

Diffusivitet:

Dagen efter gjutning kapades 5 st skivor med ca 15 mm i tjocklek ur vardera betongcylinder. Dessa skivor användes för att bestämma diffusiviteten hos ung betong med början vid åldern 1 dygn.

Resterande del av cylindrarna användes för att undersöka diffusiviteten hos välhärdad betong. Cylinderdelen lagrades därför först i vatten under 250 dygn. Därefter kapades det skivor med ca 15 och 45 mm i tjocklek ur de vattenlagrade cylindrarna. Kanterna på skivor med tjocklek 45 mm, belades med 2 mm epoxi, EP91 (egenskaper enligt DATARAPPORT TVBM-7011; 2.8). Hos skivor med stor tjocklek i förhållande till diametern kan eljest fukttransporten genom skivans kant påverka resultatet.

Kapillaritet:

De skivor, av tjockleken 15 mm, som använts för bestämning av den unga betongens diffusivitet och den välhärdade betongens diffusivitet, användes vid ca 560 dygns ålder i ett kapillaritetsförsök (dvs 6 st skivor ur vardera blandningen 3B, 5B, 7B och 9A). Skivorna hade då nått jämvikt med omgivningen (RF=33% och koldioxidfri miljö).

Skivorna av tjockleken ca 45 mm från försöket med diffusivitet hos välhärdad betong användes vid 750 dygns ålder i ytterligare ett kapillaritetsförsök. Uttorkningen pågick fortfarande, vid kapillaritetsförsökets start, i de skivor som hade lågt vct.

9.3.2 Mätmetod för diffusivitet och felkällor

Mätmetod:

Diffusiviteten bestämdes med sorptionsmetoden; se avsnitt 9.1.1. Såväl skivor av tjockleken ca 15 mm som skivor av tjocklek ca 45 mm användes. Efter provberedning, som alltså skedde vid 1 resp. 250 dygns ålder, uttorkades skivorna därför i RF=33 % och koldioxidfri miljö. Viktsminskningskurvan, för skivor av tjockleken ca 15 mm, bestämdes under så lång tid att vikten stabiliserat sig.

Diffusiviteten bestämdes genom jämförelse med den s k teoretiska uttorkningskurvan och användning av Fouriertalet enligt ekv. (9.6). Fuktdiffusiviteten baseras på de bägge uttorkningsnivåerna- fuktpotentialerna- av 50% resp. 20%. Man erhåller på detta sätt enbart ett medelvärde på diffusiviteten men inte dess fuktberoende. Provkropparna användes därefter i försök med kapillaritet.

Felkällor:

1) RF-nivå

Stickprovsvis har utrymmet i vilket provkropparna förvarades, kontrollerats medelst RF-givare typ Vaisala. Noggrannheten i RF-nivå har varit ± 2 % dvs inom toleransområdet. Det för uttorkningen använda saltet ger en mycket stabil RF-nivå så länge olöst salt plus vatten finns kvar i lösning.

2) Koldioxid

Som absorbent av koldioxid har bariumhydroxid använts. Någon koldioxid har ej kunnat uppmätas i utrymmet där provkropparna förvarades. Eftersom provkropparnas vikt ej heller ökat på lång sikt behöver man ej befara att koldioxid varit närvarande. Karbonatisering torde således ej ha skett. Effekten av karbonatisering är dessutom liten p g a provernas storlek.

3) Vågfel

Kalibrering med vikt om 10 mg har utförts före varje vägning.

4) Dehydratation

Långtidsuppföljningen av hydratationsutvecklingen i kapitel 8 visar att det sker en dehydratation hos betong med tillsats av silikastoft. Dehydratationen blir tydlig efter 90 dygns ålder. För blandning 9, som innehåller silikastoft, innebär dehydreringen att den förångningsbara vattenmängden ökas men detta torde inte påverka den uttorkade vattenmängden. Dehydreringen påverkar således enbart fuktpotentialen men eftersom utvecklingen följs experimentellt fås inget fel i beräknad diffusivitet.

9.3.3 Mätmetod för kapillaritet och felkällor

Mätmetod:

Försöksuppställningen framgår principiellt av figur 9.3. Det täta locket i figur 9.3 utgjordes av en glasskiva medan stöden för den provade skivan utgjordes av plastribbor. Först fastställdes startvikten dvs vikten från slututtorkning enligt avsnitt 9.3.2. Därefter utfördes vägning efter följande tidsrymder från starttidpunkten räknat:

* 1 minut, 5, 15 och 30 minuter
* 1 timme, 5 och 24 timmar
* 2, 4, 6, 8, 10, 110 och 190 dygn

Före varje vägning avtorkades skivan med en fuktig wettexduk. Mätmetoden användes både för skivor av tjockleken ca 15mm och för skivor av tjockleken ca 45 mm.

Felkällor:

Det är viktigt att alla provkroppar hanteras exakt på samma sätt vid vägning resp då de läggs ned i vattnet. Samma laborant har därför stått för hela försöket och varit noggrann vid t ex avtorkning av skivorna resp med att tillse att någon luftbubbla ej bildats under provkroppen.

9.3.4 Resultat av diffusivitetsmätningar med diskussion

Samtliga mätdata redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011, 9.1-9.2, där även diffusiviteten, δ_W, uträknats enligt ekvation (9.6). För betongblandning 3B bestämdes uttorkningstiden grafiskt med hjälp av uttorkningskurvan eftersom mätdata saknades den närmaste tiden efter torkstart. Data redovisas även i tabell 9.3 och i figur 9.9.

Tabell 9.3 Uppmätt diffusivitet, δ_W, ålder 1-250 dygn.

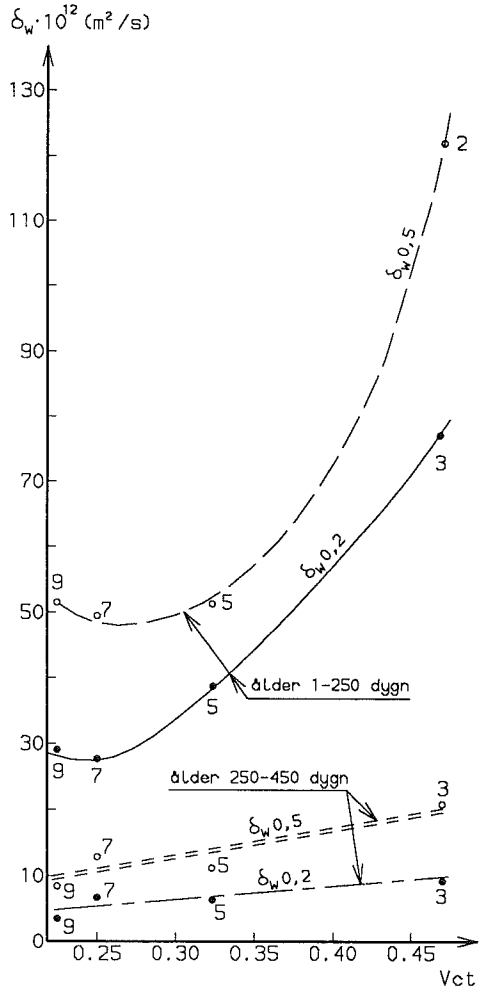
Blandning	Diffusivitet, $\delta_W \cdot 10^{12}$ (m_2/s)			
littera	Ålder 1-250 dygn		Ålder 250-500 dygn	
	$\delta_{W0.2}$	$\delta_{W0.5}$	$\delta_{W0.2}$	$\delta_{W0.5}$
3B	76	122	13.0	20.0
5B	39	51	7.3	10.5
7B	28	49	7.2	12.0
9A	29	51	3.5	7.0

$\delta_{W0.2}$ betecknar diffusiviteten vid uttorkning av 80% av överskottsvattnet (fuktpotential 20%).

$\delta_{W0.5}$ betecknar diffusiviteten vid uttorkning av hälften av överskottsvattnet (fuktpotential 50%).

Värdena i tabell 9.3 redovisas även i figur 9.6. De uppmätta diffusivitetsvärdena, δ_W, enligt figur 9.4 är lägre än värdena enligt **Becker och MacInnis (1973)**; se 9.2.1. Anledningen är med all säkerhet att här använd betong hade ett lägre vct jämfört med de betonger som ingick i Becker och MacInnis analys.

De uppmätta diffusivitetsvärdena stämmer dock väl med värdena för cementbruk enligt figur 9.2. För vct=0.40 fås enligt figur 9.2, diffusivitetsvärden varierande mellan $10 \cdot 10^{-12}$ och $30 \cdot 10^{-12}$ m_2/s medan de i denna undersökning erhållna värdena varierar mellan $10 \cdot 10^{-12}$ och $70 \cdot 10^{-12}$ m_2/s. En orsak till de högre värdena i denna undersökning kan vara att de baserar sig på betong medan figur 9.2 baseras på bruk.



Figur 9.4 Fuktdiffusiviteten, δ_W, som funktion av vct. (Blandningsnummer anges i figuren).

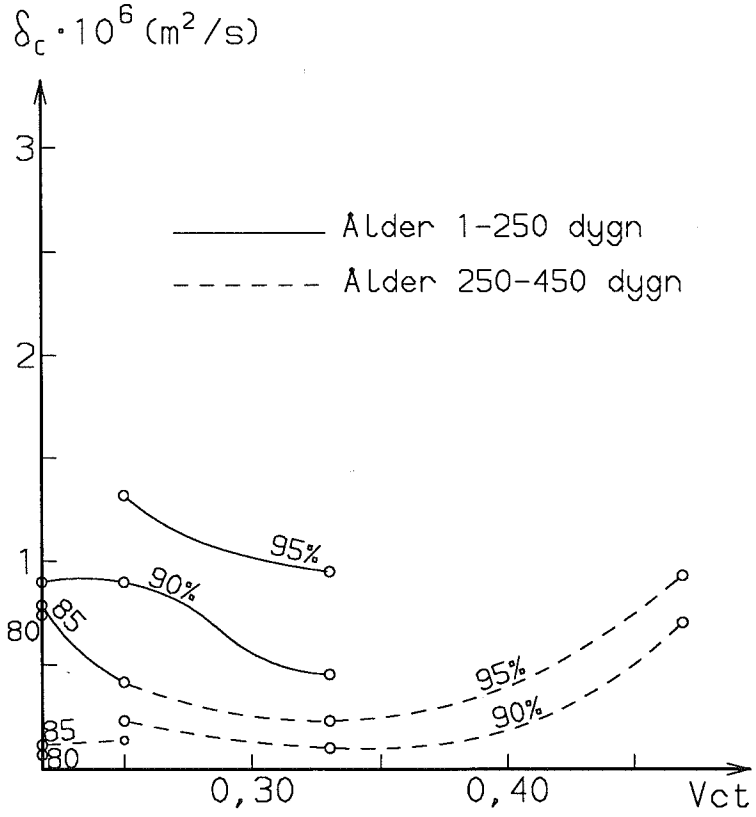
Figure 9.4 Moisture diffusivity, δ_W, as function of water-cement ratio. (Batch number indicated).

Förklaringen till de lägre värdena på diffusiviteten för högpresterande betong torde ligga i en tätare mikrostruktur. VTT i Finland (**Pyy, 1990**) fick därför i uppdrag att utföra tunnslip dels av en betong med vct=0.60, utan silikastoft, dels av betong från aktuellt försök, blandning 8 med vct=0.24 och 10% silikastoft. Resultaten redovisas i bilaga 9. Bildernas korta sida är 1 mm varför förstoringsgraden är ca 100 ggr.

Betongen med vct=0.60, har en ljus och därmed porös cementpasta där fukt lätt kan passera. Vidare finns övergångszoner mellan pasta och ballast, vilka även dessa medger passage av fukt. Betongen med vct=0.24 i bilaga 9 har en mycket tät pasta med låg porositet samt en skarp övergång mellan pasta och ballast där fukttransporten uppenbarligen hämmas.

I figur 9.5 visas diffusiviteten eller ångpermeabiliteten, δ_c, som funktion av vct i RF-området 80-95%. Beräkningen utfördes enligt ekvation 9.4 med lutning för isotermen enligt avsnitt 4; figur 4.5. Diffusiviteten, $\delta_{W0.5}$, användes eftersom beräkningen utfördes för höga RF. Såväl ålder 1-250 dygn som 250-450 dygn betraktades.

Ångpermeabiliteten, δ_c, förefaller att ha ett minimum för vct≈0.33, vilket skulle kunna förklaras av att gjutbarheten försämras vid lägre vct än 0.33. Vid RF=90% och vct=0.4 är värdena på ångpermeabiliteten, δ_c, av samma storleksordning som värdena enligt **Hedenblad (1991B)**; se 9.2.1.



Figur 9.5 Ångpermeabiliteten, δ_c, som funktion av vct. Relativ fuktighet anges i figuren.

Figure 9.5 Moisture permeability, δ_c, as function of water-cement ratio. Relative humidity indicated.

9.3.5 Resultat av kapillaritetsmätningar med diskussion

I tabell 9.4 redovisas medelvärdet av uppsugen mängd vatten i 6 st skivor med en tjocklek av ca 15 mm. Betongålder vid sugningens start var ca 560 dygn. Medeltjockleken för 6 st skivor redovisas i tabellen.

Tabell 9.4 Totalt uppsugen mängd vatten (g). Medelvärde för 6 st skivor. Sugstart vid 560 dygns ålder.

	Blandning littera			
Sugtid	3B	5B	7B	9A
1 min.	10	5	4	4
5	19	10	7	7
15	29	16	11	11
30	39	22	14	14
1 tim.	54	32	19	18
5	66	47	31	27
24	70	50	39	34
2 dygn	70	52	41	37
4	71	54	41	39
6	72	54	42	40
8	72	55	42	41
10	72	55	43	41
110	76	58	46	47
190	76	59	47	48
Ursprungligen uttorkat	73	53	41	41
Medelprovtjocklek (mm)	15.8	15.2	15.6	16.4

Samma data uppritas i figur 9.6 med tiden i kvadratrotsskala.

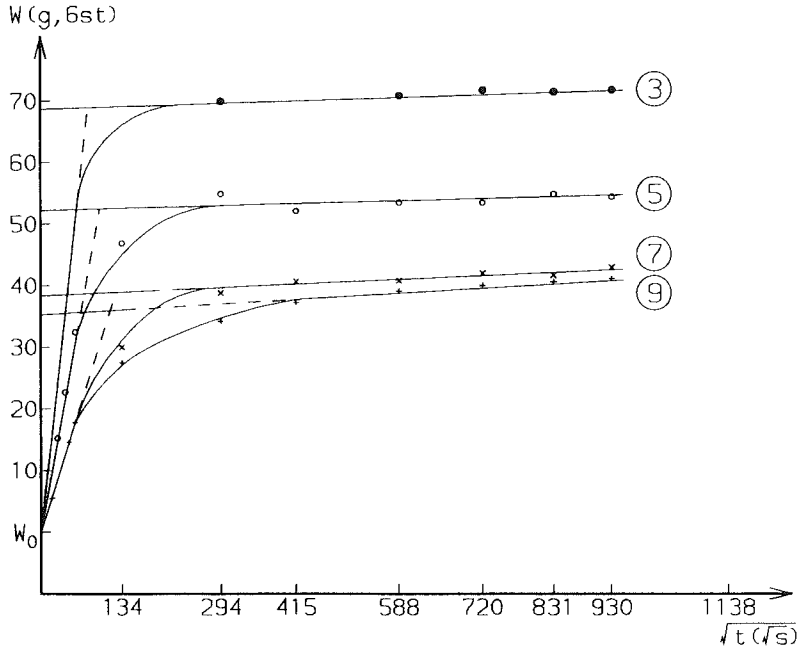
I tabell 9.5 redovisas med ekv. (9.10) och (9.11) beräknade värden på kapillariteten, k, och motståndstalet, m. I tabellen anges också värden på hydratationsgraden α baserad på mätningar av w_n/C och under antagande av att fullständig hydratation innebär att $w_n/C=0.25$ dvs $\alpha=4\bullet w_n/C$. Parametrarna P_k och $(P_k)_p$ i tabellen utgör kapillära porositeten resp pastans kapillära porositet, vilka definieras av **Fagerlund (1980A)**:

$$P_k = \frac{k\bullet\sqrt{m}}{1000} \qquad \text{---------- (9.12)}$$

$$(P_k)_p = \frac{vct-0.39\bullet\alpha}{0.32+vct} \qquad \text{---------- (9.13)}$$

Tabell 9.5 Resulterande kapillaritetsdata

Blandn.	Vct	Vbt	m	k	α	P_k	$(P_k)_p$
littera			(s/m^2)	$(kg/m^2\sqrt{s})$	$(4 \cdot w_n/C)$		
3B	0.465	0.465	$2.4 \cdot 10^7$	0.019	0.77	0.093	0.21
5B	0.326	0.326	$4.3 \cdot 10^7$	0.011	0.62	0.072	0.13
7B	0.251	0.251	$6.4 \cdot 10^7$	0.0065	0.51	0.052	0.091
9A	0.222	0.202	$4.9 \cdot 10^7$	0.0065	0.45	0.046	0.086



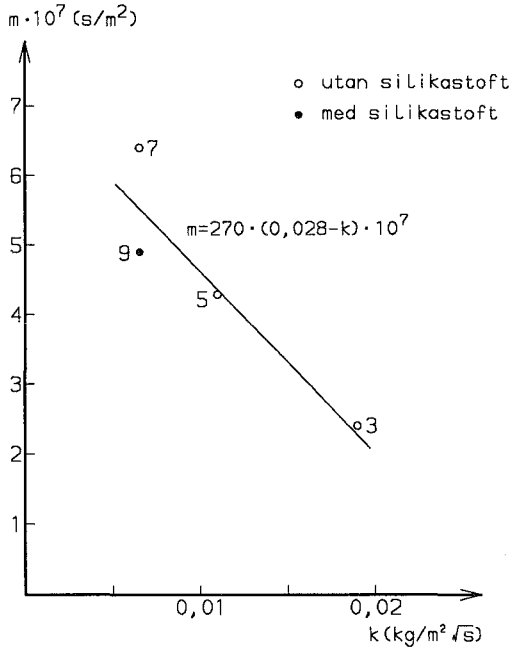
Figur 9.6 Totalt uppsugen vattenmängd i 6 st betongskivor per blandning som funktion av kvadratroten ur sugtiden. (Blandningsnummer anges i figuren).

Figure 9.6 Total water suction of 6 circular discs (15 mm thick) as function of square root of suction time. (Batch number indicated).

Resultaten enligt figur 9.6 visar att en tydlig knickpunkt alltid erhålles dvs mätmetoden kan tillämpas på högpresterande betong för skivor med en tjocklek av 15 mm. En långtidsuppföljning som gjordes på skivor med tjockleken 45 mm visar om metoden kan tillämpas för lite större skikttjocklekar; se 9.4.

I figur 9.7 visas motståndstalet, m, som funktion av kapillaritetstalet, k. Följande samband gäller (s/m^2):

$$m=270\bullet(0.028-k)\bullet10^7 \qquad (9.14)$$

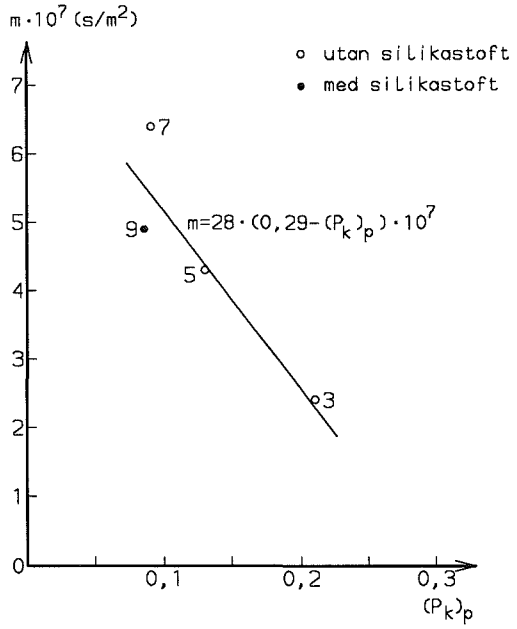


Figur 9.7 Motståndstalet som funktion av kapillaritetstalet (Blandningsnummer anges i figuren).

Figure 9.7 Value of resistance to water penetration, m, as function of coefficient of capillarity, k. (Batch number indicated).

Vid mycket tät betong dvs vid låga värden på k, är ekvationen osäker. Tidigare bestämningar av värden maximala kapillaritetstalet, k, resp motståndstalet, m (tabell 9.1) är 10-25% högre än värdena enligt ekv (9.14). Vid sugning från en jämvikts-RF av 90% är dock tidigare bestämda värden på kapillaritetstalet, k, hälften så höga som de som ges av ekv (9.14). Den framtagna ekvationen stämmer således ganska väl med tidigare mätningar.

I figur 9.8 visas motståndstalet, m, som funktion av cementpastans kapillära porositet, $(P_k)_p$, beräknad enl ekv (9.13).



Figur 9.8 Motståndstalet, m, som funktion av cementpastans kapillära porositet, $(P_k)_p$. (Blandningsnummer anges i figuren).

Figure 9.8 Value of resistance to water penetration, m, as function of capillary porosity of the cement-paste phase , $(P_k)_p$. (Batch number indicated).

Enligt figur 9.8 gäller följande samband (s/m^2)

$$m=28\bullet(0.29-(P_k)_p)\bullet10^7 \qquad \text{----------(9.15)}$$

vilket kan jämföras med ett tidigare (för bruk med vct mellan 0.42 och 0.70) experimentellt bestämt samband; **Fagerlund (1980A)**

$$m=22\bullet(0.5-(P_k)_p)\bullet10^7 \qquad \text{---------- (9.15a)}$$

Överensstämmelsen är således ganska god.

Eftersom kapillaritetsegenskaperna hos betongen till stor del är beroende av hydratationsgraden, dvs hur tät pastan är, är det rimligt att antaga att ett samband finnes mellan kapillaritetstalet, k, och faktorn, w_n/w_0, där w_n är kemiskt bundet vatten hos betongen och w_0 är ursprungligt blandningsvatten; se kapitel 8.

Med kapillaritetstal, k, enligt tabell 9.5 samt faktorn, w_n/w_0, enligt tabell 8.6 samt figur 8.16 erhålles ($kg/m^2\sqrt{s}$):

$$k=0.13\bullet(0.56-w_n/w_0) \qquad \text{för } 0.4<w_n/w_0<0.5 \qquad \text{----------(9.16)}$$

Sambandet uppvisar en mycket god signifikans.

9.4 Långtidsuppföljning av diffusivitet och kapillaritet

9.4.1 Allmänt

Även beträffande diffusivitet och kapillaritet ägde en långtidsuppföljning rum i detta fall vid 2 resp. ca 3 års ålder. De ca 15 mm resp. ca 45 mm tjocka skivorna som beskrivs i 9.3.1 användes. Alla prover förvarades i vatten i 9 månaders tid från gjutning varefter uttorkningen påbörjades.

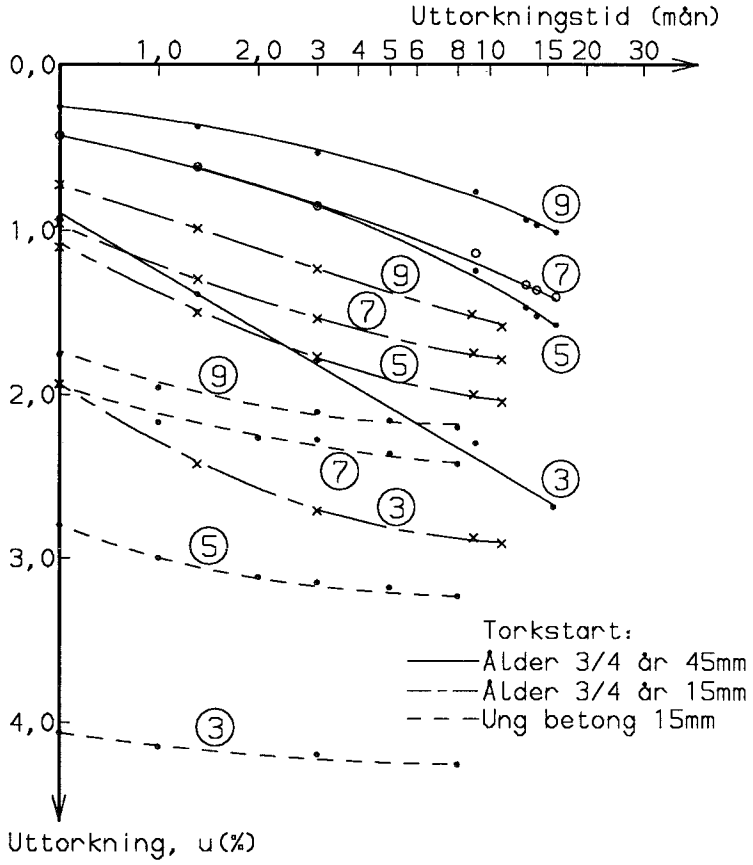
9.4.2 Resultat av diffusivitetsmätningar med diskussion

I tabell 9.6 redovisas uttorkningsdata från skivor med ålder 250 dygn vid torkstart. I tabellen redovisas en, med ledning av resultaten från de tunna skivorna och figur 9.9 antagen slututtorkning för de tjocka. Det är därför tabellen redovisas här.

Tabell 9.6 Uttorkningsdata från långtidsuppföljning.

Blandn.	S k i v v i k t (g)								
no	3		5		7			9	
Vct	0.465		0.326		0.251			0.222	
Gjutdag	31/10-89		25/10-89		18/10-89			11/10-89	
Littera	3B6	3B7	5B6	5B7	7B6	7B7	7B8	9A6	9A7
Tjocklek	45.5	15.0	50.5	15.5	37.0	16.0	15.5	43.5	15.5
Tid									
0 dygn	878.5	292.4	997.6	305.4	725.2	312.7	306.2	868.3	312.8
7	873.0	287.0	994.7	302.8	722.9	310.3	303.9	866.7	311.1
14	870.2	286.7	993.3	302.0	722.2	309.6	303.3	866.1	310.6
40	866.1	285.3	991.4	300.8	720.7	308.6	302.3	865.0	309.8
3 mån	862.5	284.4	988.9	300.0	719.1	307.9	301.5	863.7	309.0
9	858.0	284.0	985.2	299.3	717.0	307.3	300.9	861.6	308.1
11		283.9		299.1		307.2	300.7		307.9
13	855.6		982.8		715.6			860.1	
14	855.2		982.4		715.4			859.5	
16	854.6		981.8		715.1			859.3	
Slututt.	852.9		977.0		712.3			854.6	

I figur 9.9 visas uttorkningskurvor från samtliga uttorknings-försök även de som startades vid 1 dygns ålder. Uttorkningen uttryckes i %.



Figur 9.9 Uttorkningskurvor från samtliga uttorkningsförsök (Blandningsnummer anges i figuren).

Figure 9.9 Desiccation curves from all desiccation tests (Batch number indicated).

Det framgår av figur 9.9 att uttorkningsvärdena för ung betong nått i stort sett jämvikt med omgivningen eftersom kurvorna planar ut. För betong med åldern 250 dygn vid torkstart och tjocklek 15 mm förefaller samtliga betongblandningar ha uttorkats till jämvikt utom betong no 9. Vid tjockleken ca 45 mm, däremot, har uttorkningen ej nått jämvikt för någon betong utan fortsätter även efter 16 mån.

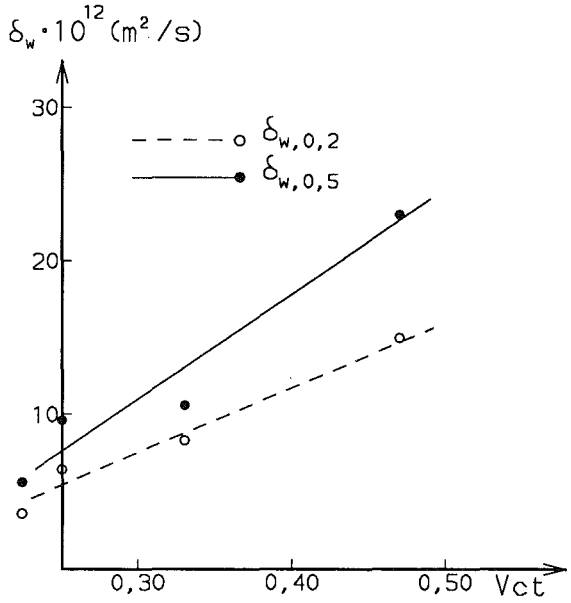
Som värden på uttorkningsjämvikt för betong med tjockleken ca 45 mm väljes därför värden från skivor med tjocklek 15 mm med motsvarande ålder. För blandning 9 väljes värdet efter 11 månaders uttorkning. Värdet ligger troligen mycket nära slutvärdet för uttorkning om man jämför med inbördes förhållandet mellan kurvorna för ung betong (blandning 7 och 9). Ur figur kan således uttorkningspotentialerna 20 resp. 50% enkelt bestämmas på grafiskt väg.

Under ovanstående förutsättningar och antaganden kan beräkning ske av diffusiviteten vid uttorkning av hälften av överskottsvattnet, $\delta_{W0.5}$, resp vid uttorkning av 80% av överskottsvattnet, $\delta_{W0.2}$, se tabell 9.7. För att δ_W skall kunna jämföras vid varierande ålder har även i tabell 9.3 redovisade värden medtagits i tabell 9.7.

Tabell 9.7 Diffusiviteten vid uttorkning av hälften av överskottsvattnet, $\delta_{W0.5}$, resp vid uttorkning av 80%, $\delta_{W0.2}$, vid varierande ålder och tjocklek

Blandning	Diffusivitet, $\delta_W \cdot 10^{12}$ (m^2/s)					
	Ålder, provtjocklek (mm)					
no	1-250 dygn, ≈15		250-500 dygn, ≈15		250-750 dygn, ≈45	
	$\delta_{W0.2}$	$\delta_{W0.5}$	$\delta_{W0.2}$	$\delta_{W0.5}$	$\delta_{W0.2}$	$\delta_{W0.5}$
3B	80	120	13	20	15	26
5B	40	50	7.3	11	9.0	10
7B	28	50	7.2	12	5.3	7.0
9A	29	50	3.5	7.0	3.7	4.0

I figur 9.10 visas diffusiviteten för välhärdad betong med minst 250 dygns ålder , δ_W, som funktion av vattencementtalet.



Figur 9.10 Diffusiviteten, δ_W, för välhärdad betong med minst 250 dygns ålder som funktion av vattencementtalet.

Figure 9.10 Diffusivity, δ_W, of well-cured concrete with an age of 250 days as function of water-cement ratio.

För välhärdad betong med minst 250 dygns ålder erhålls ur figur 9.10 vid uttorkning av 80% av överskottsvattnet följande samband mellan diffusiviteten, δ_W (m^2/s), och vct:

$$\delta_{W0.2}=42\cdot10^{-12}\cdot(vct-0.12) \quad \text{för } 0.22<vct<0.47 \quad (9.17)$$

samt vid uttorkning av hälften av överskottsvattnet

$$\delta_{W0.5}=70\cdot10^{-12}\cdot(vct-0.14) \quad \text{för } 0.22<vct<0.47 \quad (9.18)$$

Baserat på diffusiviteten, δ_W, vid 250-500 dygns ålder samt 250-750 dygns ålder, enligt tabell 9.7, samt på hydratationsutvecklingen, w_n/w_0, enligt tabell 8.6 fastställdes vid uttorkning av 80% av överskottsvattnet följande samband ($\delta_W \cdot 10^{12}$, m^2/s):

$$\delta_{W0.2} = 94 \cdot (0.56 - w_n/w_0) \quad \text{för } 0.41 < w_n/w_0 < 0.51 \quad \text{----------(9.19)}$$

samt vid uttorkning av hälften av överskottsvattnet

$$\delta_{W0.5} = 160 \cdot (0.55 - w_n/w_0) \quad \text{för } 0.41 < w_n/w_0 < 0.51 \quad \text{----------(9.20)}$$

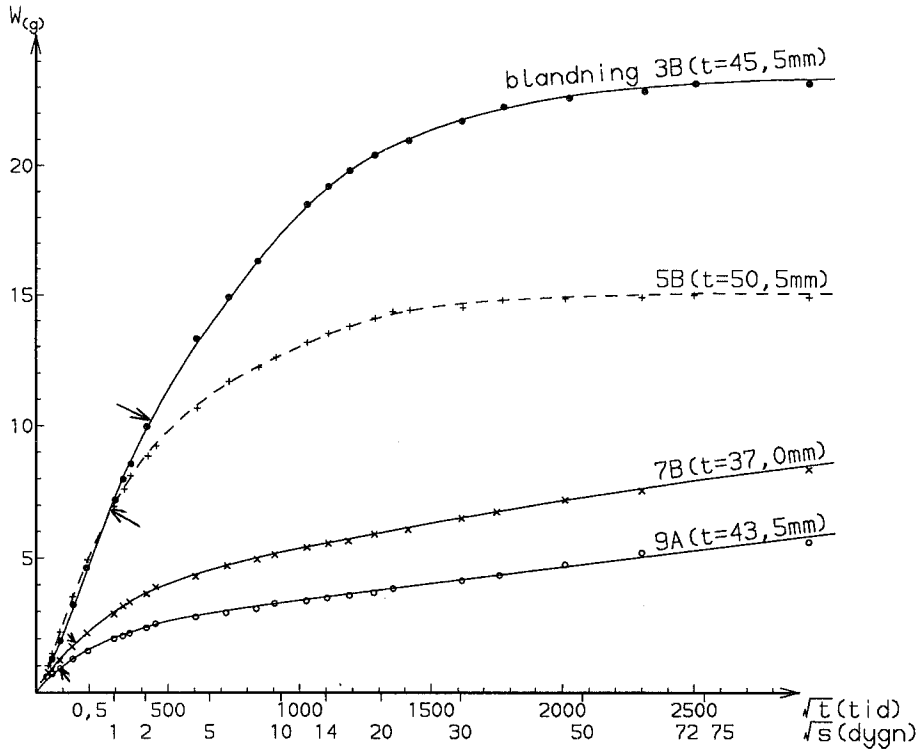
9.4.3 Resultat av kapillaritetsmätningar med diskussion

I tabell 9.8 redovisas uppsugen mängd vatten i skivor.

Tabell 9.8 Uppsugen mängd vatten etc. i skivor (g)

Tid från sugstart	Blandning littera			
	3B	5B	7B	9A
1 minuter	854.7	981.8	715.1	859.3
5	854.9	981.9	715.3	859.5
15	855.2	982.3	715.5	859.6
30	855.5	982.5	715.7	859.7
1 timmar	855.9	983.0	715.8	859.8
5	857.9	985.0	716.6	860.4
24	861.9	988.5	717.8	861.1
2 dygn	864.6	990.3	718.5	861.9
4	867.8	992.2	719.2	861.1
6	869.5	993.1	719.6	862.1
8	870.9	993.7	719.9	862.2
12	873.1	994.7	720.3	862.5
19	875.1	995.7	720.8	862.8
21	875.6	995.9	721.0	863.0
1 månader	876.4	996.0	721.4	863.3
3½	877.8	996.7	723.4	864.7
10	878.8	998.3	725.4	867.4
Provtjocklek, t (mm)	45.5	50.5	37.0	43.5
Våtvikt (1990-06-26)	878.5	997.5	725.2	868.2
Startvikt (1991-11-13)	854.7	981.5	714.9	859.1
Totalt uppsuget, W_a	24.1	16.8	10.5	8.3
Ursprungligen uttorkat, W_e	23.9	16.0	10.3	9.1

I figur 9.11 visas uppsugen vattenmängd, W (g), i betongskivor som funktion av kvadratrotstiden. Siffrorna anger blandningsnummer. I tabell 9.9 redovisas uträknade värden på kapillaritetstalet, k, och motståndstalet, m, hydratationsgraden, α, och kapillära porositeten, P_k, samt cementpastans kapillära porositet, $(P_k)_p$. Beräkningsmodell för dessa data redovisas ovan.



Figur 9.11 Uppsugen vattenmängd i 4 st betongskivor som funktion av kvadratroten ur tiden. (Blandningsnummer anges i figuren).

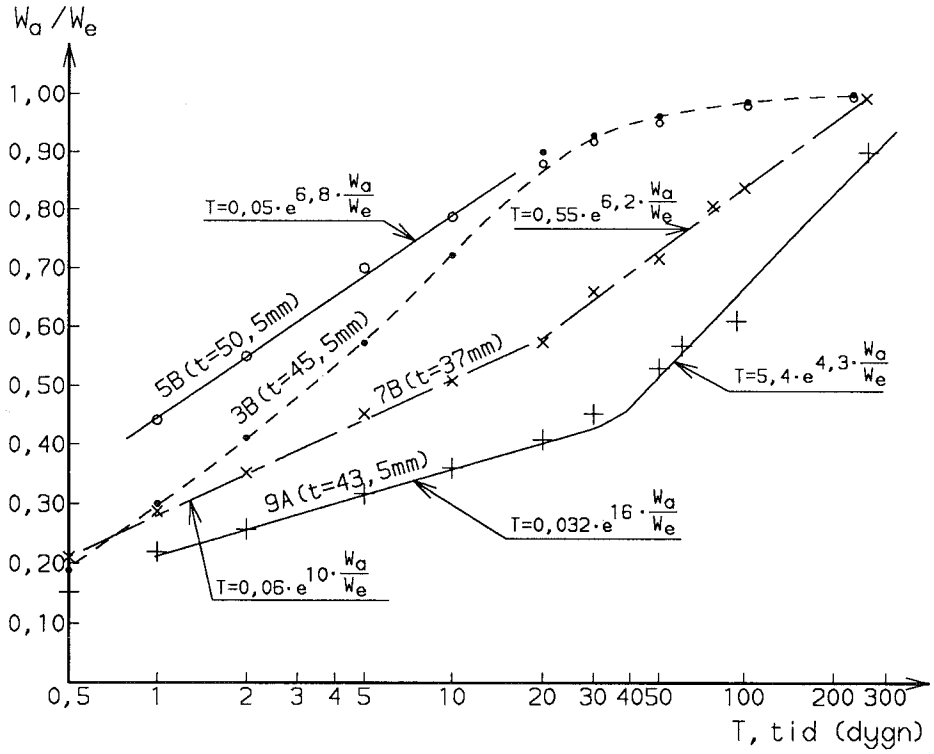
Figure 9.11 Water suction of 4 discs as function of square root of time. (Batch number indicated).

Tabell 9.9 Resulterande kapillaritetsdata

Bl.	t	Vct	Vbt	m	k	α	P_k	$(P_k)_p$
no	(mm)			(s/m^2)	$(kg/m^2\sqrt{s})$	$(4 \cdot w_n/C)$		
3B	45.5	0.465	0.465	$8.5 \cdot 10^7$	0.0030	0.77	0.028	0.21
5B	50.5	0.326	0.326	$3.3 \cdot 10^7$	0.0030	0.62	0.017	0.13
7B	37.0	0.251	0.251	$1.9 \cdot 10^7$	0.0014	0.51	0.006	0.091
9A	43.5	0.222	0.202	$0.64 \cdot 10^7$	0.0011	0.45	0.003	0.086

Resultaten enligt figur 9.11 visar att ingen tydlig "knickpunkt" erhölls dvs mätmetoden torde ej kunna tillämpas på betongskivor med så stor tjocklek som 45 mm. Som den s k "knickpunktstiden" i figur 9.11 valdes i detta fall den tidpunkt när kurvan börjar avvika markant från tangenten genom nollpunkten; se pilmarkering i figur 9.11. Enligt tabell 9.9 resulterar detta i inbördes orimliga värden på kapillaritetstalet och motståndstalet; bägge ökar samtidigt. Även i jämförelse med den kapillära porositeten förefaller värdena på motståndstalet orimliga; motståndstalet minskar samtidigt med porositeten; jfr tabell 9.5 ovan. Det torde främst vara tiden som är olämpligt vald i beräkningen av motståndtalet enligt ekv. (9.10).

Figur 9.12 visar andel uppsugen vattenmängd, W_a, i relation till ursprungligen uttorkad vattenmängd, W_e, som funktion av tiden (i logaritmisk skala). Efter exempelvis 1 månad i vatten har betongerna med lågt vct endast sugit upp ca 50% av den ursprungligen uttorkade vattenmängden. Betong med vct varierande mellan 0.33 och 0.47 har enligt figuren 9.12 sugit upp 90% av den ursprungligen uttorkade vattenmängden efter 1 månad. Detta betyder att högpresterande betong är mera tålig för t ex vattenskador än vad normal betong är.



Figur 9.12 Ensidigt uppsugen mängd vatten i betongskivor av varierande tjocklek som funktion av tiden. Uppsugningens tidsberoende anges i figuren. (Blandningsnummer anges i figuren).

Figure 9.12 Amount of absorption water in concrete slots of different thickness during single side suction as function of time. (Batch number indicated).

10. VÄRMEUTVECKLING

10.1 Allmänt

Högpresterande betong har hög cementhalt och lågt vct. Bägge dessa faktorer bidrar till en snabb och hög värmeutveckling. Risken är därför stor att mera massiva konstruktioner av högpresterande betong kan drabbas av temperatursprickbildning. Villkor för uppkomst av sådana har bl a behandlats av **Emborg (1989)**. Genom rätt val av cementtyp kan den ökade temperaturstegringen hos högpresterande betong i viss mån bemästras.

För att utröna hur stor värmeutvecklingen blir med de i denna undersökning använda bindemedlen och recepten genomfördes en mycket begränsad studie med de s k kalorimetrarna. Betongen inneslöts därvid i en värmeisolering varvid temperaturstegringen är ett mått på värmeutvecklingen. Kompensation för värmeförlusterna genom isoleringen genomfördes sedan genom bestämning av den s k kalorimeterkonstanten.

10.2 Tidigare mätningar av värmeutveckling

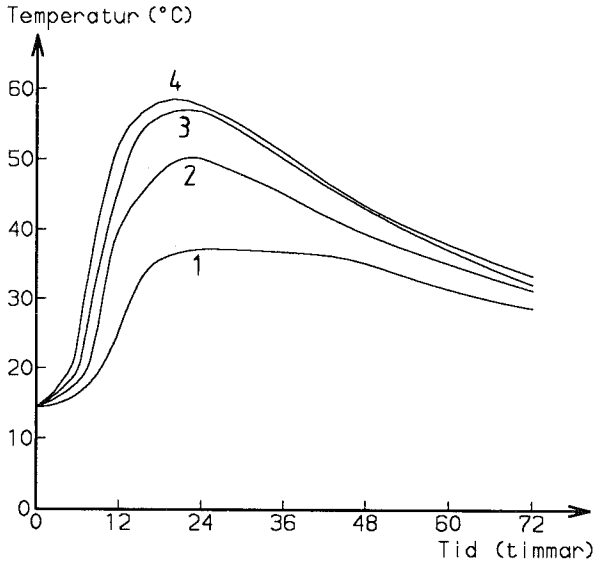
Helland (1987) har utfört mätningar av den adiabatiska värmeutvecklingen för betong med vct varierande mellan 0.26 och 0.68 dels med silikastoft, dels utan silikastoft. Vid låga vct bidrar tillsats av silikastoft obetydligt till värmeutvecklingen hos betong. Recept för betong med silikastoft ges i tabell 10.1. Helland använde termometoden varvid de uppmätta temperaturkurvorna, se figur 10.1, kompenserades för värmeförluster genom isoleringen.

Beräknade värmeutvecklingskurvor visas i figur 10.2 och 10.3. Vid låga vct bidrar tillsats av silikastoft obetydligt till värmeutvecklingen hos betong enligt Hellands resultat.

Tabell 10.1 Betongdata för i figur 10.1 redovisade betonger

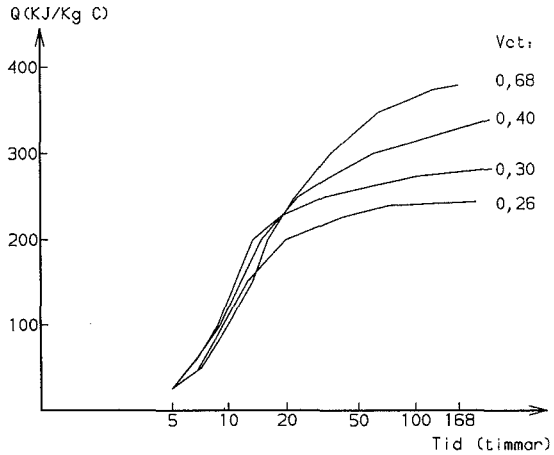
Blandning	Vct	Vbt	Cement	Silikastoft	Vatten	$f_{c,28}$
no	w_0/C	$w_0/(C+S)$	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(MPa)
1	0.68	0.60	217	33	150	42
2	0.41	0.35	373	56	150	90
3	0.31	0.27	483	72	150	107
4	0.26	0.22	592	89	150	112

w_0= blandningsvatten, C= cement, S= silikastoft, $f_{c,28}$= tryckhållfasthet vid 28 dygns ålder



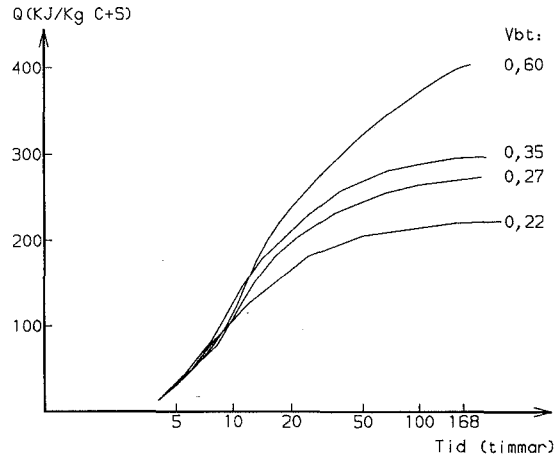
Figur 10.1 Temperaturutveckling i värmeisolerad betong som funktion av tiden. Helland (1987)

Figure 10.1 Temperature development in heat-insulated concrete as function of time. Helland (1987)



Figur 10.2 Adiabatisk värmeutveckling, Q, som funktion av tiden. Betong utan silikastoft. Helland (1987)

Figure 10.2 Heat of hydration, Q, as function of time. Concrete without silica fume. Helland (1987)



Figur 10.3 Adiabatisk värmeutveckling, Q, som funktion av tiden. Betong med silikastoft. Helland (1987)

Figure 10.3 Adiabatic heat of hydration, Q, as function of time. Concrete with silica fume. Helland (1987)

10.3 Egna mätningar

10.3.1 Allmänt- provade betonger

8 olika betonger testades. Översiktliga recept redovisar i tabell 10.2. (Detaljerade recept i DATARAPPORT TVBM-7011; 10.1). Betongerna överensstämmer i stort sett med de som använts i betongskivorna vid undersökning av självuttorknings-, hållfasthets- och hydratationsutveckling (kapitel 6, 7 och 8).
Även vid cementbruksförsök av kemisk krympning och självuttorkning (kapitel 3 och 4) användes i stort sett samma vct, andel silikastoft samt flyttillsats som vid kalorimeterförsöken.

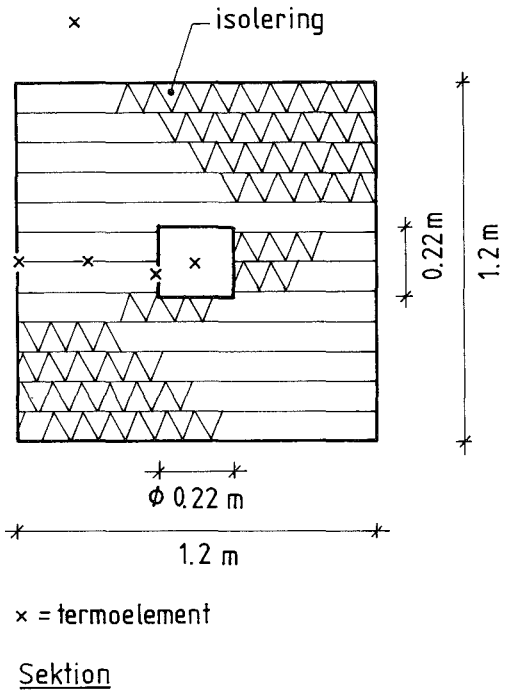
Tabell 10.2 Översiktliga recept för betong till kalorimeterförsök

Recept no	Mängd	Vct	Vbt	Cement	Silikastoft	SP 62	Ballast (kg/m^3)		Vatten, totalt
	(kg)			(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	0-8	8-12	(kg/m^3)
2H	20.7	0.58	0.58	299	-	-	812	1145	174
3H	20.7	0.47	0.47	303	-	3.01	846	1150	140
4H	20.2	0.48	0.44	298	29.7	2.13	825	1153	144
5H	20.9	0.33	0.33	400	-	3.35	723	1214	132
6H	19.9	0.36	0.33	389	38.9	3.07	730	1158	140
7H	20.2	0.25	0.25	456	-	8.84	630	1306	115
8H	21.7	0.24	0.22	476	47.6	8.78	549	1306	115
9H	20.5	0.22	0.20	484	48.4	13.32	525	1358	108

SP 62= flyttillsats, torrvikt

10.3.2 Kalorimeter- provningsteknik

Kalorimetern visas i figur 10.4. Den bestod av en kub med 1,2 m sida tillverkad av extruderad cellplast i skivor om 100 mm:s tjocklek, vilka limmades samman till ett homogent block så när som det övre locket. Mitt i kuben utfördes en cylindrisk förtagning om 8 l. Betong tillverkades med recept enl tabell 10.2.



Figur 10.4 Sektion av kalorimeter

Figure 10.4 Section of calorimeter

Gjutning av ca 8 l betong utfördes i en plåtburk, vilken sattes i förtagningen. Kalibrerade termoelement placerades sedan enligt följande:

1) mitt i betongprovet
2) på plåtburkens utsida
3) mitt i isoleringen
4) på isoleringens utsida
5) i luften utanför isoleringen

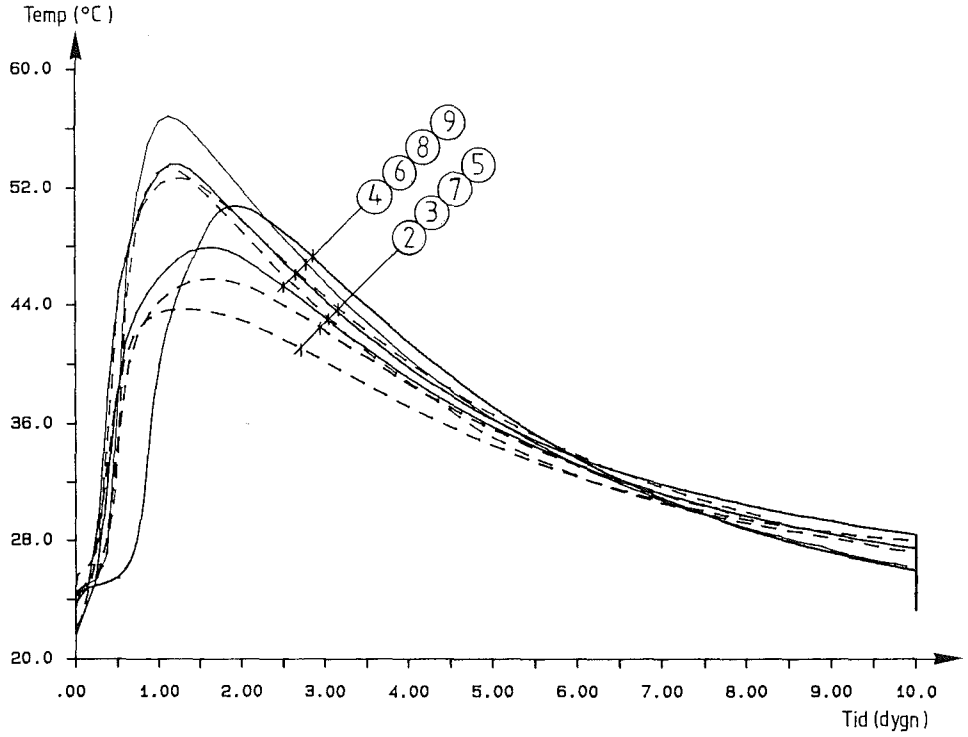
Locket av cellplast lades på varefter kalorimetern spändes ihop med stämp. Mätning av temperaturförloppet utfördes under minst 10 dygn. Genom kännedom om den s k kalorimeterkonstanten kan man teoretiskt beräkna vilken temperaturkurva som hade uppstått om förhållandena varit abiabatiska. Detta förutsätter också att cementreaktionens temperaturberoende är känt.

Ett mått på kalorimeterkonstanten eller värmeförlusttalet erhölls genom att provkroppen efter avsvalning i kalorimetern uppvärmdes i värmeskåp under minst 1 dygn till den högsta temperatur som den haft under huvudförsöket. Avsvalningsförloppet för den härdade betongen mättes därefter under minst 10 dygn med termoelement placerade enligt pkt 1)- pkt 5), se även figur 10.5. På så sätt kunde det s k värmeförlusttalet beräknas för kalorimetern. Metoden har utvecklats av **Helland (1987)**. Metoden för beräkning av värmeutvecklingen anges i **Smeplass (1988)** och **Carlsson (1991)**. Formler för beräkning ges enligt **Smeplass (1988)**.

10.3.3 Resultat

I figur 10.5 visas temperaturutvecklingen som funktion av tiden. Resultatbearbetning utfördes sedan med datorprogram enl **Smeplass (1988)** och **Carlsson (1991)**. Smeplass redovisar två alternativa metoder att bestämma det s k värmeförlusttalet; antingen genom att provkroppen värms upp med ett ingjutet element utan att

betongprovet tas ur kalorimetern dvs man slipper bryta kalorimetern eller genom att provkroppen värms upp i värmeskåp innan den får svalna igen i kalorimetern. Som redovisats i avsnitt 10.3.2 har vi använt oss av den senare metoden.



Figur 10.5 Temperaturutveckling som funktion av tiden. Siffror betecknar blandningsnummer.

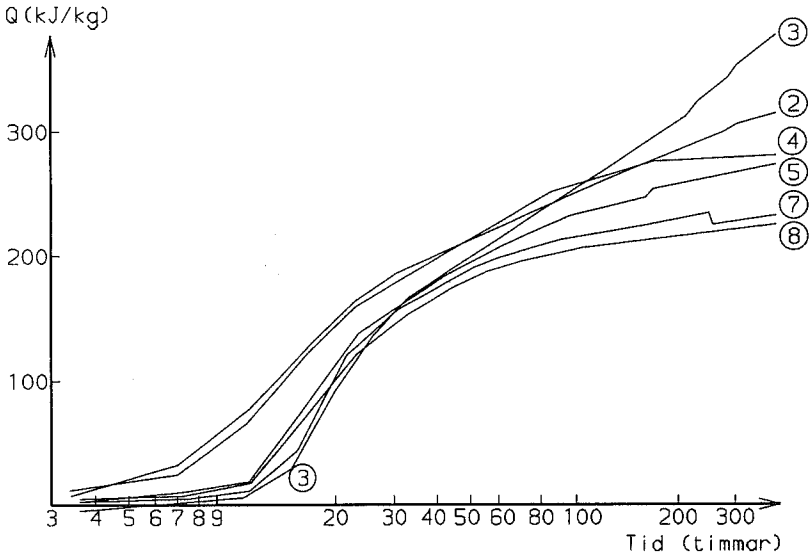
Figure 10.5 Temperature development (change) as function of time. Figures indicate batch number.

Framräkning av den adiabatiska värmeutvecklingen sker segmenterat dvs att programmet beräknar värmeförlusterna i olika temperaturintervall. Programmet adderar sedan värmeutvecklingstalen för varje beräknat segment varvid hänsyn tas till cementreaktionens temperaturberoende. Som s k aktiveringsenergi har värdet 31600 J/mol använts. I princip är aktiveringsenergin något temperaturberoende. För anläggningscement varierar den mellan ca 45000 J/mol vid +20°C till ca 30000 vid +60°C; **Täljsten (1987)**.

Temperaturmaximum, T_{max}, tidpunkt för temperaturmaximum, t_{max}, samt beräknad adiabatisk värmeutveckling, Q, ges i tabell 10.3. I figur 10.6 visas beräknad adiabatisk värmeutveckling, Q, som funktion av tiden. I figur 10.7 visas den abiabatiska värmeutveckling, Q, som funktion av vbt.

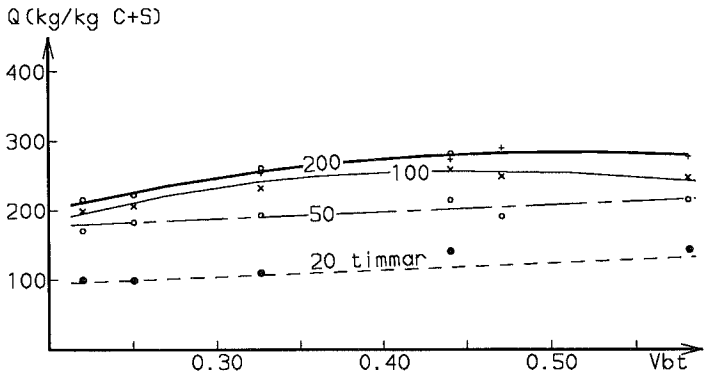
Tabell 10.3 Temperaturmaximum, T_{max}, tidpunkt för temperaturmaximum, t_{max}, samt adiabatisk värmeutveckling, Q,

Bl	Betong-	Vct	Vbt	T_{max}	t_{max}	Abiabatisk värmeutveckling, Q			
no	mängd			(°C)	(dygn)	(kJ/kg bindemedel)			
	(kg)					20 tim	50 tim	100 tim	200 tim
2H	20.7	0.58	0.58	43.5	1.3	150	215	250	285
3H	20.7	0.47	0.47	45.5	1.6	90	195	255	305
4H	20.2	0.48	0.44	48.0	1.5	145	215	260	275
5H	20.9	0.33	0.33	52.5	1.3	110	195	235	260
6H	19.9	0.36	0.33	48.0	1.2	–	–	–	–
7H	20.2	0.25	0.25	53.0	1.1	100	185	215	240
8H	21.7	0.24	0.22	56.5	1.1	100	180	205	215
9H	20.5	0.22	0.20	52.5	1.9	–	–	–	–



Figur 10.6 Abiabatisk värmeutveckling, Q, som funktion av tiden. Siffror betecknar blandningsnummer

Figure 10.6 Adiabatic heat of hydration, Q, as function of time

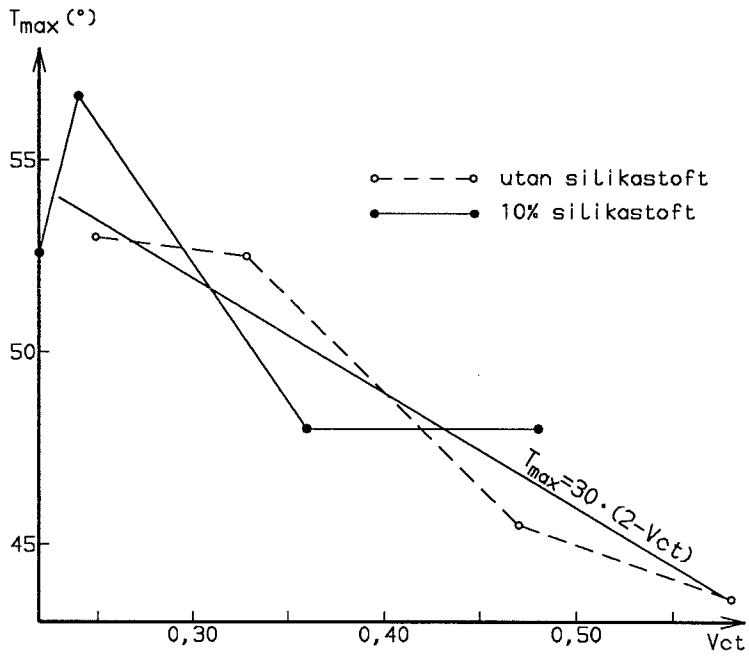


Figur 10.7 Abiabatisk värmeutveckling, Q, som funktion av vbt. Siffror i figuren betecknar betongålder

Figure 10.7 *Adiabatic heat of hydration as function of* $w_0/(C+S)$

10.3.4 Diskussion

Eftersom betongvolymen, värmeisoleringen och omgivningstemperaturen varit densamma vid samtliga kalorimeterförsök, är det intressant att studera temperaturutvecklingen, dels vad gäller maximala värdet, T_{max}, dels vad gäller tidpunkten, t_{max}, då maximala värdet inträffar. Maximala temperaturen, T_{max}, ökar med minskande vct, se figur 10.8. Utgångstemperaturen är ca 23°C i alla blandningarna. Som synes är sambandet mellan vct och temperaturmaximum inte entydigt.



Figur 10.8 Maximal temperatur, T_{max}, vid utgångstemperatur 23°, i betongen som funktion av vct.

Figure 10.8 Maximum temperature, T_{max}, as function of water-cement ratio. Start temperature +23°C

Sammantaget ges temperaturutvecklingen i kalorimetern av (°C):

$T_{max}=30\bullet(2-vct)$ för $0.22<vct<0.58$ ----------(10.1)

Vid vct=0.24 erhålles ca 30% större temperaturökning jämfört med vct=0.48, jfr figur 10.8. Detta sker p g a att cementmängden ökats med ca 60% och kan, vid grova konstruktioner, bli avgörande för sprickrisken. Maximala temperaturen är ej beroende av om silikastoft ingår i betongen eller ej. Detta ses tydligast vid vct=0.22-0.25 samt för vct=0.33-0.36.

I tabell 10.4 redovisas en sammanställning av dessa betongtypers vct, vbt, maximala temperatur under härdningsprocessen samt hållfasthetsdata enligt kapitel 7. Samband mellan tryckhållfasthet och maximal temperatur i betongen visas i bilaga 10.

Tabell 10.4 Sammanställning av vct, vbt, maximal temperatur och hållfasthetsdata för blandning 5H, 6H, 7H och 8H

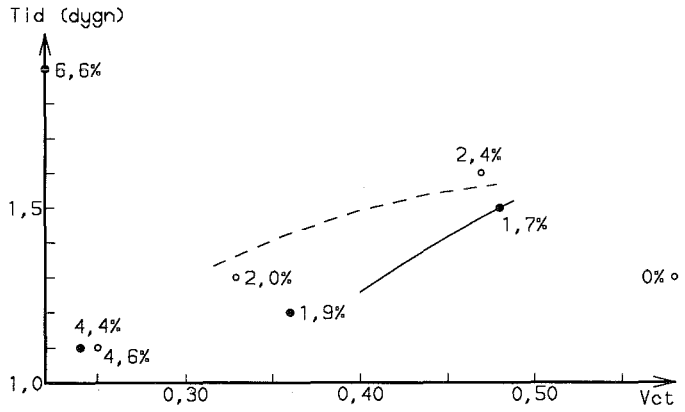
Bl. no	Silika-stoft	Vct	Vbt	T_{max} (°C)	t_{max} (dygn)	Tryckhållfasthet (MPa)			
						Kub		Cylinder	
						$f_{1,28d}$	$f_{1,90d}$	$f_{3,28d}$	$f_{3,90d}$
5H	Nej	0.33	0.33	52.5	1.3	90	104	77	91
6H	Ja	0.36	0.33	48.0	1.2	102	112	93	100
7H	Nej	0.25	0.25	53.0	1.1	97	110	93	104
8H	Ja	0.24	0.22	56.5	1.1	120	122	112	128

d= ålder i dygn

Blandning 5 har ett maximalt värde på temperaturen, T_{max}, som är 4.5 °C högre jämfört med blandning 6, men har samma vbt som blandning 6. Tryckhållfastheten för blandning 5 är dessutom ca 10% lägre jämfört med blandning 6; bilaga 10. Blandning 7 har ett maximalt värde på temperaturen, T_{max}, som är 3.5 °C lägre jämfört med blandning 8, men har i stort sett samma vct som blandning 8. Tryckhållfastheten för blandning 7 är ca 20% lägre jämfört med blandning 8; bilaga 10.

Sammantaget ger 10% silikastoft i betongen upp till 5°C lägre maximal temperatur i betongen vid samma tryckhållfasthet. Vid exempelvis 93 MPa i 28-dygnshållfasthet erhålles, enligt bilaga 10, en maximal temperatur av 48°C med 10% silikastoft i betongen och 53°C utan silikastoft. Vid 90 MPa erhålles således en temperaturökning av ca 25°C om betongen innehåller 10% silikastoft jämfört med en temperaturökning av 30°C hos betong utan silikastoft. Detta en stor skillnad som kan bli avgörande för sprickrisken hos konstruktionen under härdningsförloppet.

Blandning 5 och 6 resp 7 och 8 innehåller i stort sett lika mycket flyttillsats (3 resp 9 kg/m^3) varför mängden flyttillsats ej kan ha påverkat resultatet. Tidpunkt för temperaturmaximum, t_{max}, är dessutom nära nog lika för blandning 5-8 (1.2 dygn). Tidpunkten för temperaturmaximum, t_{max}, är i stort sett proportionell mot vct vid samma mängd superplasticerare, se figur 10.8.



Figur 10.9 Tidpunkt för temperaturmaximum, t_{max}. Siffrorna redovisar mängd superplasticerare (torrvikt).

Figure 10.9 Time for maximal temperature, t_{max}. Figures indicate amount of superplasticizer (dry weight).

Tidsrymden fram tills dess maximal temperatur nås i betongen ökar i området mellan vct= 0.35 till vct= 0.50 med mängd doserad superplasticerare, jfr figur 10.9.

Vid s k **överdosering av superplasticerare**, som vid blandning 9, (2.52%), erhålles en avsevärd retardation av hydratationsförloppet, ca 0.75 dygn, se även figur 10.6, varför tidsrymden fram tills maximal temperatur nås i betongen ökar.

Av figur 10.5 framgår att betong med lågt vct svalnar fortare än betonger med vct>0.40. Detta beror troligen på att relativa fuktigheten, RF, sjunker snabbt i betong med lågt vct och att hydratationen av cementet därmed avbryts. Betong utan silikastoft självuttorkar ned till RF≈83% medan tillsatts av 10% silikastoft sänkte självuttorkningsgraden till RF≈73%; kapitel 6. Av kapitel 8 framgår dessutom att hydratationsgraden är betydligt lägre för betong med silikastoft jämfört med betong utan; se t ex figur 8.10.

Jämfört med betongskivorna i kapitel 6, 7 och 8, vilka tillverkades med samma betongrecept som användes i försöken med värmeutveckling, erhöll betongen i det senare fallet en tidigare **hydratationstillväxt** eftersom den var värmeisolerad. Utan alltför stort fel kan man därför antaga att betongen vid försöken med värmeutveckling hade samma hydratationsgrad, då maximal temperatur nåddes i kalorimetern, som respektive betongkvalitet hade i betongskivorna vid 28 dygns ålder (membranisolerade, lagring C).

Som ett mått på **hydrationsgraden** vid försöket med värmeutveckling användes därför faktorn w_n/w_0 enligt tabell 8.6 och bilaga 8 (w_n betecknar kemiskt bundet vatten och w_0 blandningsvatten), för att studera sambandet mellan hydratation och maximal temperatur, T_{max}, i kalorimetern. Följande relation erhölls mellan maximal temperatur, T_{max} och faktorn w_n/w_0 (°C):

$$T_{max}=45\bullet(w_n/w_0+0.7) \qquad \text{----------(10.2)}$$

10.4 Slutsatser

Abiabatiska värmeutvecklingen för betong med vct=0.58 var ca 25% större än för betong med vct=0.24.

Vid samma tryckhållfasthet var maximala temperaturen i en konstruktion ca 5°C lägre om silikastoft ingick i betongen än i betong utan silikastoft. Vid samma vct var däremot maximala temperaturen i stort sett oberoende om silikastoft fanns i betongen eller ej. Vid vct=0.35 erhölls dock ca 3°C högre temperatur i betong utan silikastoft jämfört om silikastoft ingått i receptet.

Maximala temperaturen är ungefärligen omvänt proportionell mot vct.

Tidsrymden fram till temperaturmaximum i betongen ökar med ökande vct vid samma mängd superplasticerare. Tidsrymden till temperaturmaximum ökar med mängden superplasticerare.

Vid överdosering av superplasticerare kan betydande försening uppstå i hydratationsprocessen. Fortsatt forskning får visa huruvida tillsats av superplasticerare påverkar den s k aktiveringsenergin hos cementet.

En betong med vct=0.24 svalnar fortare jämfört med en betong med vct=0.58 till följd av att hydratationen avstannar i den förra betongen genom s k självuttorkning.

Slutligen uppställdes ett samband mellan faktorn w_n/w_0 (w_n betecknar kemiskt bundet vatten och w_0 blandningsvatten) och maximal temperatur, T_{max}, i kalorimetern.

REFERENSER

1946-1948. T C Powers; T L Brownyard. Studies of Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Research Laboratories PCA, Bulletin 22.

1955. L E Copeland; R H Bragg. Self Desiccation in Portland Cement Pastes. ASTM Bulletin no 204. Feb.

1959. J H Taplin. A Method of Following the Hydration Reaction in Portland Cement Paste. Australian Journal of Applied Science. Vol 10, no 3.

1960. T C Powers. Physical Properties of Cement Paste. Fourth International Symposium of the Chemistry of Cement, Washington D C. Monograph 43, Vol. II, Session V, Paper V-1, 577-609. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association. Research Department. Bulletin 54.

1967. H Kühl. Der Baustoff Zement. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

1973. N Becker; C MacInnis. A Theoretical Method for Predicting the Shrinkage of Concrete. ACI Journal. Proceedings 70:9.

1976. F W Locher; W Richartz; S Sprung. Erstarren von Zement. Zement-Kalk-Gips. No 10.

1977. L-O Nilsson. Fuktproblem vid betonggolv. Rapport TVBM-3002. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1977. I Karlsson. Höghållfast betong. Nordisk Betong nr 4.

1979. S P Shah. High Strength Concrete. Proceedings of a Workshop held at the University of Illinois at Chicago Circle.

1979. J H Taplin. A Method for Following the Hydration Reaction in Portland Cement Paste. Australian Journal of Applied Science. Vol 10.

1980A. G Fagerlund. Fuktmekaniska egenskaper. Betonghandbok del Material. Svensk Byggtjänst. Stockholm.

1980B. G Fagerlund. Betongkonstruktioners beständighet. Rapport Ra 4:80. Cement- och betonginstitutet. Stockholm.

1980. L-O Nilsson. Hygroscopic Moisture in Concrete - Drying, Measurements & Related Material Properties. Report TVBM-1003. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1980. J Byfors. Plain Concrete at Early Ages. FO 3:80. Cement- och betonginstitutet. Stockholm.

1980. Betonghandbok del Konstruktion. Svensk Byggtjänst. Stockholm.

1980. Bestämmelser för betongkonstruktioner, BBK 79.

1982. Z P Bazant. Creep and shrinkage in concrete structures. Center of Concrete and Geomaterials. Northwestern University. Evanston.

1983. L-O Nilsson. Utformning av fuktskydd vid golv på mark. Nuvarande kunskaper och exempel på lösningar. BFR Rapport 83:90.

1983. M Geiker. Studies of Portland Cement Hydration. Measurements of Chemical Shrinkage and a Systematic Evaluation of Hydration Curves by means of the Dispersion Model. DTH.

1984. L-O Nilsson. Desorption Isotherms for Silica-fume/Cement Mortars. Rapport IF 8431. Institutet för Fuktfrågor. Trelleborg.

1986. A K Christofferssen; T B Sörensen. Selvudtörring og kemisk svind i mörtel. The Technical University of Denmark. Department of Civil Engineering. Building Materials Laboratory.

1987A. G Fagerlund. Höghållfast betong. Cementa nr 4.

1987. I Holand. Symposium on Utilization of High Strength Concrete. Proceedings. Stavanger. Tapir.

1987. S Helland. Temperatur og fasthetsutveckling i betong med lavere enn 0.40. Nordisk Betong 5.

1987. T Knudsen. The Effect of Sample-size on the Hydration of Watercured Portland Cement Pastes. Danmarks Tekniske Höj-skole. Institutet for Mineralindustri.

1987B. G Fagerlund. Relations between the Strength and the Degree of Hydration or Porosity of Cement Paste, Cement Mortar and Concrete. Cementa rapport T 87023.

1987. B Täljsten. Temperatur- och mognadsutveckling. Rapport 1987:035E. Avdelning för konstruktionsteknik. Tekniska Högskolan i Luleå.

1988. G Fagerlund. Förslag till ett nationellt FoU-program för högpresterande lågtemperaturbundna keramer. Styrelsen för Teknisk Utveckling, STU.

1988. S Smeplass. Kalor. SINTEF rapport STF65A88031. Trondheim.

1988. L J Parrott. A literature rewiew of High Strength Concrete properties.

1989. L Berntsson; S Chandra. Ultrahöghållfast betong. Byggforskningsrådet. R8:1989.

1989. F de Larrard. Ultrafine Particles for the Making of Very High Strength Concretes. Cement and Concrete Research. Vol 19.

1989. N L Howard; D M Leatham. The Production and Delivery of High Strength Concrete. Concrete International. April.

1989. A M Rosenberg; J M Gaidis. A New Mineral Admixture for High Strength Concrete. April.

1989. L Bjerkén. High-Strength Concrete. State of the art. SINTEF rapport 0333-257865. Norges tekniske högskole Forskningsintituttet for cement och betong. Trondheim.

1989. V Randall; K Foot. High-Strength Concrete for Pacific First Center. Concrete International. April.

1989. Förslag till finsk betongnorm, K70-K 100. VTT. Otnäs. Finland.

1989. T Hansson. Fuktskydd i småhus. ISBN 91-38-07710-8. Boverket. Stockholm.

1989. M Emborg. Thermal Stresses in Concrete Structures at Early Ages. Rapport 1989:73 D. Konstruktionsteknik. Tekniska Högskolan i Luleå. Luleå.

1990. M Held. Research results concerning the properties of high strength concrete. Darmstadt Concrete. Vol 5. Darmstadt.

1990. FIP/CEB. Bulletin d'Information No. 197. High Strength Concrete. State of the Art Report.

1990. P-C Altcin; S L Sarkar; P Laplante. Long-term Characteristics of a Very High Strength Concrete. Concrete International. January.

1990. F de Larrard. Adherence de armatures passives dans le beton a tres hautes performances. Bulletin de Liaison des Laboratories de Ponts et du Chaussees. No 167, Mai-Juin.

1990A. B Persson. Hydration and Strength of High-Performance Concrete. Proceedings Nordic Concrete Research Meeting, p. 100. Research projekt 1990. Norske Betongförening. Oslo.

1990. G Fagerlund och B Persson. Högpresterande betong utan byggfukt. Cementa nr 3.

1990. The second International symposium on applications of High Strength Concrete. Berkley. May.

1990. B Nitz; P Piiparinen. Tryckprovning av betongkuber. Uppdrag 89197. Cementa. Slite.

1990. H Kukku. Byggnadsmaterial Laboratoriet. VTT, Otnäs. Finland. Personlig information.

1990B. B Persson. Högpresterande betong- en match för management. Tidskriften Byggforskning nr 6.

1990C. B Persson. Höghållfast betong- självuttorkning och hållfasthet. Bygg & teknik nr 7.

1990D. B Persson. Besök vid VTT, Otnäs. Reserapport. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1990. H Pyy. Byggnadsmaterial Laboratoriet. Bilder av mikrostruktur hos betong. Personlig information. VTT, Otnäs.

1991. M Carlsson. Diagram. Euroc Research. Slite.

1991. M H Zhang; O E Gjörv. Effect of Silica fume on Cement Hydration in Low Porosity Cement Pastes. Division of Building Materials- NTH. Trondheim.

1991. B Elmarsson. Platta på mark från 1940-tal till 1980-tal. Tidskriften Byggforskning nr 1.

1991A. G Hedenblad. Mätning av RF i platta på mark, 1991-01-24. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1991B. G Hedenblad. Personlig information. Medelvärden på ångpermeabilitet för betong med olika vct. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1991C. G Hedenblad. Fukttransportkoefficienter för några byggnadsmaterial. Preliminär. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1991. D Hooton, Toronto. Personlig information.

1991. A Larsén. Optimal packningsgrad hos ballast i högpresterande betong. Litteraturstudie vid seminarium i Abisko. Cement- och betonginstitutet. Stockholm.

1991A. B Persson. Hydration of High-Performance Concrete. Proceedings at the 93rd Annual Meeting & Exposition. Abstracts, p. 257. American Ceramic Society. Westerville.

1991B. B Persson. Högpresterande betong ger fuktsäker platta på mark. Betong nr 1.

1991C. B Persson. En fuktsäker platta på mark. Cementa nr 1.

1991D. B Persson. Bakgrund till val av betong vid Stora Bältförbindelsen. Rapport nr U91.02. Avdelningen Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1991E. B Persson. Högpresterande betong- möjligheternas material. Byggforskning no 5.

1991F. B Persson. 16 balkar i försök med högpresterande betong. Bygg & Teknik 7.

1991G. B Persson. Erfarenheter från ACS-kongressen, Cincinatti. Rapport TVBM-7011. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1991H. B Persson. Fuktmätning vid SIAB:s FoU-projekt i Finspång. U91.05. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1991I. B Persson. Utvärdering av provningsmetod för vattenutsatt självtorkande betong, PSB 04-91. Rapport TVBM-7009. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1991J. B Persson. Högpresterande betong- framtidens byggnadsmaterial. Bygginfo norr. Nr 4.

1992. G Fagerlund. Personlig information.

1992. T Berglund. Omräkningsfaktorer av tryckhållfastheten hos högpresterande betong. Rapport TVBM-5023. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1992A. B Persson. Högpresterande betong torkar även i vatten. Betong nr 1.

1992B. B Persson. Högpresterande betong på lättklinkerfyllning. U92.01. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1992C. B Persson. Uttorkningsgrad hos snabbtorkande betong i Billeberga och Svalöv. Rapport U92.02. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1992D. B Persson. Fortsatt utvärdering av provningsmetod för vattenutsatt snabbtorkande betong, PSB 04-91. Rapport TVBM-7014. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1992E. B Persson. Fuktmätning vid fyra fältförsök med snabbtorkande betong. Rapport TVBM-7015. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund.

1992. A Haghpassand. Brottstudier av högpresterande betong. Examensarbete. Avdelning Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Lund. Preliminär.

B I L A G O R

BILAGA 1: Betongskivor. Utveckling av relativ fuktighet, hydratation och hållfasthet.

BILAGA 2: Betongskivor. Samband mellan tryckhållfasthet och relativ fuktighet.

BILAGA 3: Betongskivor. Inverkan av gjutteknik och yttre fuktförhållanden på hållfastheten.

BILAGA 4: Betongskivor. Hydratation.

BILAGA 5: Betongskivor. Samband mellan relativ fuktighet och hydratvattenmängd.

BILAGA 6: Betongskivor. Inverkan av gjutteknik och yttre fuktförhållanden på hydratvattenmängden.

BILAGA 7: Betongskivor. Långtidsuppföljning av hydratvattenmängden; självuttorkad betong.

BILAGA 8: Betongskivor. Långtidsuppföljning av relation mellan hydratvatten och blandningsvatten; självuttorkad betong.

BILAGA 9: Mikrostruktur hos betong.

BILAGA 10: Värmeutveckling. Tryckhållfasthet och maximal betongtemperatur.

BILAGA 11: Tillämpning 1. Platta på mark.

BILAGA 12: Tillämpning 2. Armerad balk.

BILAGA 1: Betongskivor. Utveckling av relativ fuktighet, hydratation och hållfasthet.

Som jämförelse visas även värden på tryckhållfastheten hos kuber.

Beteckningar:
f_3 är tryckhållfasthet för utborrad cylinder, Φ40
f_{spl} är spräckhållfasthet för dito.

Bilaga 1.1 Blandning 2.

Bilaga 1.2 Blandning 3.

Bilaga 1.3 Blandning 4.

Bilaga 1.4 Blandning 5.

Bilaga 1.5 Blandning 6.

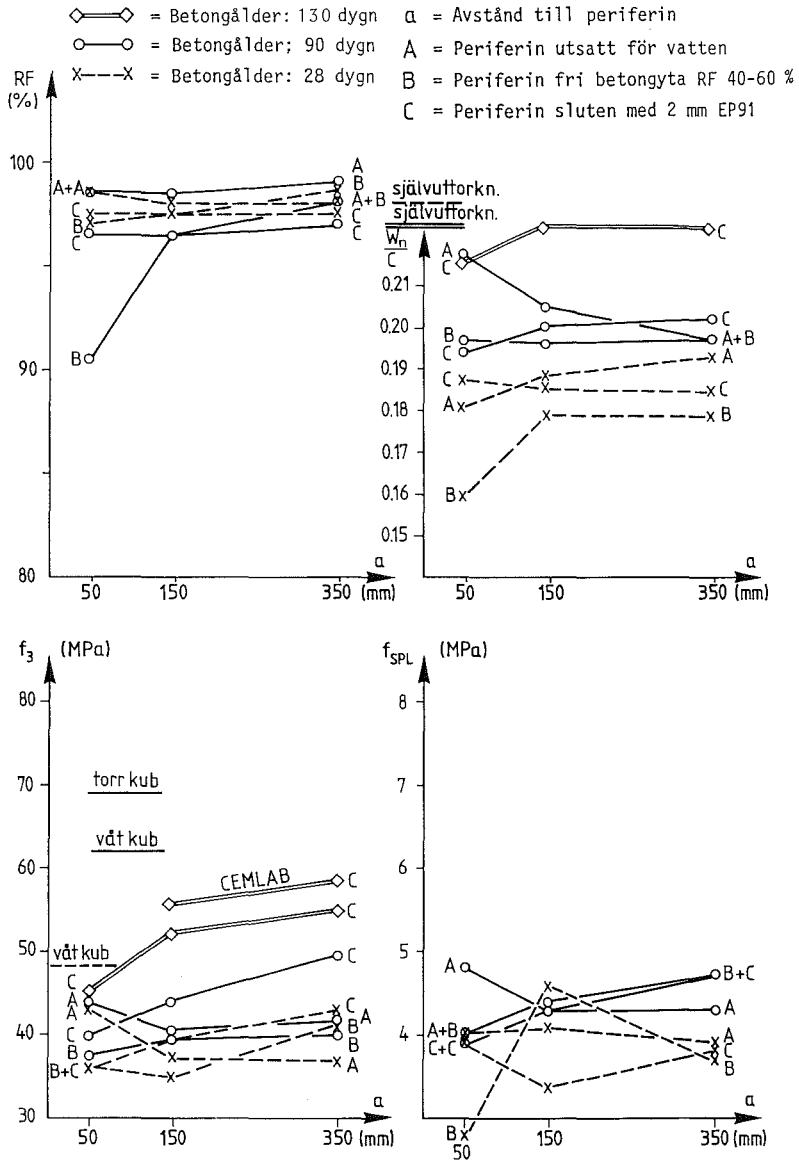
Bilaga 1.6 Blandning 7.

Bilaga 1.7 Blandning 8.

Bilaga 1.8 Blandning 9.

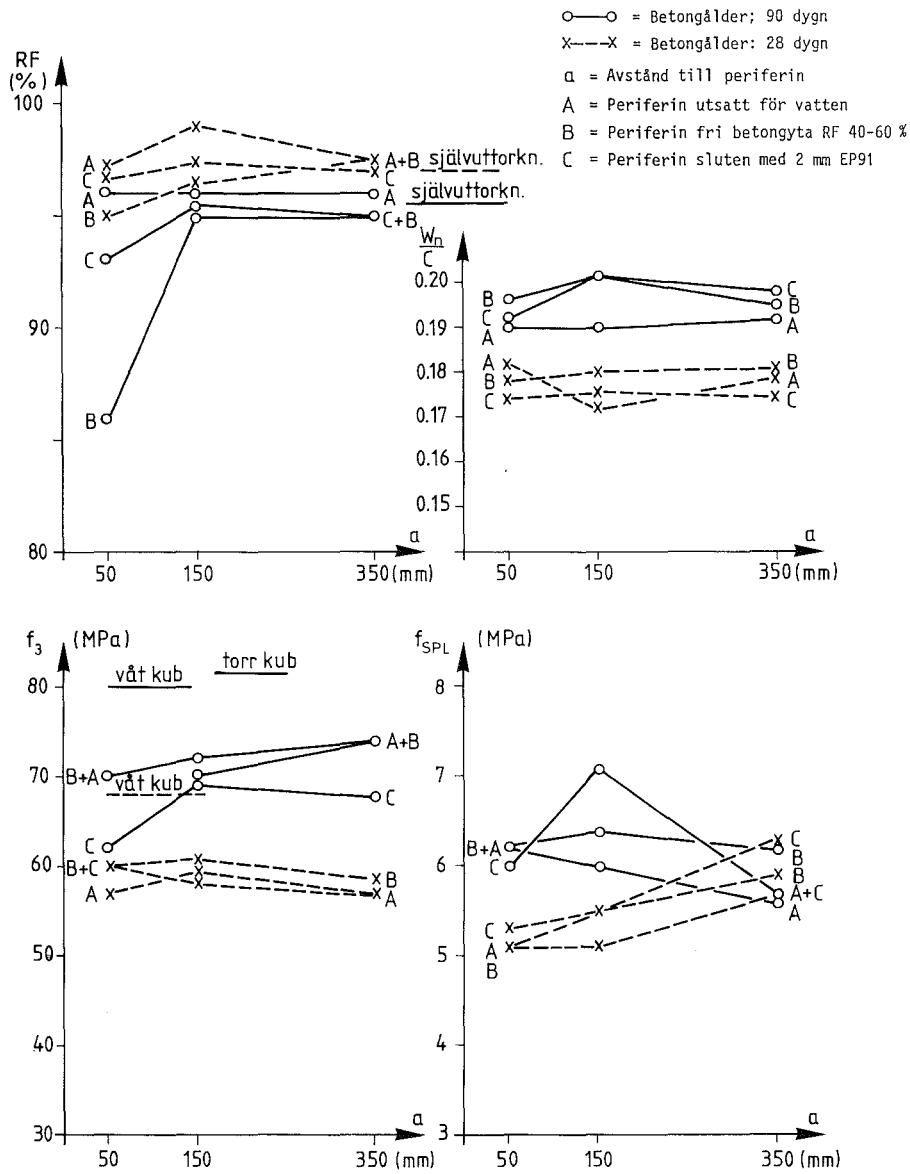
Bilaga 1.1

RF-utveckling, kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C och hållfasthetsutveckling hos betongskivor. Som jämförelse visas även värden på tryckhållfastheten hos kuber. Blandning 2.



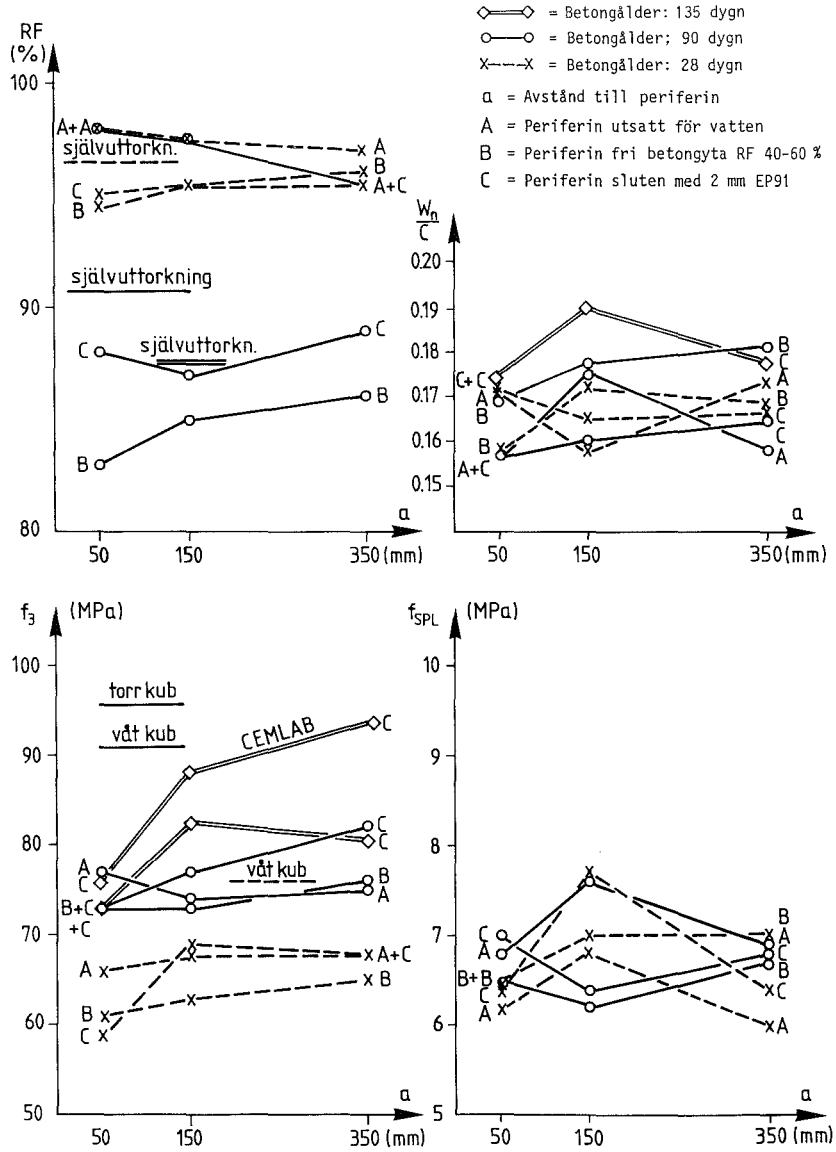
Bilaga 1.2

RF-utveckling, kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C och hållfasthetsutveckling hos betongskivor. Som jämförelse visas även värden på tryckhållfastheten hos kuber. Blandning 3.



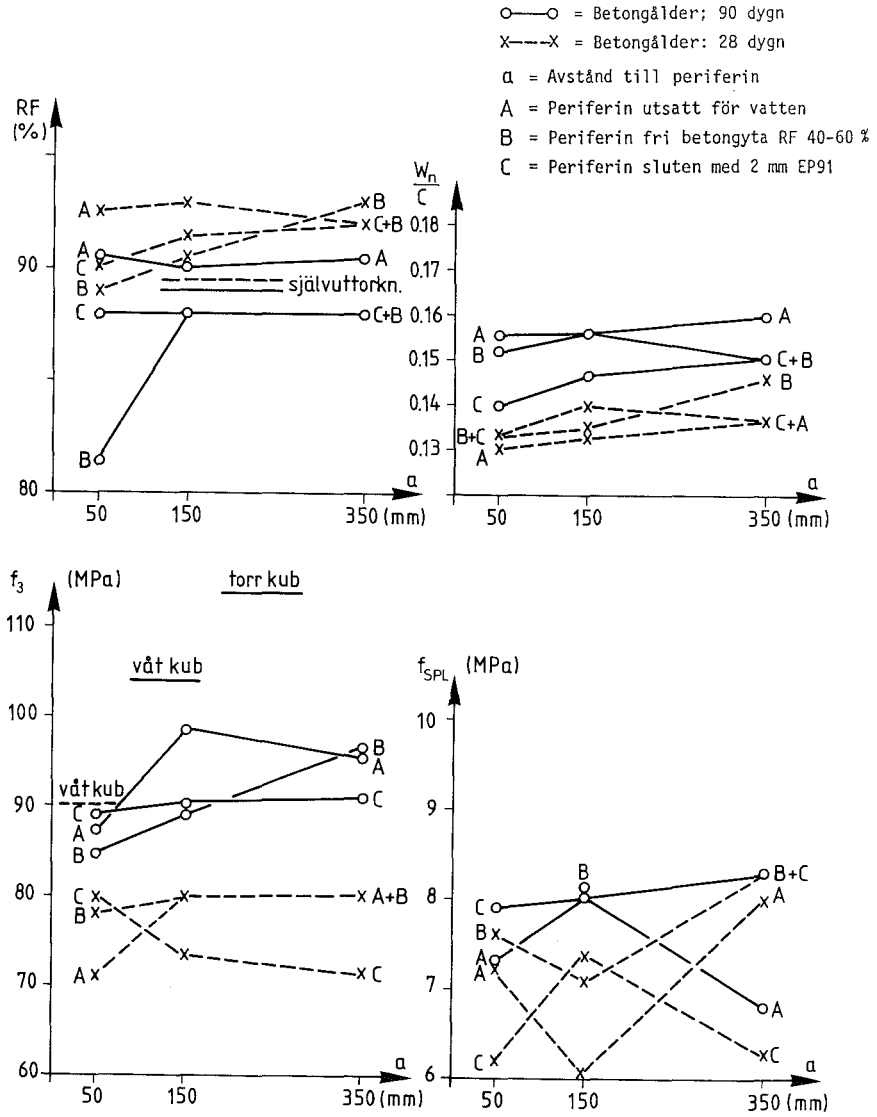
Bilaga 1.3

RF-utveckling, kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C och hållfasthetsutveckling hos betongskivor. Som jämförelse visas även värden på tryckhållfastheten hos kuber. Blandning 4.



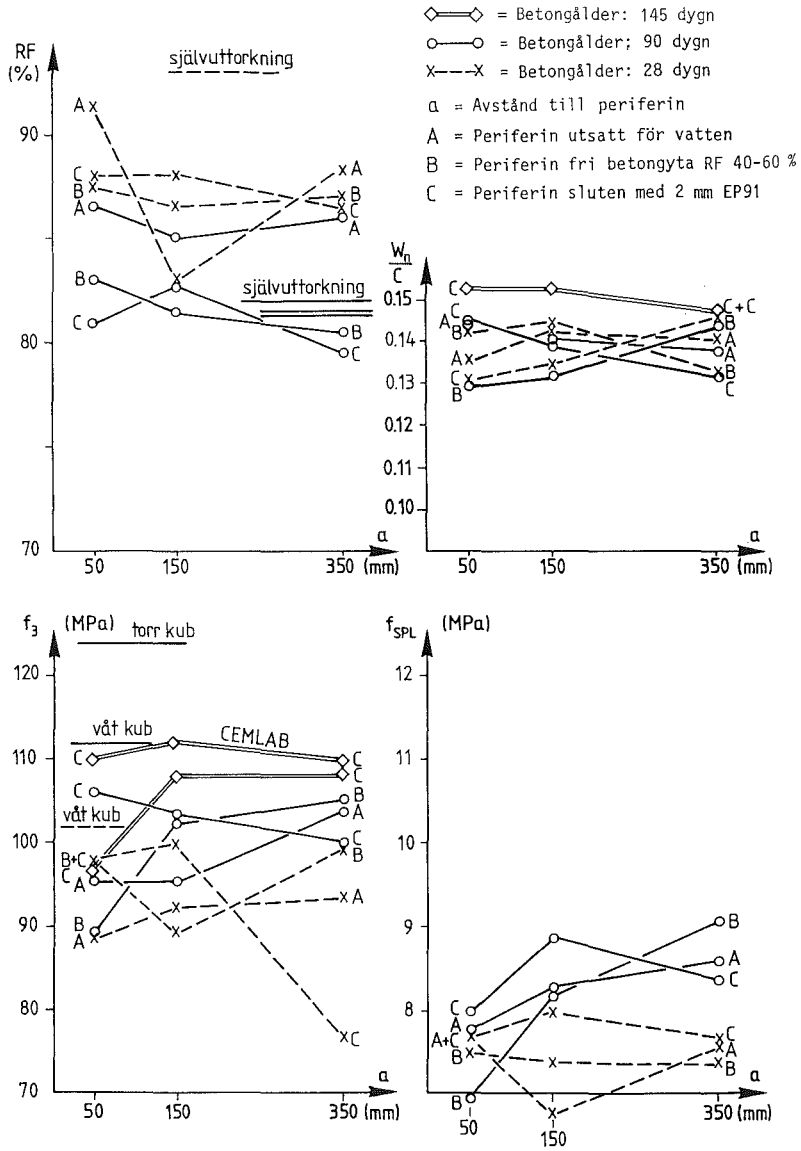
Bilaga 1.4

RF-utveckling, kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C och hållfasthetsutveckling hos betongskivor. Som jämförelse visas även värden på tryckhållfastheten hos kuber. Blandning 5.



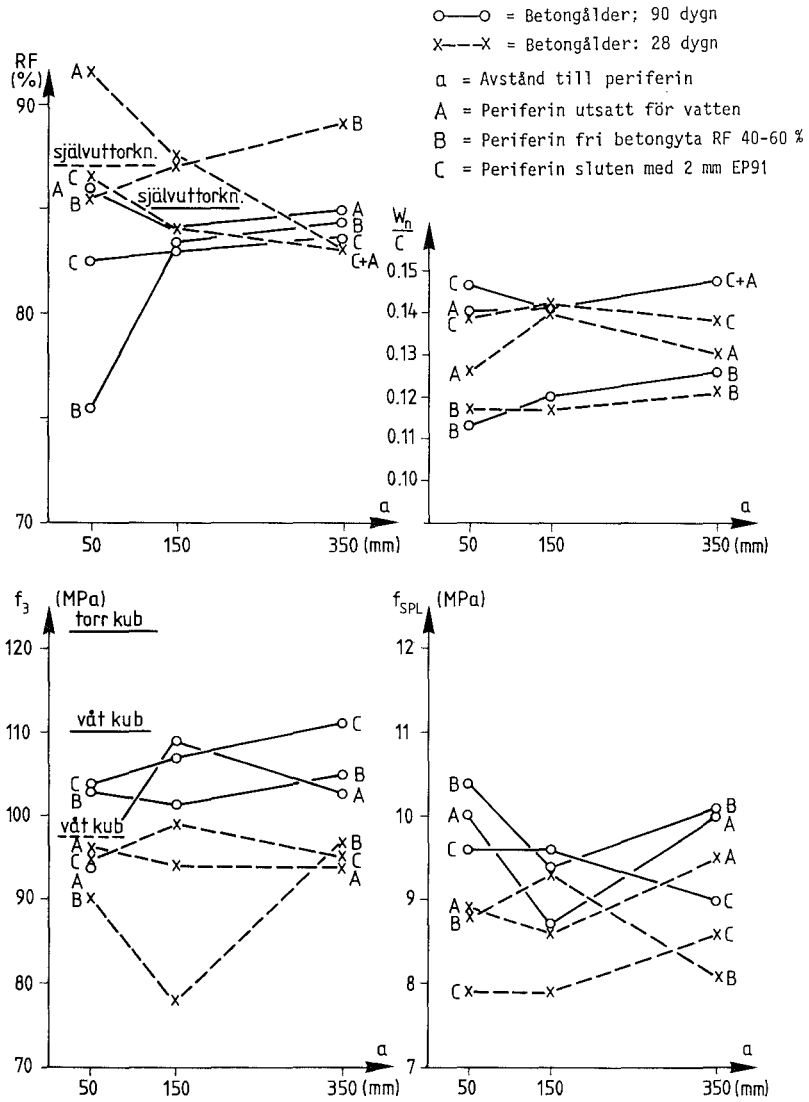
Bilaga 1.5

RF-utveckling, kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C och hållfasthetsutveckling hos betongskivor. Som jämförelse visas även värden på tryckhållfastheten hos kuber. Blandning 6.



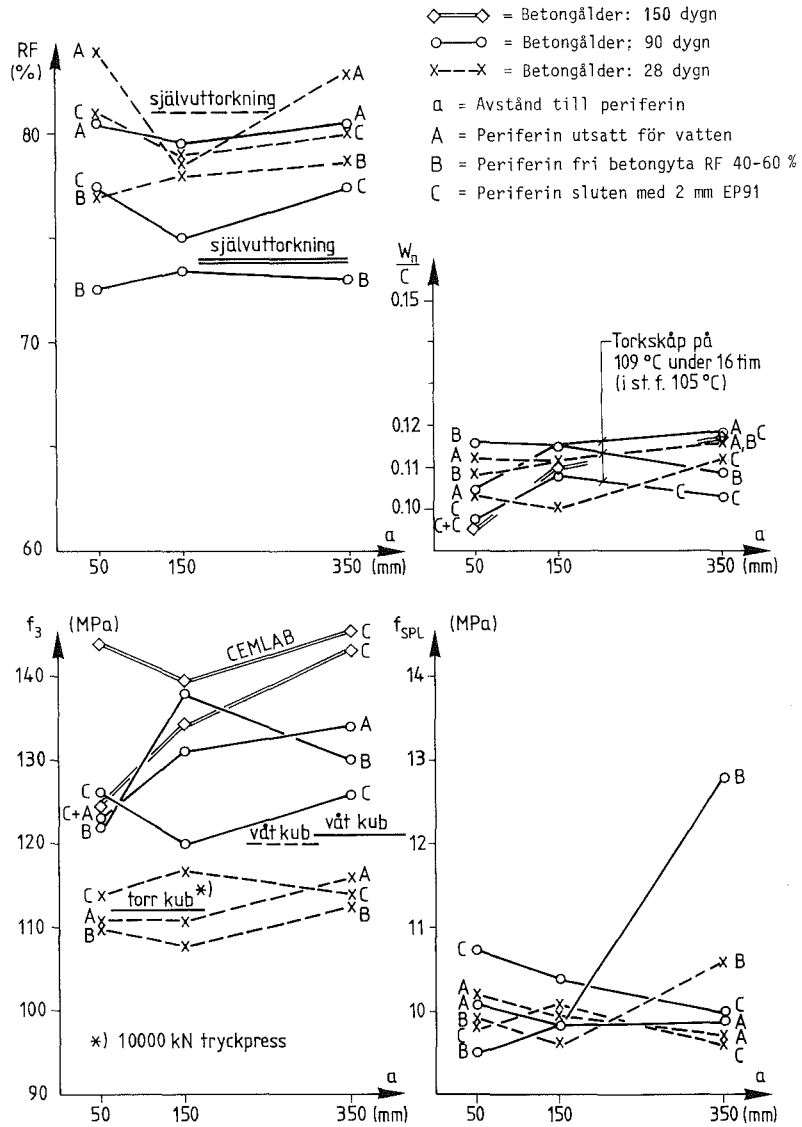
Bilaga 1.6

RF-utveckling, kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C och hållfasthetsutveckling hos betongskivor. Som jämförelse visas även värden på tryckhållfastheten hos kuber. Blandning 7.



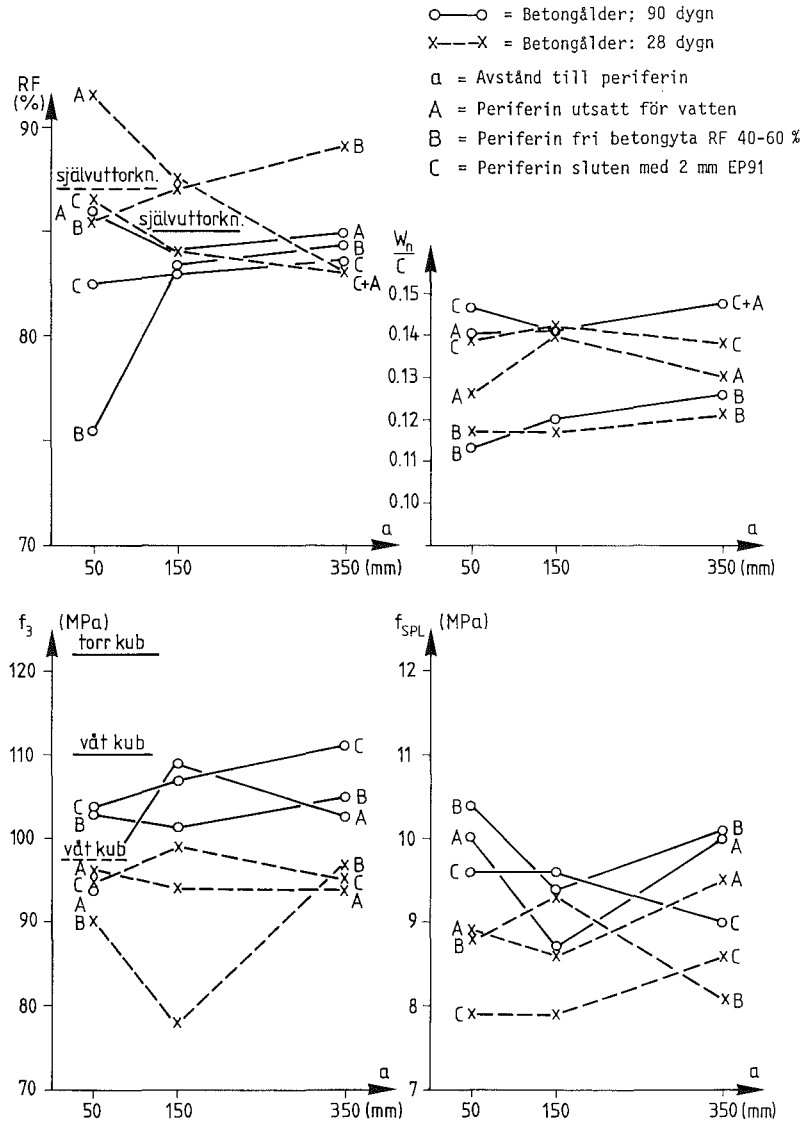
Bilaga 1.7

RF-utveckling, kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C och hållfasthetsutveckling hos betongskivor. Som jämförelse visas även värden på tryckhållfastheten hos kuber. Blandning 8.



Bilaga 1.8

RF-utveckling, kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C och hållfasthetsutveckling hos betongskivor. Som jämförelse visas även värden på tryckhållfastheten hos kuber. Blandning 9.



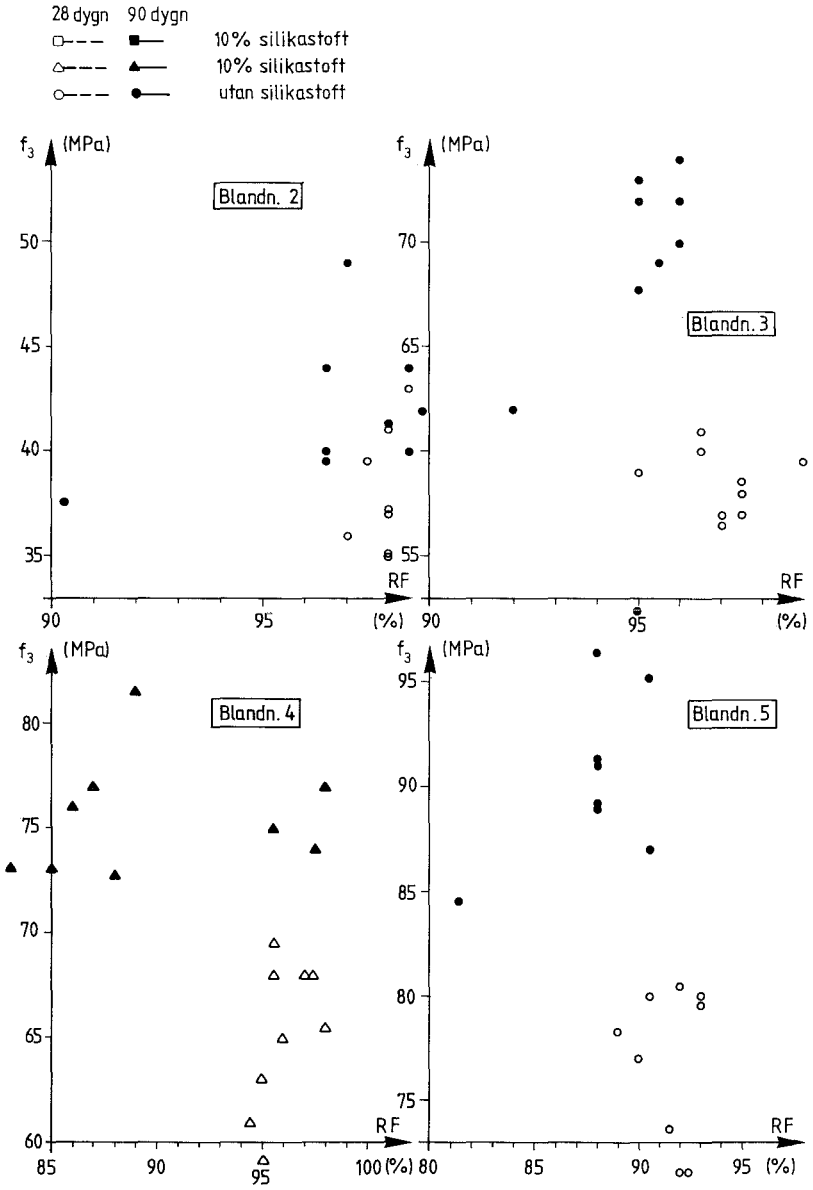
BILAGA 2: Betongskivor. Samband mellan tryckhållfasthet och relativ fuktighet.

Bilaga 2.1 Blandning 2, 3, 4 och 5

Bilaga 2.2 Blandning 6, 7, 8 och 9

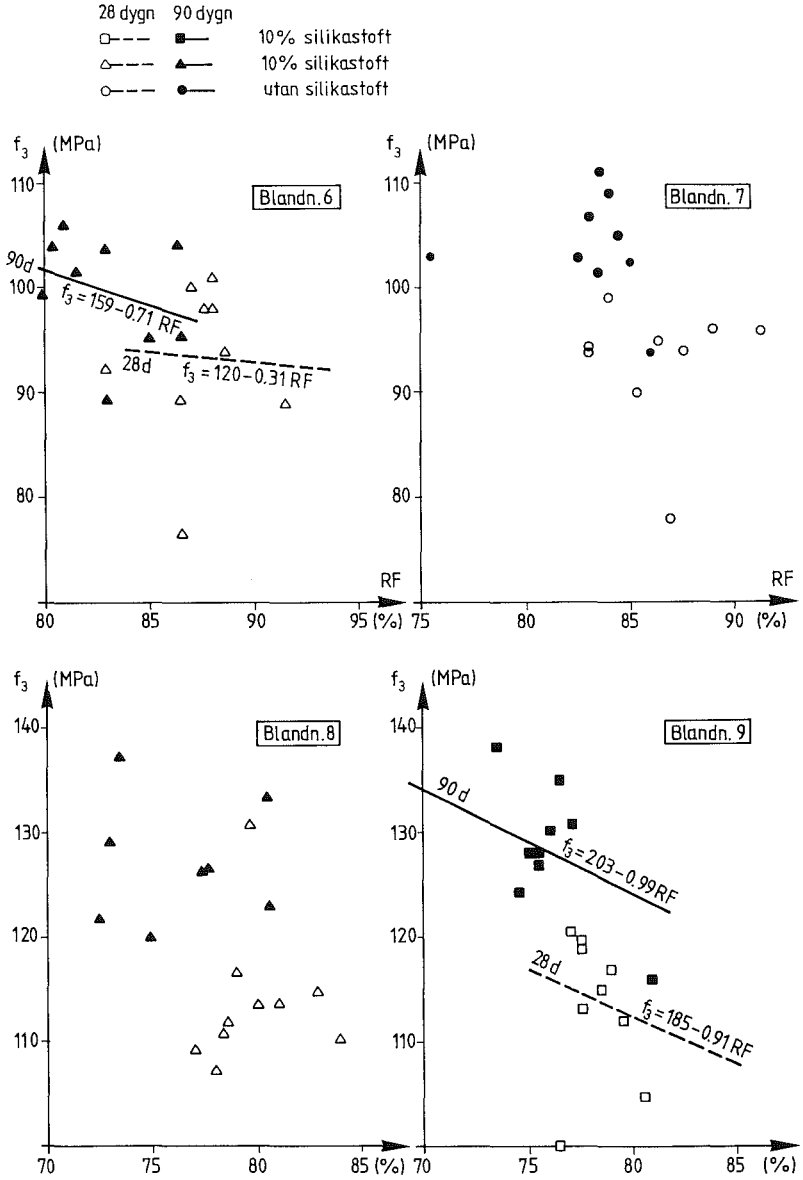
Bilaga 2.1

Samband mellan tryckhållfasthet för utborrad cylinder, f_3, och relativ fuktighet, RF. Blandning 2, 3, 4 och 5



Bilaga 2.2

Samband mellan tryckhållfasthet för utborrad cylinder, f_3, och relativ fuktighet, RF. Blandning 6, 7, 8 och 9



BILAGA 3: Betongskivor. Inverkan av gjutteknik och yttre fuktförhållanden på hållfastheten.

Beteckningar:

f_3 är tryckhållfasthet på utborrad cylinder Φ40 mm,

f_{3m} är medelvärde av tryckhållfasthet

d är dygn.

Bilaga 3.1 Effekt av gjutteknik; 50, 150 och 350 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.

Bilaga 3.2 Effekt av vatten- resp. luftexponering; 50 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.

Bilaga 3.3 Effekt av vatten- resp. luftexponering; 150 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.

Bilaga 3.4 Effekt av vatten- resp. luftexponering; 350 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.

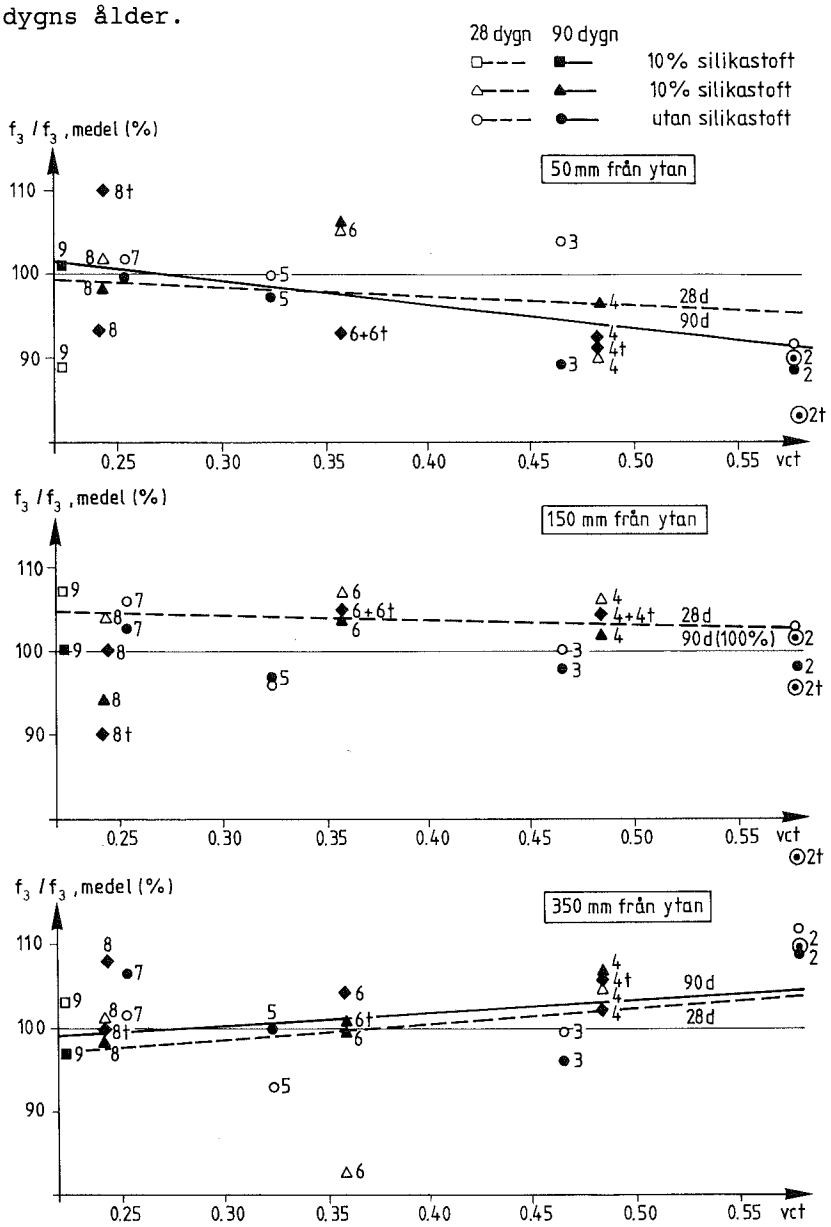
Bilaga 3.5 Effekt av gjutteknik; 50, 150 och 350 mm från kanten. 450 dygns ålder.

Bilaga 3.6 Effekt av vattenexponering; 50, 150 och 350 mm från kanten. 450 dygns ålder.

Bilaga 3.7 Effekt av luftexponering; 50, 150 och 350 mm från kanten. 450 dygns ålder.

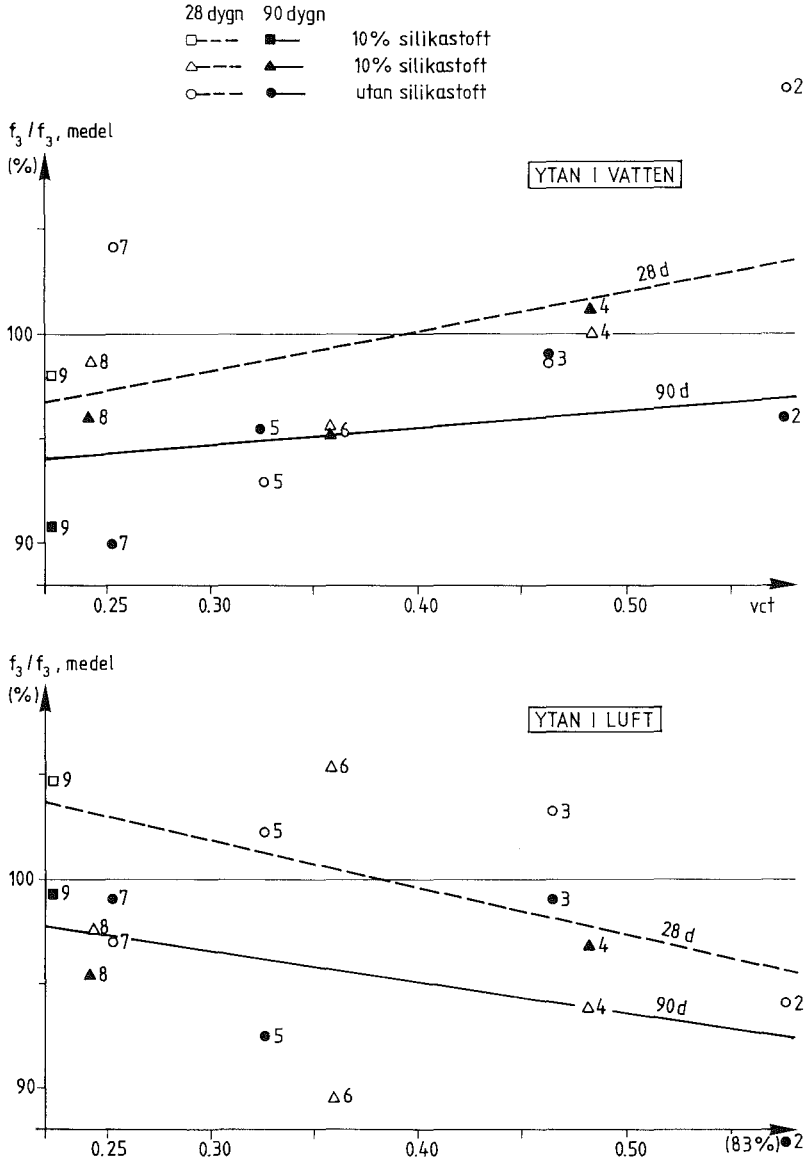
Bilaga 3.1

Effekt av gjutteknik; 50, 150 och 350 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.



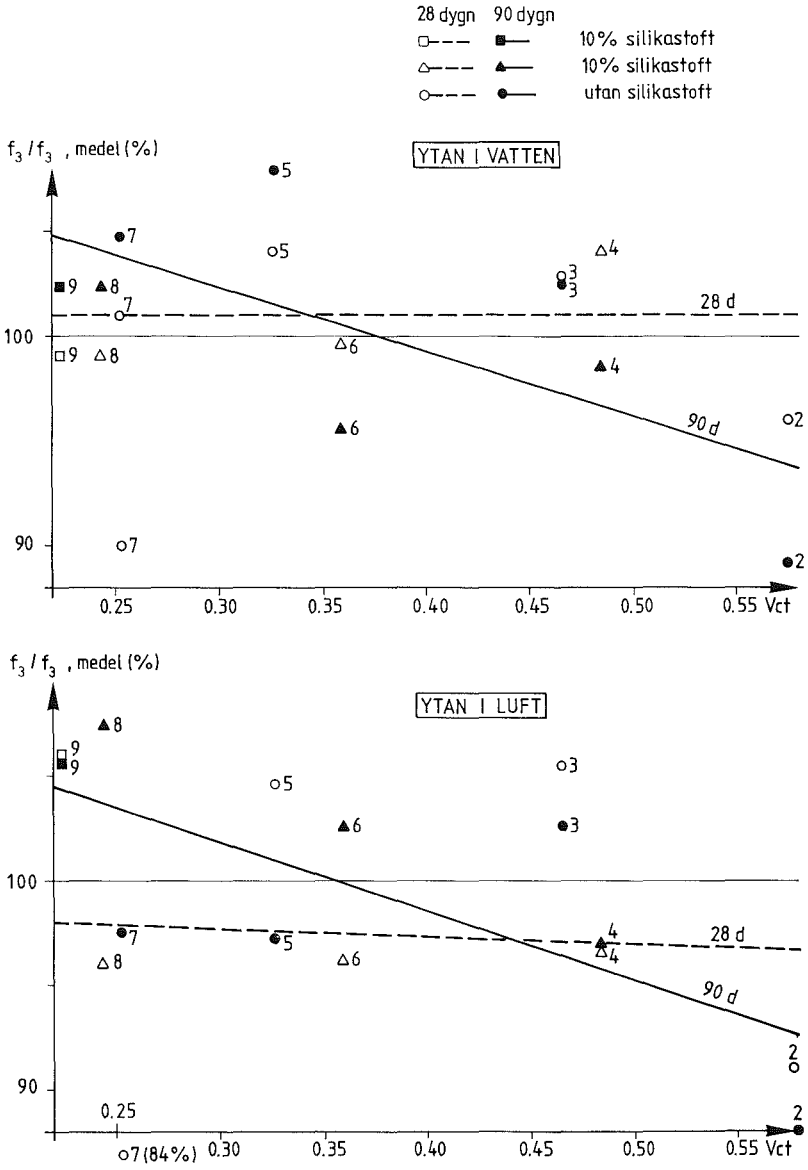
Bilaga 3.2

Effekt av vatten- resp. luftexponering; 50 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.



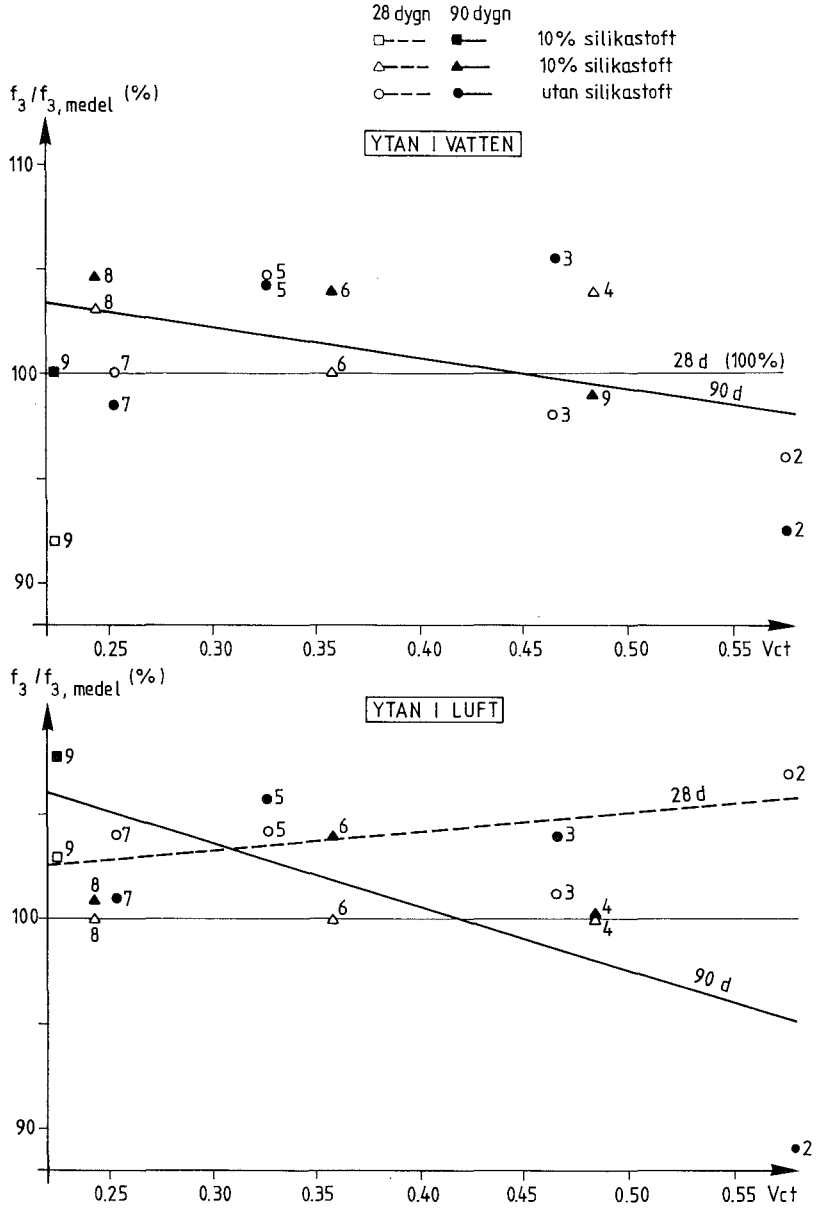
Bilaga 3.3

Effekt av vatten- resp. luftexponering; 150 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.



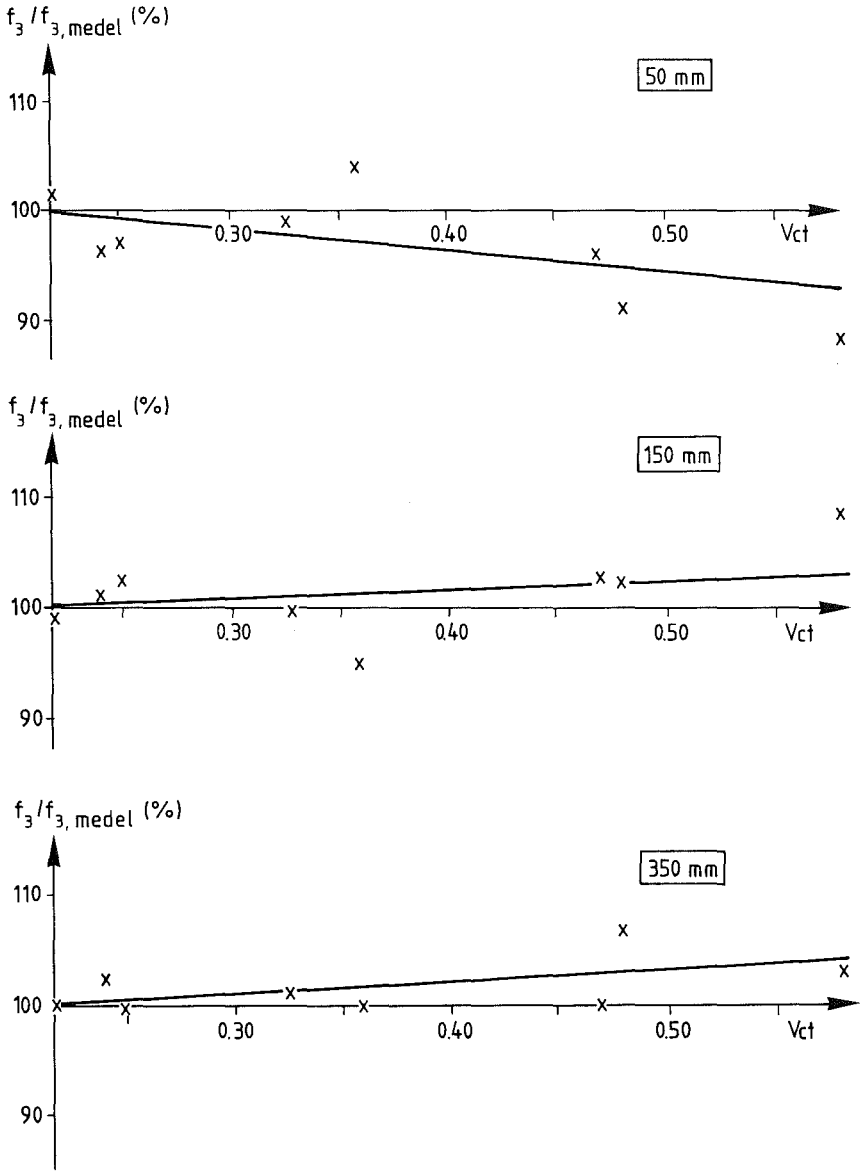
Bilaga 3.4

Effekt av vatten- resp. luftexponering; 350 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.



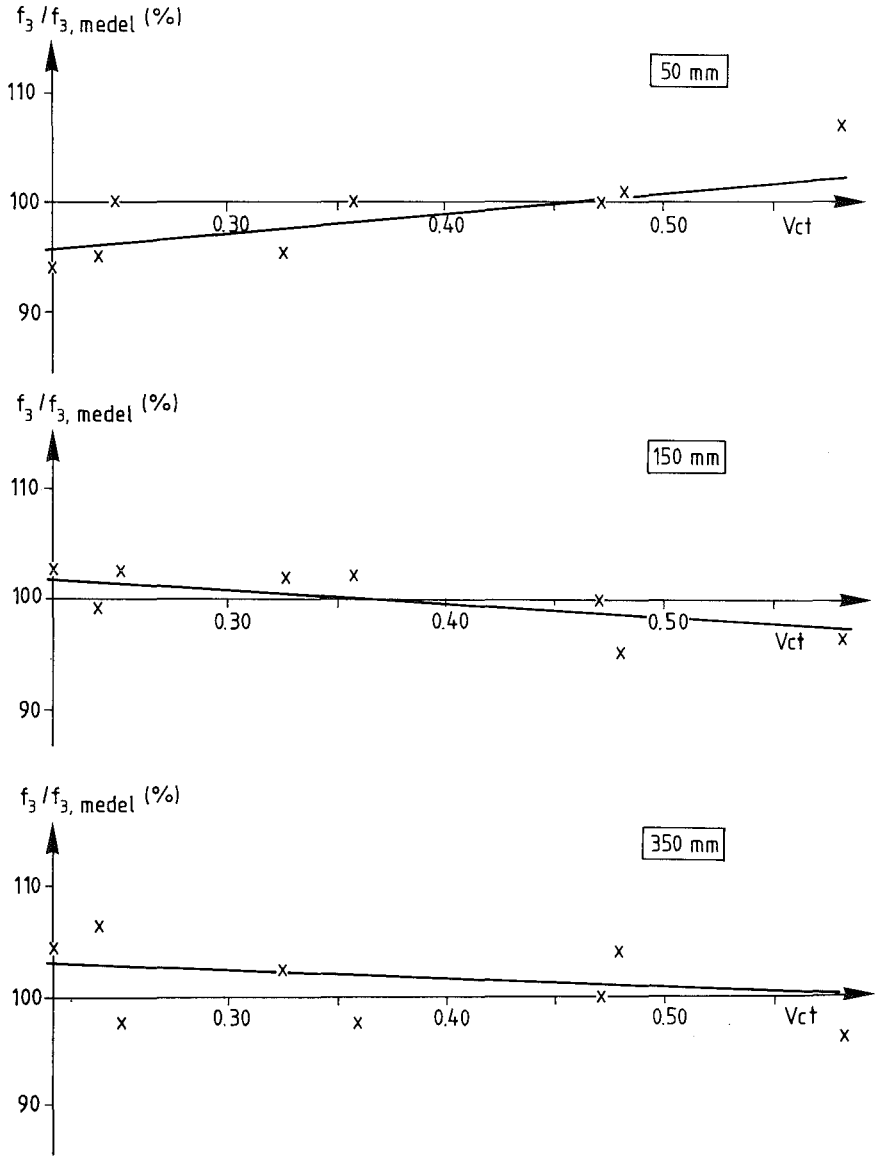
Bilaga 3.5

Effekt av gjutteknik; 50, 150 och 350 mm från kanten. 450 dygns ålder.



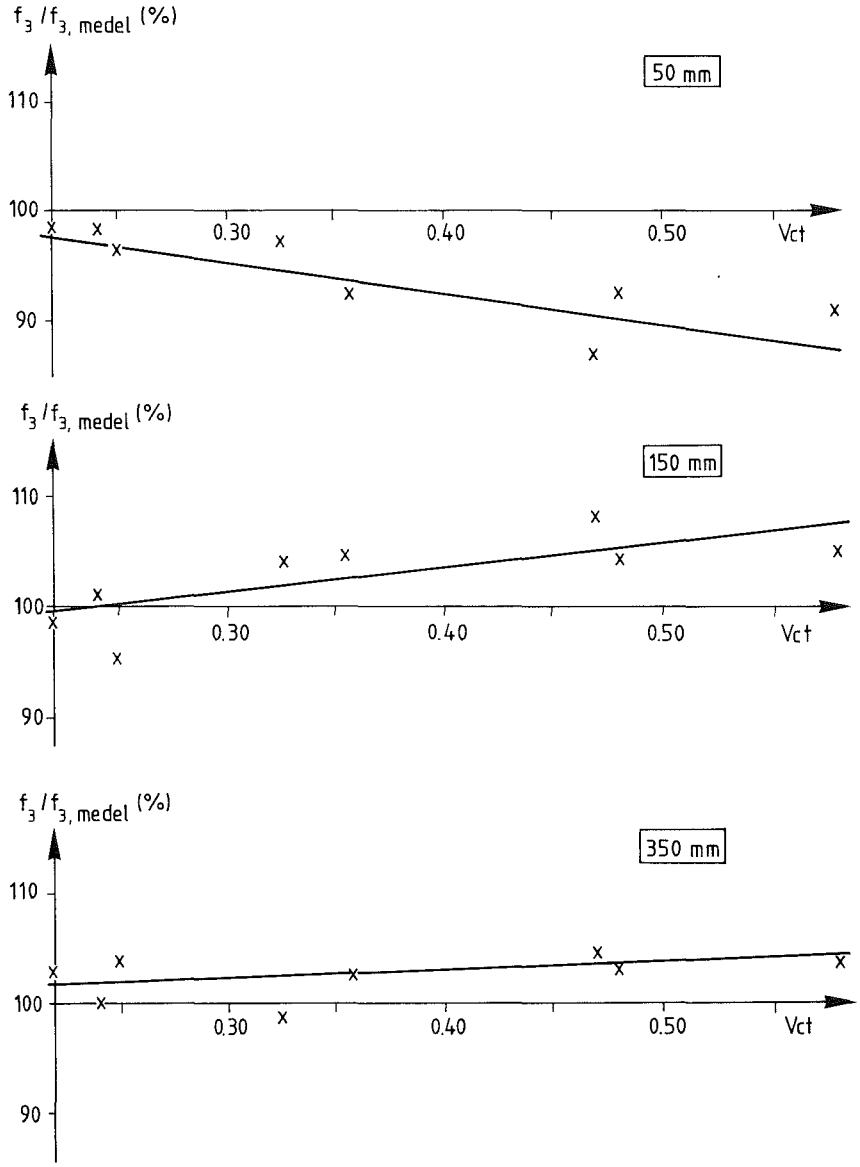
Bilaga 3.6

Effekt av vatten- exponering; 50, 150 och 350 mm från kanten. 450 dygns ålder.



Bilaga 3.7

Effekt av luftexponering; 50, 150 och 350 mm från kanten. 450 dygns ålder.



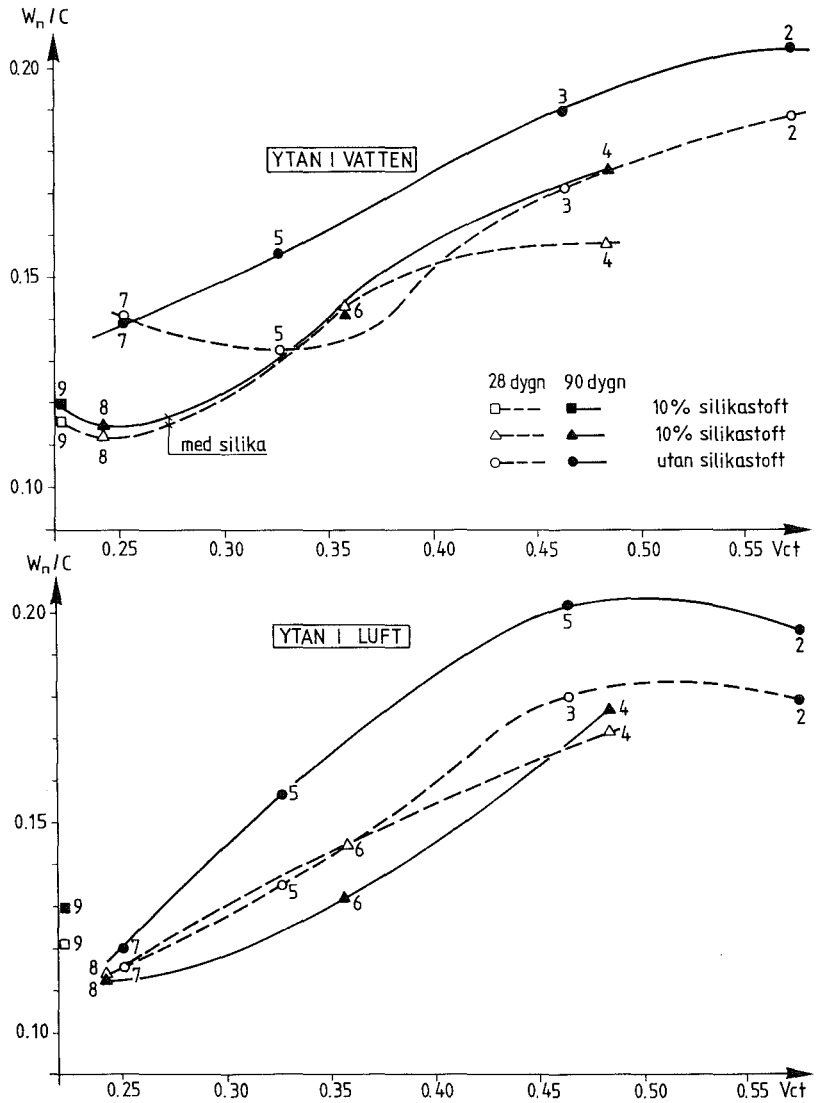
BILAGA 4: Betongskivor. Hydratation.

Bilaga 4.1 Kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C, som funktion av vct; 150 mm från betongskivans kant.

Bilaga 4.2 Kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C, som funktion av vct; 350 mm från betongskivans kant.

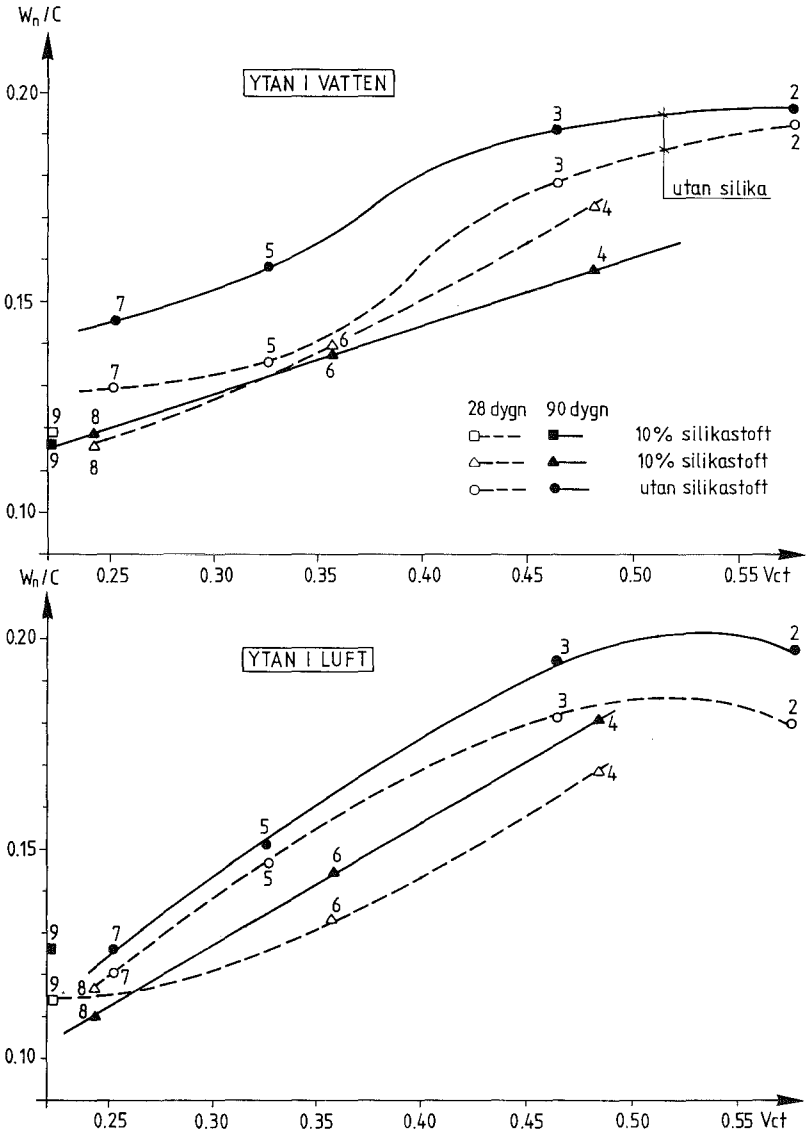
Bilaga 4.1

Kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C, som funktion av vct; 150 mm från betongskivans kant.



Bilaga 4.2

Kvot mellan hydratvatten och cement, w_n/C, som funktion av vct; 350 mm från betongskivans kant.



BILAGA 5: Betongskivor. Samband mellan relativ fuktighet och hydratvattenmängd.

Beteckningar (se även avsnitt 4.3.3):

$p=RF/x$

$x=1+(1-k)\bullet w_n/w_e=1/S_0$

RF är relativ fuktighet

w_n är hydratvattenmängd- icke förångningsbart vatten

w_e är förångningsbart vatten

k är specifik volym vid kemisk krympning

S_0 är porfyllnadsgraden efter självuttorkning till aktuell hydratationsgrad

Bilaga 5.1 Betongskivor under självuttorkning.

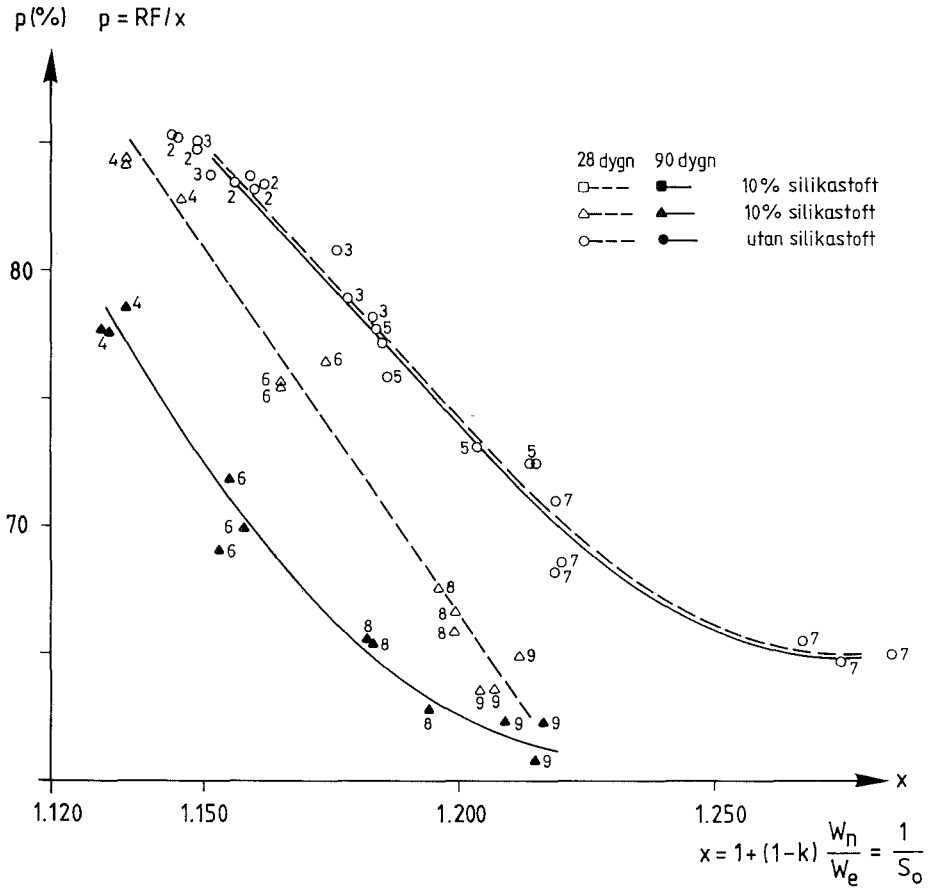
Bilaga 5.2 Betongskivor med kanten i vatten.

Bilaga 5.3 Betongskivor med kanten i luft.

Bilaga 5.4 Sammanfattning av alla värden från betongskivor samt av värden från bruk (kapitel 4: SJÄLVUTTORKNING OCH DESORPTIONSISOTERM)

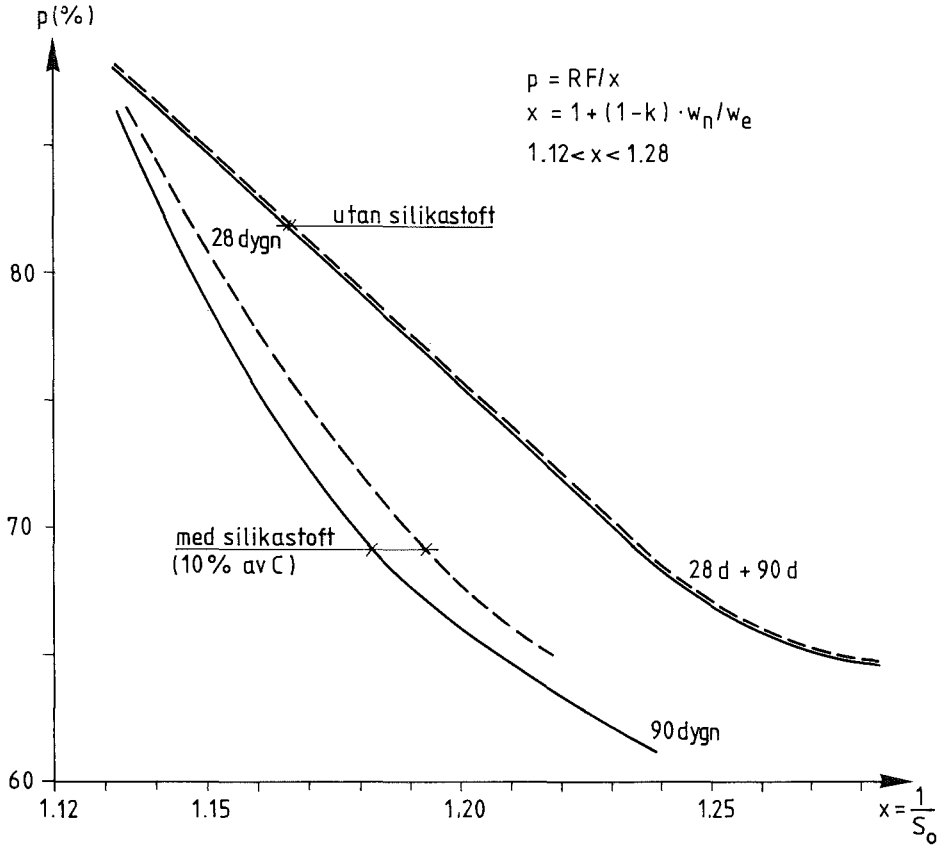
Bilaga 5.1

Betongskivor under självuttorkning.



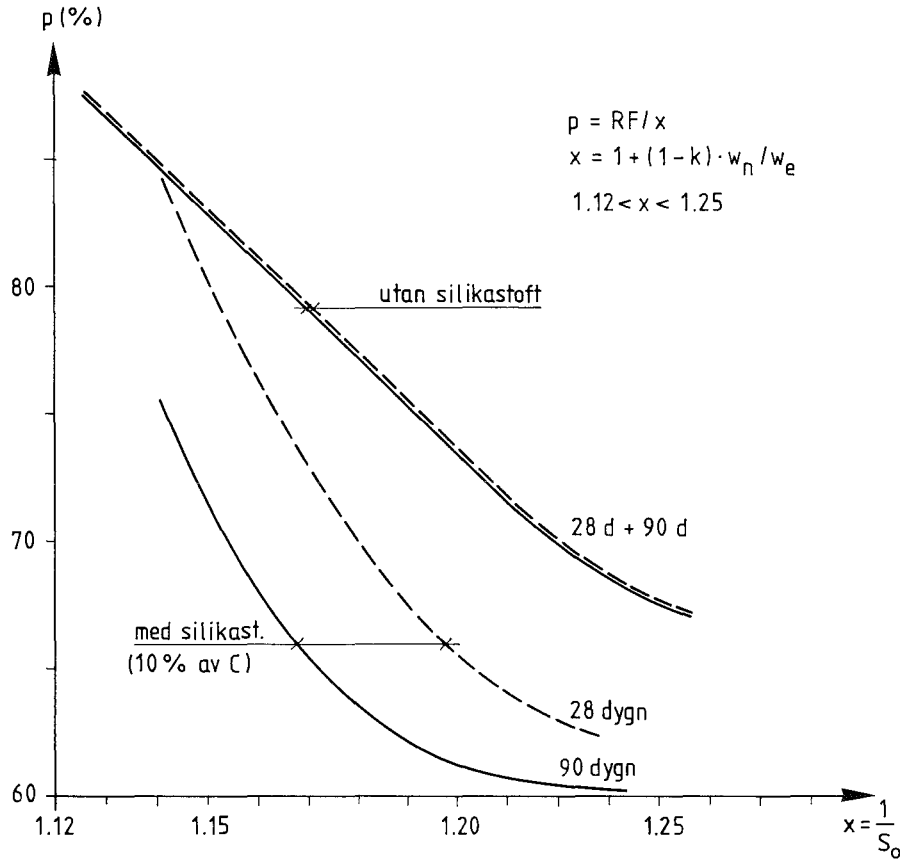
Bilaga 5.2

Betongskivor med kanten i vatten.



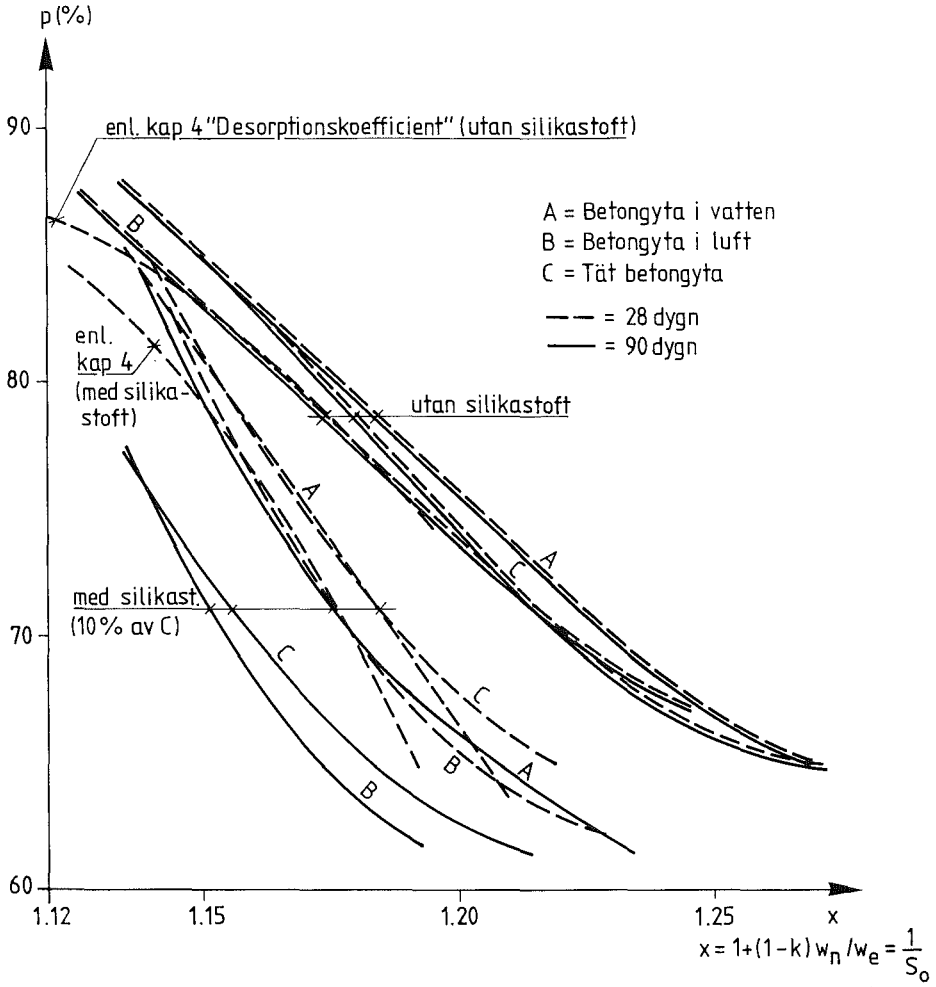
Bilaga 5.3

Betongskivor med kanten i luft.



Bilaga 5.4

Sammanfattning av alla värden från betongskivor samt av värden från bruk (kapitel 4: SJÄLVUTTORKNING OCH DESORPTIONSISOTERM)



BILAGA 6: Betongskivor. Inverkan av gjutteknik och yttre fuktförhållanden på hydratvattenmängden.

Beteckningar:

w_n/C är kvot mellan hydratvatten och cement
w_{nm}/C är medelvärdet av kvot mellan hydratvatten och cement
d är dygn

Bilaga 6.1 Effekt av gjutteknik; 50, 150 och 350 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.

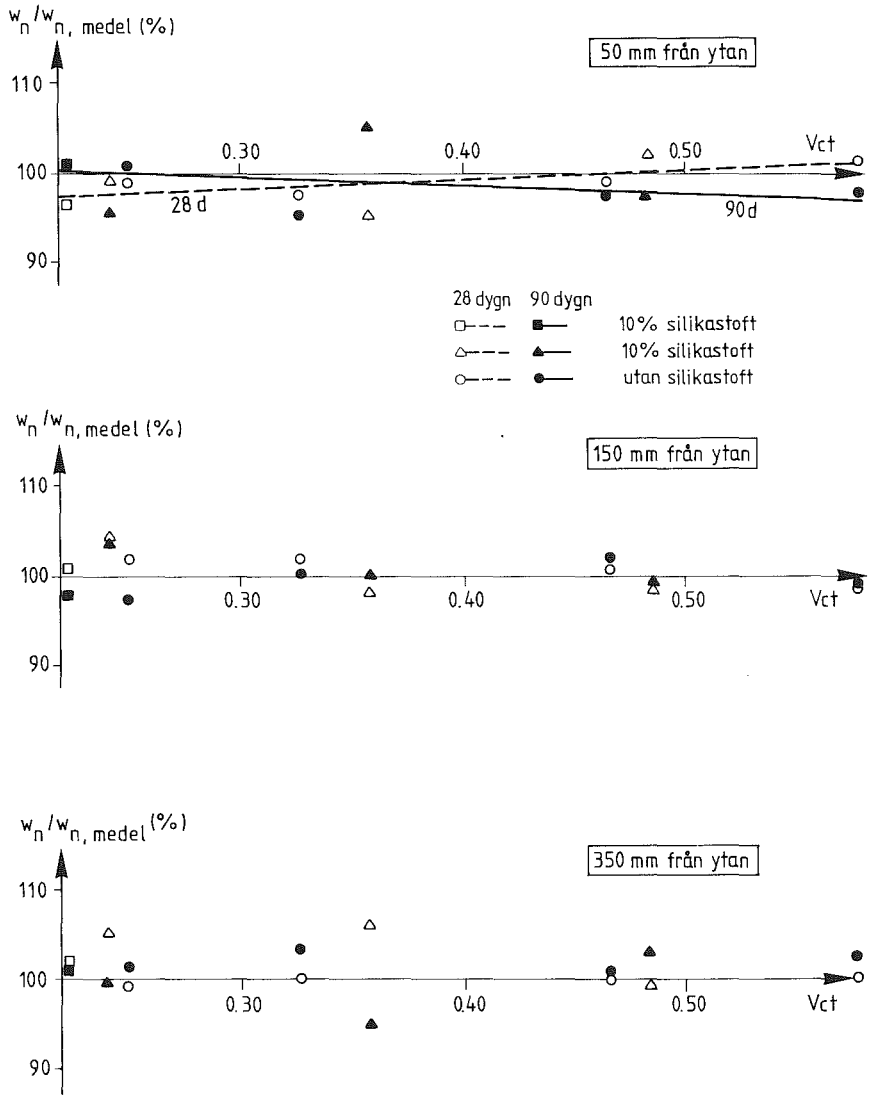
Bilaga 6.2 Effekt av vatten- resp. luftexponering; 50 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.

Bilaga 6.3 Effekt av vatten- resp. luftexponering; 150 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.

Bilaga 6.4 Effekt av vatten- resp. luftexponering; 350 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.

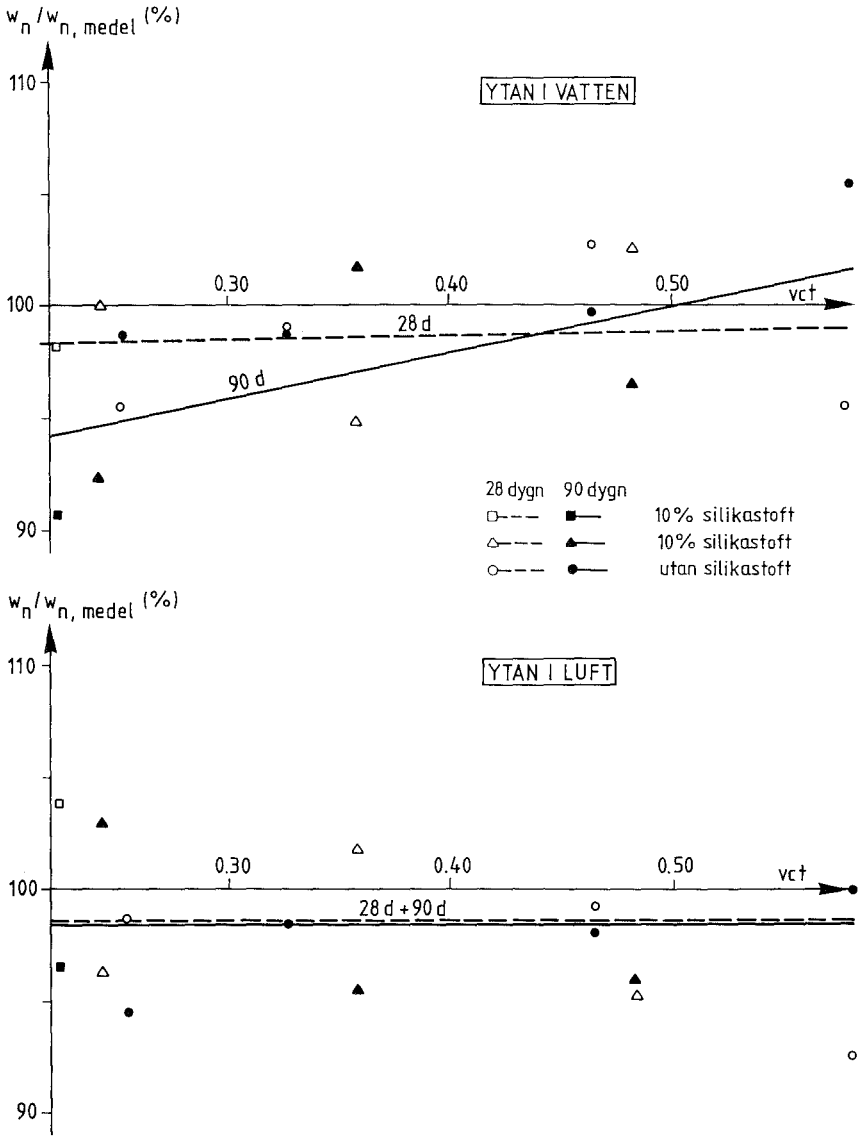
Bilaga 6.1

Effekt av gjutteknik; 50, 150 och 350 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.



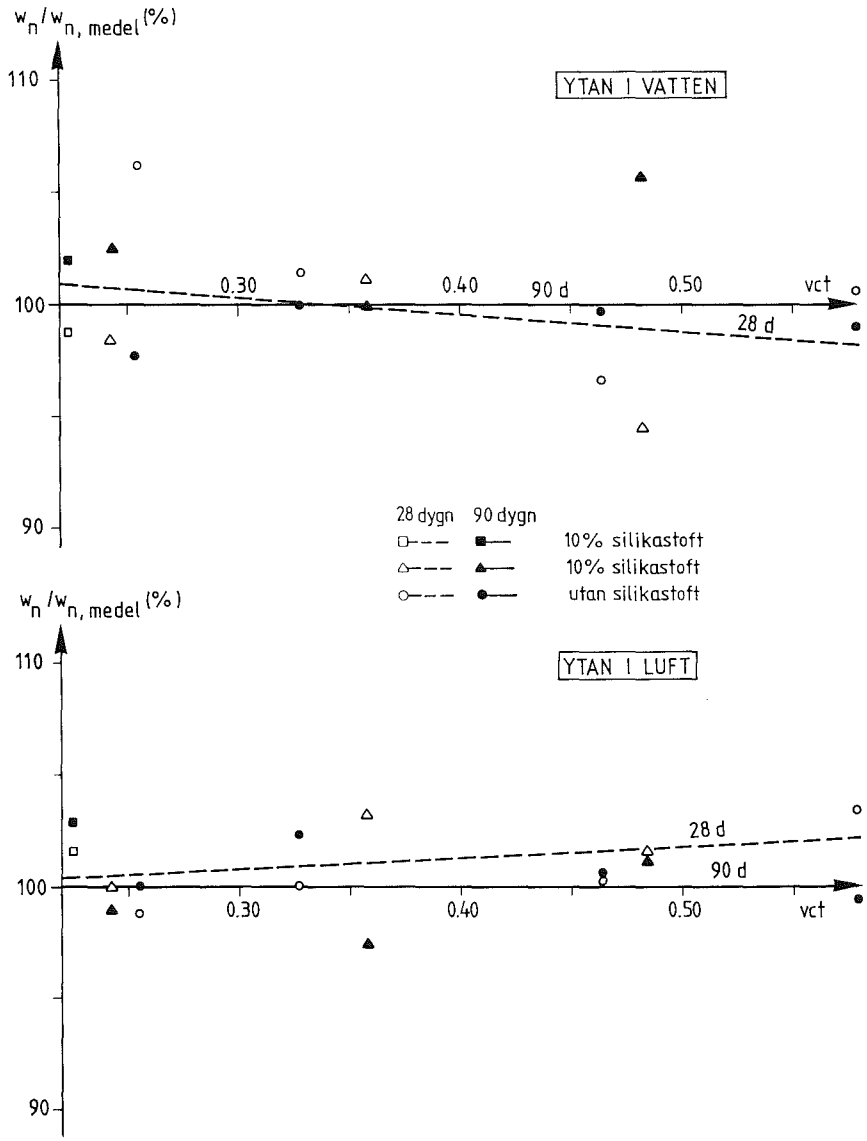
Bilaga 6.2

Effekt av vatten- resp. luftexponering; 50 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.



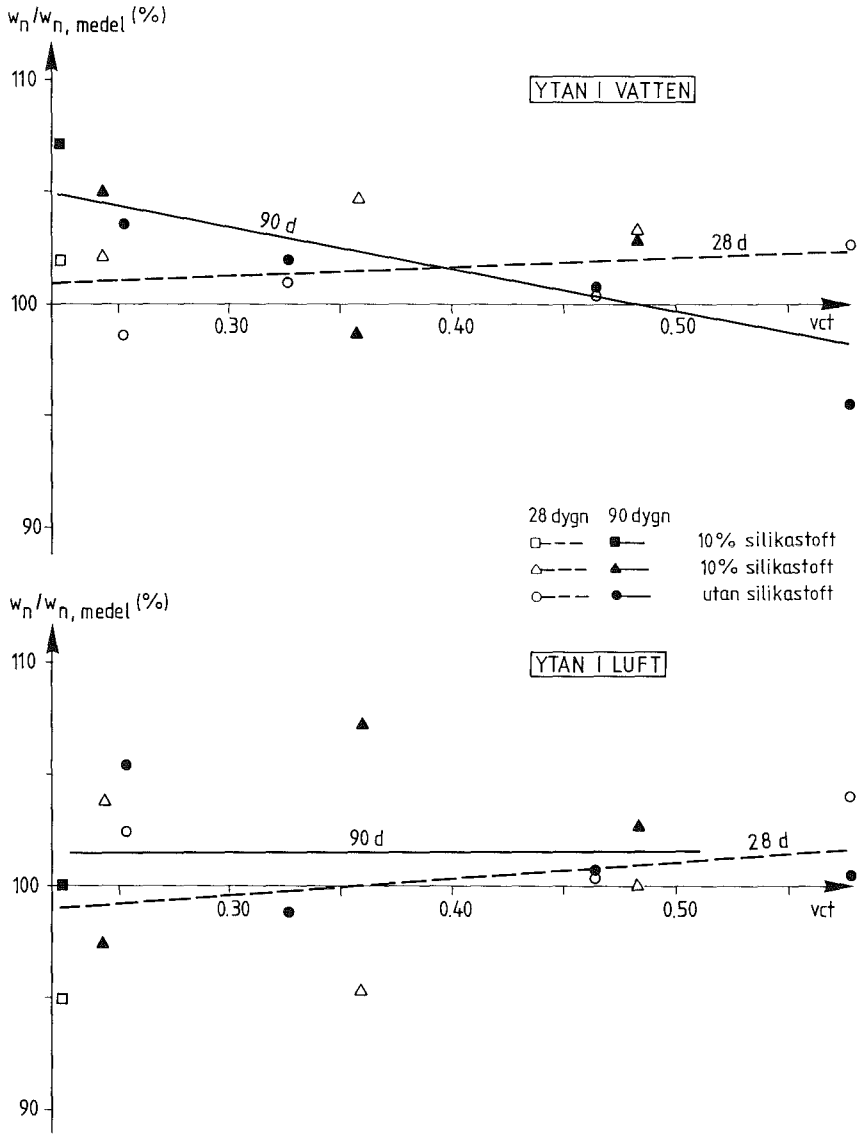
Bilaga 6.3

Effekt av vatten- resp. luftexponering; 150 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.



Bilaga 6.4

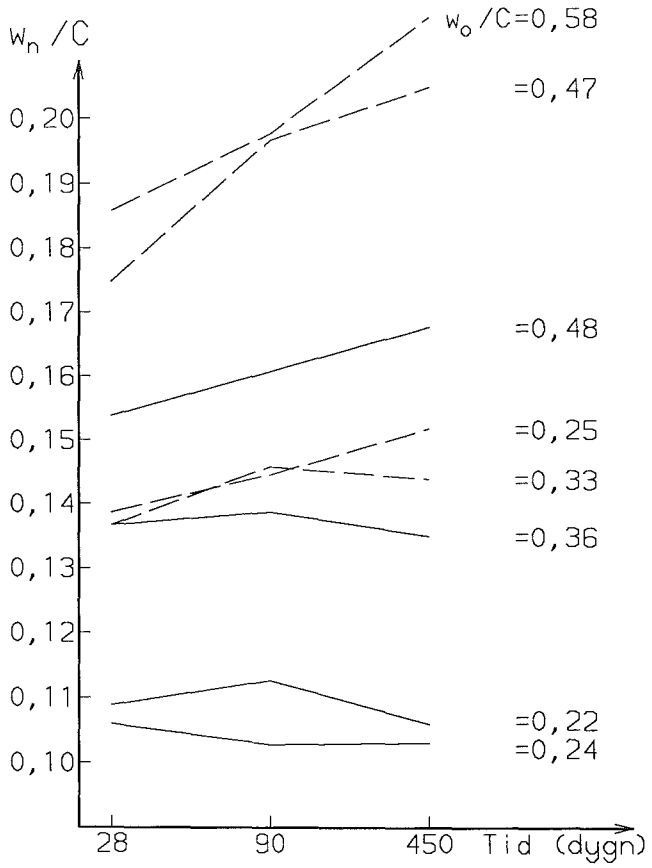
Effekt av vatten- resp. luftexponering; 350 mm från kanten. 28 och 90 dygns ålder.



BILAGA 7: Betongskivor. Långtidsuppföljning av hydratvattenmängden; självuttorkad betong.

Beteckningar:

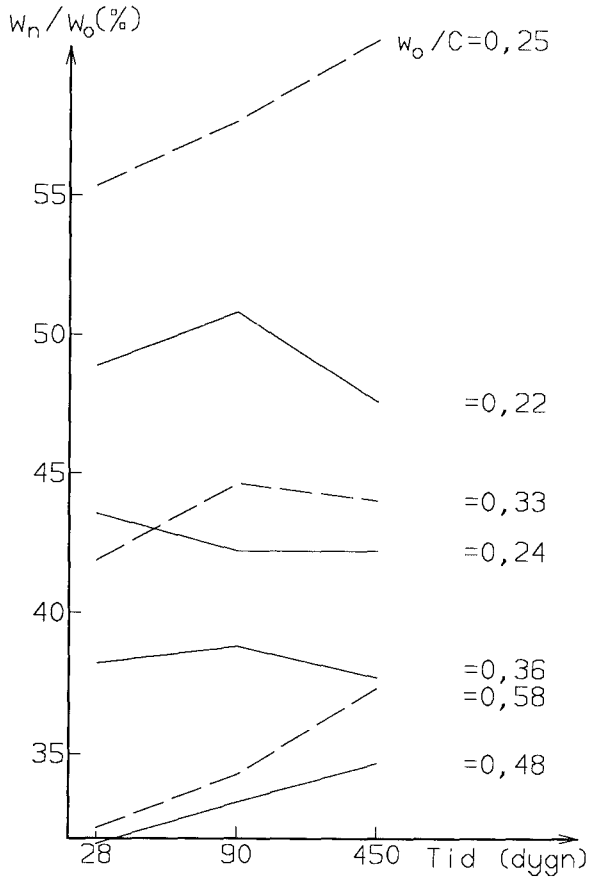
w_n/C är kvot mellan hydratvatten och cement
w_0/C är kvot mellan blandningsvatten och cement
--- utan silikastoft
—— 10% silikastoft



BILAGA 8: Betongskivor. Långtidsuppföljning av relation mellan hydratvatten och blandningsvatten; självuttorkad betong.

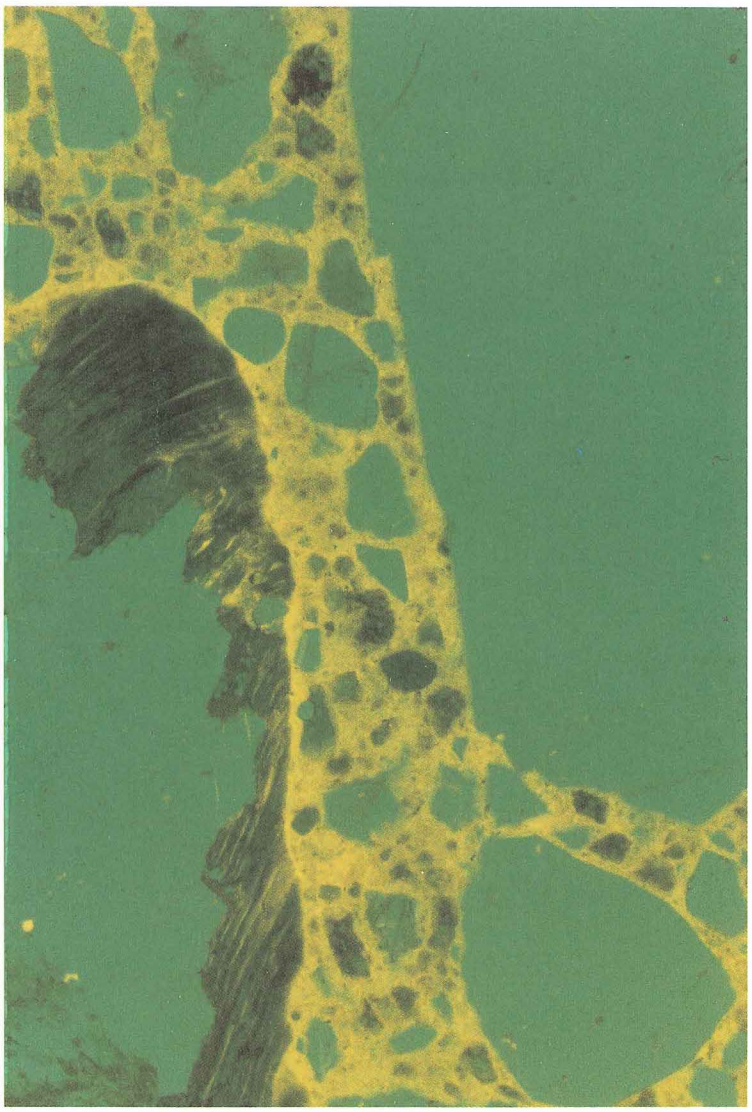
Beteckningar:

w_n/C är kvot mellan hydratvatten och cement
w_0/C är kvot mellan blandningsvatten och cement
--- utan silikastoft
—— 10% silikastoft

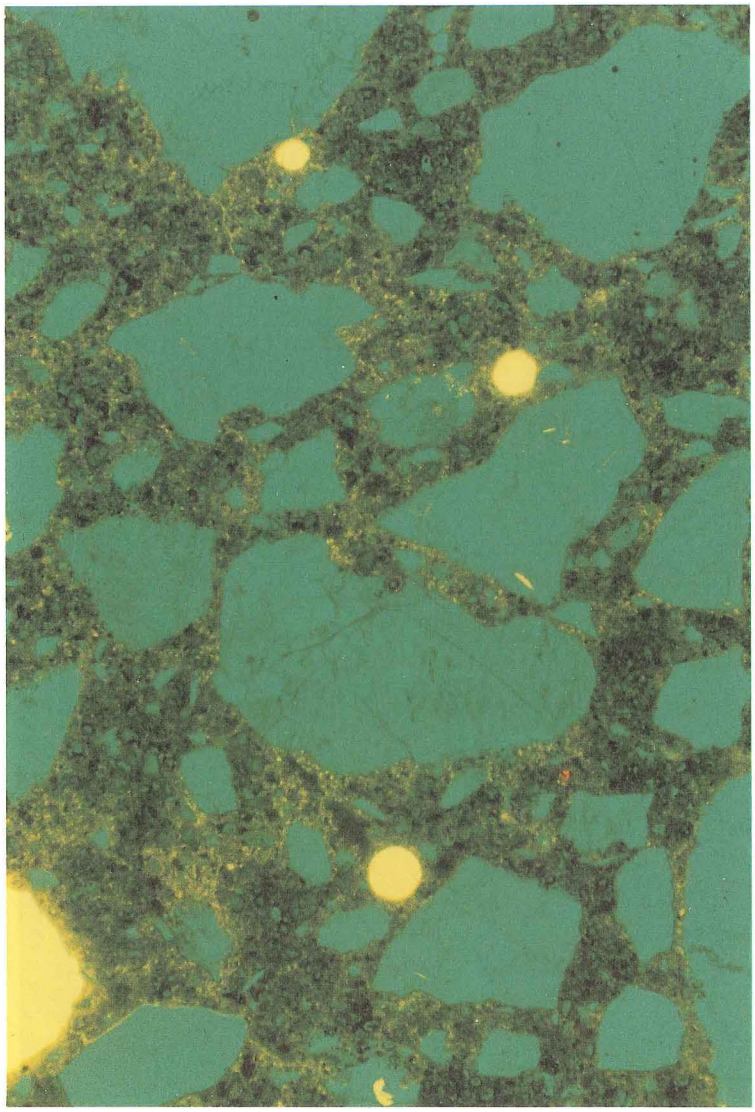


BILAGA 9 Mikrostruktur hos betong. Studier enl av **Pyy (1990).**

Bilaga 9.1 Betong utan silikastoft. Vct=0.60



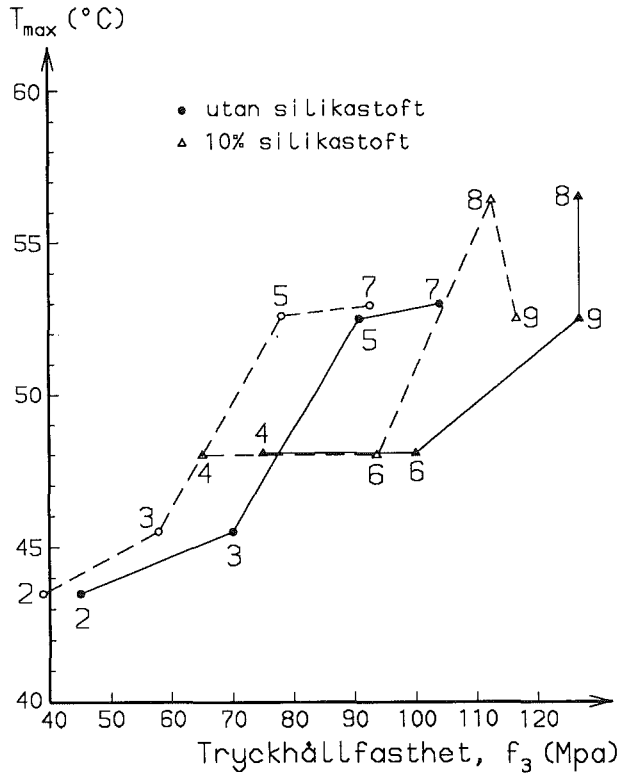
Bilaga 9.2 Betong med 10% silikastoft. Vct=0.24



BILAGA 10: Värmeutveckling. Tryckhållfasthet och maximal betongtemperatur.

Beteckningar:

T_{max} är maximal temperatur i kalorimeter
f_3 är tryckhållfasthet hos utborrad cylinder
---- är 28 dygns ålder vid tryckprovning av cylinder
—— är 90 dygns ålder vid tryckprovning av cylinder
2-9 är blandningsnummer



BILAGA 11. TILLÄMPNING 1: Platta på mark

Innehåll: Sida

11.1	Målsättning	318
11.2	Bakgrund	318
11.3	Förförsök- proportionering	320
11.3.1	Målsättning	320
11.3.2	Recept	320
11.3.3	Mätmetod och felkällor	322
11.3.4	Resultat och diskussion	322
11.3.5	Slutsatser av förförsök	326
11.4	Huvudförsök	327
11.4.1	Allmänt	327
11.4.2	Recept och konsistens	328
11.4.3	Gjutning av betongplatta	329
11.4.4	Härdningsförhållanden	329
11.4.5	Mätmetod för RF och felkällor	330
11.4.6	Resultat	332
11.4.7	Diskussion	335
11.5	Slutsatser	335

11.1 Målsättning

En tillämpning av högpresterande betong i en platta på mark genomfördes för att i fält kontrollera om de i laboratorium; kapitel 6, erhållna självuttorkningsresultaten kunde tillämpas praktiskt. En fullskalig platta på mark göts därför. Plattan exponerades för väder och vind under realistiska byggförhållanden. Som årstid för bygget valdes hösten då den naturliga uttorkningen då är som sämst till följd av hög yttre relativ luftfuktighet.En uppföljning gjordes av fuktförhållanden i och vid plattan.

Plattan på mark utfördes med en effektiv isolering mot markfukt och markkyla (200 mm cellplast), så att inte dessa faktorer skulle påverka resultaten. Vidare gavs plattan en relativt stor tjocklek (175 mm betong) så att inte den yttre uttorkningen skulle bli avgörande utan effekten av självuttorkning skulle kunna avslöjas.

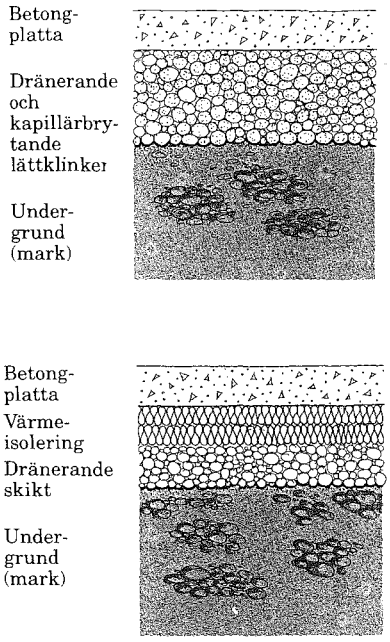
11.2 Bakgrund

En platta på mark skall, samtidigt som den utgör grundläggning, skydda de boende mot markfukt och marklukt. **Hansson (1989)** visar i figur 11.1 exempel på nuvarande tekniska lösningar av betongplatta på mark.

Nilsson (1977) har anvisat en beräkningsmetodik för erforderliga uttorkningstider av betong, bl a för platta på mark. Uttorkningstiderna baserar sig på cement av typ Limhamn. **Nilsson (1983)** ger vidare råd betr utformning av platta på mark samt sammanfattar kunskaper därom och exempel på lösningar.

Elmarsson (1991) framhåller betydelsen av ett effektivt fuktskydd mot marken och hänvisar därvid till USA-normer.

I kapitel 6 visas ett förslag på en dimensioneringsgång vid val av recept för tillämpning av självtorkande betong, se figur 6.15. Figuren visar den resulterande relativa fuktigheten, RF, vid en viss ålder, vid ett visst vbt_{eff} och en definierad ytexponering (luft, vatten eller självuttorkning).



Figur 11.1. Exempel på tekniska lösningar av platta på mark. Hansson (1989)

Figur 11.1. Example of design for a floating concrete slab on ground. Hansson (1989)

11.3 Förförsök- proportionering

11.3.1 Målsättning

Syftet med förförsöken var att prova ut en gjutbar (pumpbar) betong, som var avjämningsbar med laser och sloda. Ett medelvärde av relativa fuktigheten, RF=90%, skulle nås vid 28 dygns ålder vid vattenexponering. RF=80% skulle nås vid 90 dygns ålder genom självuttorkning.

11.3.2 Recept

Som visades i kapitel 5 kan gjutbar konsistens även erhållas hos betong med mycket lågt vbt genom tillsats av silikastoft. Silikastoft ger vidare en betydligt lägre RF i betongen jämfört om det ej skulle ingå i receptet; se figur 6.7. Om de åsyftade RF-nivåerna, 90 resp 80%, skulle erhållas krävdes enligt figur 6.15 ett högsta vbt_{eff} av 0.25. Detta motsvarar vct=0.30 vid 10% silikastoft räknat på cementinnehållet. Vidare beaktades erfarenheter från kapitel 5 vid receptvalet vad gällde gynnsam inverkan av partikelsprång och flyttillsats på gjutbarheten.

Vid förförsöket provades recept enligt tabell 11.1. Beteckningar ges under figuren. All ballast hämtades från Sydsten AB i Hardeberga dvs kvartsit 8-12 mm, delvis krossat grus 8-16 mm och grusig sand typ Vieröd 0-8 mm. Fuktkvoter, siktkurvor och detaljrecept ges i DATARAPPORT TVBM-7011; 11. Varje sats omfattade 20 l. Naturfuktig ballast användes. Följande blandningsordning tillämpades:

1. Torrblandning i ½ minut.
2. Våtblandning i 1 minuter exkl. flytmedel.
3. Blandning med flytmedel i 3 minuter.
4. Vid behov efterdoserades flytmedel efter 30, 60 min. osv

Tabell 11.1 Förförsök. Recept (kg/m^3, retarder o. luftporb. i g)

Sats	C	S	0-8	8-12	8-16	SP 62	P F	R10	P L	Vct	Vbt	Vbt_{eff}
301	440	44	1125	750		10.5				.30	.27	0.25
302	440	44	1050	825		10.1				.30	.27	0.25
303	440	44	975	900		6.7				.30	.27	0.25
304	440	44	900	975		7.6				.30	.27	0.25
305	440	44	825	1050		8.4				.30	.27	0.25
306	440	44	750	1125		7.6				.30	.27	0.25
331	440	66	1125	750		10.5				.33	.29	0.25
351	440	66	975	900		10.5				.35	.30	0.27
332	440	66	900	1000		10.1				.32	.28	0.25
333	460	66	900	1000		10.1				.32	.28	0.25
334	450	65	880	980		9.2				.32	.28	0.25
335	450	65	880	980		8.4				.32	.28	0.25
352	440	66	950	950		10.1				.33	.29	0.25
353	440	66	950	950		10.1		88		.33	.29	0.25
336	450	65	880	980		7.6				.32	.28	0.25
337	450	65	880	980		6.7				.32	.28	0.25
321	450	62	880	980		6.7				.32	.28	0.25
322	450	62	880	980		6.7				.33	.29	0.25
						+2.1						
323	450	62	880	980		3.8				.33	.29	0.25
324	450	62	880	980			3.2	150		.32	.28	0.25
							+1.8					
325	450	62	880	980			7.7	150		.33	.28	0.25
325a	450	62	880	980			7.7	180		.33	.28	0.25
							+1.8					
323a	450	62	880	980		3.8	3.1			.33	.28	0.25
							+1.8					
323b	450	62	880	980		2.9	4.2			.33	.28	0.25
							+1.8					
326	450	62	880	980			8.8	230		.33	.28	0.25
327	450	62	880	980			8.8	230		.34	.30	0.27
							+1.8					
328	460	55	900	960		3.8	3.2			.30	.27	0.24
329	460	55	900	960		3.8	3.2			.32	.28	0.25
							+3.2					
330	450	62	880	980		3.8	3.2			.33	.29	0.26
325b	450	62	880	980			7.7	180		.33	.29	0.26
							+1.8					
323c	460	62	910	950		3.8	3.2			.33	.29	0.26
							+1.8					
3300	460	68	890	960		3.8	3.2			.33	.29	0.26
							+1.8					
3301	450	66	870		940	3.8	3.2		60	.33	.29	0.26
							+1.8					
3302	460	65	870		940	3.8	3.2		60	.33	.29	0.26
						+0.8	+1.8					
							+1.1					
3303	450	65	870		940	3.8	3.2		60	.34	.30	0.26
						+0.8	+1.8					
							+1.1					

Beteckningar i tabell 11.1:

C = anläggningscement
S = silikastoft
SP 62 = flyttillsats (naftalen, torrvikt)
P F = flyttillsats (Peramin F, melamin, torrvikt)
R10 = typ av retarder (torrvikt)
+ = efterdoserad flyttillsats, 30 minuter efter ursprunglig blandning (den andra efterdoseringen efter 60 minuter)
P L = luftporbildare (Peramin L, vinsolharts, torrvikt)
0-8 = Vieröd grusig sand 0-8 mm (natursand)
8-12 = Kvartsitisk sandsten, Hardeberga, 8-12 mm (makadam)
8-16 = Vieröd grus 8-16 mm (delvis krossat naturgrus)
$Vbt_{eff} = w_0/(C+2 \bullet S)$
w_0 = blandningsvatten inkl <u>all</u> fukt

11.3.3 Mätmetod och felkällor

Mätningarna gick i huvudsak ut på att fastställa konsistensen hos de olika betongtyperna vid olika tidpunkter dvs att hitta den optimala blandningen. Som konsistensmått nyttjades därvid omformningstal och sättmått. Tryckhållfastheten bestämdes för standardkuber på vissa av betongtyperna som en kontroll av hållfasthetsutvecklingen.

Den största felkällan var variationer i materialfukt främst i sand. Aktuella fuktkvoter redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 11.1. Omformningsmätaren krävde exakt centrering för att ge reproducerbara resultat. Vidare gav variationer i temperaturen på ballasten olika konsistens.

11.3.4 Resultat och diskussion

I tabell 11.2 redovisas resultat från de 35 st olika förblandningarna. Beteckningar ges under figuren.

Tabell 11.2 Förförsök. Recept (kg/m^3-R10 o. PL i g) och resultat

Sats	C	S	0-8	8-12	8-16	SP 62	P F	R10	P L	Sm0	Om0	Om1	K0
301	440	44	1125	750		10.5							S
302	440	44	1050	825		10.1							S
303	440	44	975	900		6.7				40			P
304	440	44	900	975		7.6				30			S
305	440	44	825	1050		8.4							S
306	440	44	750	1125		7.6							S
331	440	66	1125	750		10.5							S
351	440	66	975	900		10.5				150			H
332	440	66	900	1000		10.1					65		
333	460	66	900	1000		10.1					42		
334	450	65	880	980		9.2				160	50	89	H
335	450	65	880	980		8.4				130	51	106	L
352	440	66	950	950		10.1				100	42	96	T
353	440	66	950	950		10.1		88		100	36	86	L
336	450	65	880	980		7.6				100	60	96	L
337	450	65	880	980		6.7				100	65	78	L
321	450	62	880	980		6.7					80		T
322	450	62	880	980		6.7					40	68	L
						+2.1							
323	450	62	880	980		3.8					34	29	H
324	450	62	880	980			3.2	150			28		H
							+1.8						
325	450	62	880	980			7.7	150			80	79	T
325a	450	62	880	980			7.7	180			38	52	L
							+1.8						
323a	450	62	880	980		3.8	3.1				28	37	H
							+1.8						
323b	450	62	880	980		2.9	4.2				38	38	L
							+1.8						
326	450	62	880	980			8.8	230			60	48	L
327	450	62	880	980			8.8	230			45		H
							+1.8						
328	460	55	900	960		3.8	3.2				200	112	S
329	460	55	900	960		3.8	3.2				80		T
							+3.2						
330	450	62	880	980		3.8	3.2				55		L
325b	450	62	880	980			7.7	180					
							+1.8						
323c	460	62	910	950		3.8	3.2					28	F
							+1.8						
3300	460	68	890		960	3.8	3.2				22	35	F
							+1.8						
3301	450	66	870		940	3.8	3.2		60		22	35	F
							+1.8						
3302	460	65	870		940	3.8	3.2		60		32	25	H
						+0.8	+1.8						
							+1.1						
3303	450	65	870		940	3.8	3.2		60		33	27	H
						+0.8	+1.8						
							+1.1						

Beteckningar till tabell 11.2:

C = anläggningscement
S = silikastoft
SP 62 = flyttillsats (naftalen, torrvikt)
P F = flyttillsats (Peramin F, melamin, torrvikt)
R10 = retarder (torrvikt)
+ = efterdoserad flyttillsats, 30 minuter efter ursprunglig blandning (den andra efterdoseringen efter 60 minuter)
P L = luftporbildare (Peramin L, vinsolharts, torrvikt)
0-8 = Vieröd grusig sand 0-8 mm (naturmaterial)
8-12 = Kvartsitisk sandsten, Hardeberga, 8-12 mm (makadam)
8-16 = Vieröd grus 8-16 mm (delvis krossat naturgrus)
Sm0 = Sättmått (mm) vid blandning
Om0 = Omformningstal vid blandning
Om1 = Omformningstal 1 timme efter blandning
K0 = Bedömd konsistens vid blandning
S = Styv
P = Plastisk
T = Trögflytande
L = Lättflytande
H = Halvflytande
F = Fullflytande

Följande observationer gjordes för de olika blandningarna:

Sats 301-306, 331, 351:

Resultat från dessa förblandningar med vct=0.30 (vbt_{eff}=0.25) visade sig ha obrukbar konsistens (för styv). Det var därför nödvändigt att öka vct. För att uppnå samma självuttorkning på lång sikt ökades även innehållet av silikastoft, från 10 % räknat på cementinnehållet till 15%. På så sätt kunde samtidigt kravet på vbt_{eff}=0.25 uppfyllas.

Sats 332-337, 352-353:

Blandningarna hade vct=0.32 och vct=0.33 (vbt_{eff}=0.25). Den senare blandningen, med vct=0.33 (vbt_{eff}=0.25), gav en flytbetong av acceptabel konsistens.

Sats 321-325, 323a, 323b, 325a:

Dessa blandningar var avsedda för optimering av mängden flyttillsats vid konstant ballastkornkurva. Vid vct=0.33 (vbt_{eff}=0.25) visade sig den optimala mängden vara ca 1.5% torrvikt SP62 räknat på cementvikten. Simulering utfördes även av flytmedelstillsättning på byggplatsen, ca 1/2 timme efter ursprunglig blandning. Efterdoseringen utgjordes av ca 1/3 av SP62-tillsatsen. Betongen erhöll då flytande (nästan blöt) konsistens. Ännu efter ytterligare 1/2 timme låg omformningstalet på en acceptabel nivå.

Sats 326-330, 323c, 325b:

Blandningarna avsåg en optimering av flytmedlet melamin (Peramin F). En komplettering med retarder (R10) gav låga omformningstal även 1 timme efter blandning. I detta fall utfördes en kompletterande flytmedelstillsats 30 minuter efter blandning. Retarderingen gav ytbindning på betongen efter ca 4 timmar och genomhärdning efter ca 14 timmar vid ca +15°C. Detta ansågs som acceptabelt eftersom en platta på mark i stort sett är en statisk overksam konstruktion. Vid en bjälklagskonstruktion, däremot, är det m h t formrivning oacceptabelt med så stor retardering som 14 timmar.

Sats 3300-3303:

På betongleverantörens inrådan ökades i dessa betongblandningar partikelsprånget genom byte av fraktion från 8-12 till 8-16. Dessutom valdes naturgrus i st f makadam. Naturgrus gav en

mindre friktion mot pumpröret jämfört med makadam (pumpbarheten ökas). Kornkurvans fördelning gjorde det dock nödvändigt att räkna med en glättningsmaskin som ett komplement till slodan. Resultaten visade vidare att tillsats av luftporbildare förbättrade konsistensen. Kompletterande flytmedelstillsats utfördes 30 minuter efter det att satsen blandats färdigt första gången.

Tryckhållfasthet:

Vid förförsöken tillverkades standardkuber, vilka lagrades på standardiserat sätt. Enligt DATARAPPORT TVBM-7011; 11.3 uppnåddes för sats 333, 352, och 353 en tryckhållfasthet av 92 MPa efter 9 dygn. Spridningen i resultaten mellan de olika kuberna understeg 1 MPa.

11.3.5 Slutsatser av förförsök

* Resultaten av förförsöken visade hur mödosam en optimering av en högpresterande betong kan vara eftersom i detta fall både gjutbarheten och självuttorkningsförmågan skall vara god. Detta understryker de krav på noggrannhet vilka diskuterades i kapitel 5.

* Vid val av krav på vilken RF-nivå som skall uppnås måste man vara realistisk. Eljest kan man erhålla recept som ger för stora mängder tillsatsmedel. Enligt kapitel 10 kan en överdosering av superplasticerare ge oönskade fördröjningar i härdningsprocessen (retardation).

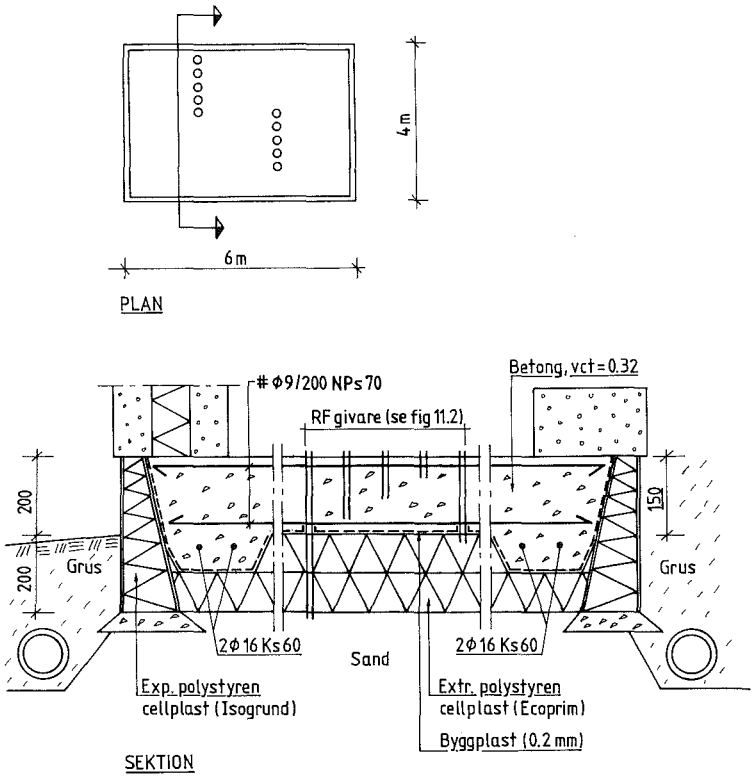
* Pumpbarheten kan, vid konstant vct, ökas på olika sätt, dels genom tillsats av luftporbildare, dels genom val av mindre andel krossad ballast och/eller ökat partikelsprång.

* Det är viktigt att tänka genom inverkan på konsistensen av betongtransporten till byggplatsen.

11.4 Huvudförsök

11.4.1 Allmänt

Konstruktionen för huvudförsöket visas i figur 11.2. Undergrunden består av icke tjälskjutande finsand. Grundvattenytan ligger ca 2 m under plattans underkant. Som markisolering valdes ett skikt av 200 mm extruderad cellplast. Över värmeisoleringen lades det ett diffusionstätt skikt av 0.2 mm byggplastfolie. Plattans tjocklek var 150-200 mm, medan planmåtten var 4 x 6 m.



Figur 11.2 Golvkonstruktion vid huvudförsök. Plan och sektion

Figure 11.2 Floor design of main test. Plan and section

11.4.2 Recept och konsistens

I tabell 11.3 redovisas recept och konsistens för betongen i huvudförsöket efter justering med aktuella fuktkvoter. (Detaljrecept, fuktkvoter m m redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 11.6).

Tabell 11.3 Recept (kg/m^3) och konsistensmått vid huvudförsök

C	S	0-8	8-16	SP 62	P F	P L (g)	Vct	Vbt	Vbt_{eff}	Sm1 (mm)	Sm2 (mm)	Om2
450	67	900	950	3.8	3.2	60	0.322	0.280	0.249	210	200	65

Beteckningar:

C = anläggningscement
S = silikastoft
SP 62 = flyttillsats (naftalen, torrvikt)
P F = flyttillsats (Peramin F, melamin, torrvikt)
P L = luftporbildare (Peramin L, vinsolharts, torrvikt)
0-8 = Vieröd grusig sand 0-8 mm (naturmaterial)
8-16 = Vieröd grus 8-16 mm (delvis krossat naturgrus)
Sm1 = Sättmått (mm) 1 timme efter blandning
Sm2 = Sättmått (mm) 2 timmar efter blandning
Om2 = Omformningstal 2 timmar efter blandning

Fuktkvot i ballast:

En stor felkälla, som ger avvikelser i åsyftat vct, är fuktkvoten i ballasten. Fuktkvoten varierar från leverans till leverans. Vidare är det besvärligt att komma åt material för provtagning eftersom förvaring sker i slutna silos. Prov får tas då materialet släpps ut ur silon och det är då för sent från receptsynpunkt. Möjlighet finns numera för fuktkvotskontroll i botten av materialfickor (isotopisk metod), se **Persson (1991D).** Denna metod är lämplig för att erhålla kvalitetssäkrade leveranser av högpresterande betong. Vid fältförsöket kontrollerades fuktkvoten i ballasten varefter justering av receptet utfördes i efterhand.

11.4.3 Gjutning av betongplatta

Betongtillverkningen utfördes inom ramen för ordinarie produktion vid Sydsten AB, Hardeberga, se **Persson (1990C, 1991B, 1991C)**. Konsistensmått togs och 6 st standardkuber tillverkades på byggplatsen. Eftersom betongen vid ankomst till byggplatsen hade ett sättmått som översteg 200 mm (konsistens: fullflyt) ansågs det ej nödvändigt att efterdosera någon superplasticerare. 5 m^3 betong pumpades ut på 17 minuter. Plattan avjämnades med vibrostav (50 mm diameter) samt med laser och sloda. Det stora innehållet av grov ballast gjorde betongen något svår att avjämna. Slodningen påbörjades 45 minuter efter gjutstart och tog ca 50 minuter att utföra för 24 m^2.

Förmodligen hade avjämningsarbetet underlättats om slodningen påbörjats omedelbart efter pumpning. Gjutpersonalen fick utföra en gungande rörelse för att tixotropi i betongytan skulle uppnås. De efterlyste någon form av vibrator på slodan för att underlätta avjämningen. Mätutrustningen för RF hindrade vidare användning av glättningsmaskin. (6 st standardkuber tillverkades på byggplatsen vid försöket för provning av tryckhållfasthet).

11.4.4 Härdningsförhållanden

Yttäckning med presenning utfördes 3 timmar efter gjutning. Plattan utsattes för väder och vind som vid en normal byggprocess. Den tidiga yttäckningen med presenning utfördes för att undvika ytuttorkning och därmed plastiska krympsprickor. Detta är en nödvändighet vid all tillverkning av högvärdig betong. Presenningen togs bort 7 dygn efter gjutning. Fram till takläggning föll 174 mm regn varav 79 mm direkt på plattan. En stor del av det övriga regnvattnet rann dock ned på plattan genom glipor o dyl. Presenningen verkade vidare hindrande för uttorkning under de torrperioder som förekom de 7 första dygnen efter gjutning.

Värmen sattes på 28 dygn efter gjutning. Ca 2 månader efter gjutning simulerades golvläggning genom att 0.2 mm byggfolie lades ut på halva plattan och tejpades i kanterna.

11.4.5 Mätmetod

Läget för i betongplattan ingjutna el-rör avsedda för RF-mätning och termoelement visas i figur 11.3. Mätning av RF och temperatur har utförts på följande platser:

1. i sandskiktet omedelbart under isolerskiktet

2. i överkant av isolerskiktet (under plastfolien)

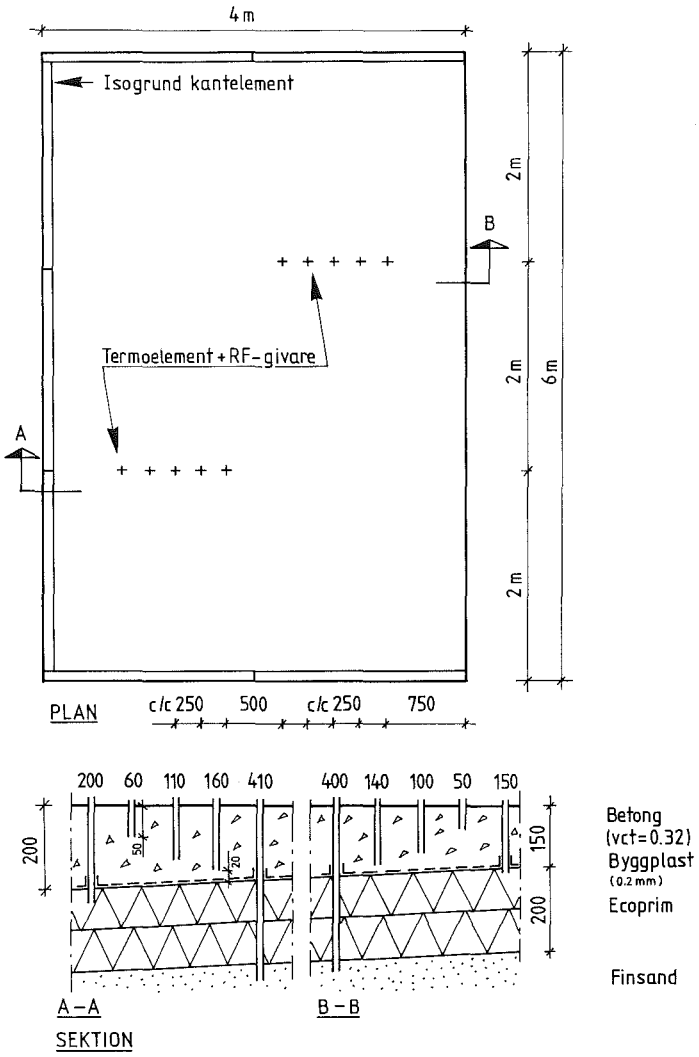
3. i underkant av betongplattan

4. mitt i betongplattan

5. 50 mm från överkanten av betongplattan

2 st grupper av mätenheter placerades med 2 m avstånd från varandra. Mätning av RF och temperatur utfördes varje vecka under 3 månaders tid med början veckan efter gjutning samt med en slutmätning vid 6 månaders ålder.

Eftersom en dubblering utfördes av antalet mätplatser, gav detta en extra säkerhet mot eventuella fel. I samband med murning av väggar på plattan lossade ett par av mäthålens tätanordningar varför dessa hål utsattes för regn. Mätvärdena från dessa hål togs ur serien tills dess mäthålen självtorkat.



Figur 11.3 Mätpunkter vid huvudförsöket. Siffror i sektionen betecknar mätpunkternas djup under betongytan (= mätpunktens nummer)

Figure 11.3 Measurement points in the floor during main test. Numbers in the section indicate the depth of the measuring points (= number of measuring point)

Kompensation för temperaturskillnader mellan betong och RF-givare utfördes med hjälp av mättnadsångtrycket vid aktuell temperatur. Detta var nödvändigt eftersom RF-givaren i vissa fall verkade värmeledande från det varma utrymmet ovanför plattan och ned genom betongen och i synnerhet genom isoleringen. Kompensation för temperaturskillnader mellan betong och RF-givare utfördes på följande sätt:

1. Temperatur och RF avlästes för givaren.

2. Aktuellt ångtryck beräknades för den aktuella temperaturen och det aktuella RF-värdet.

3. Temperaturen avlästes för termoelementet.

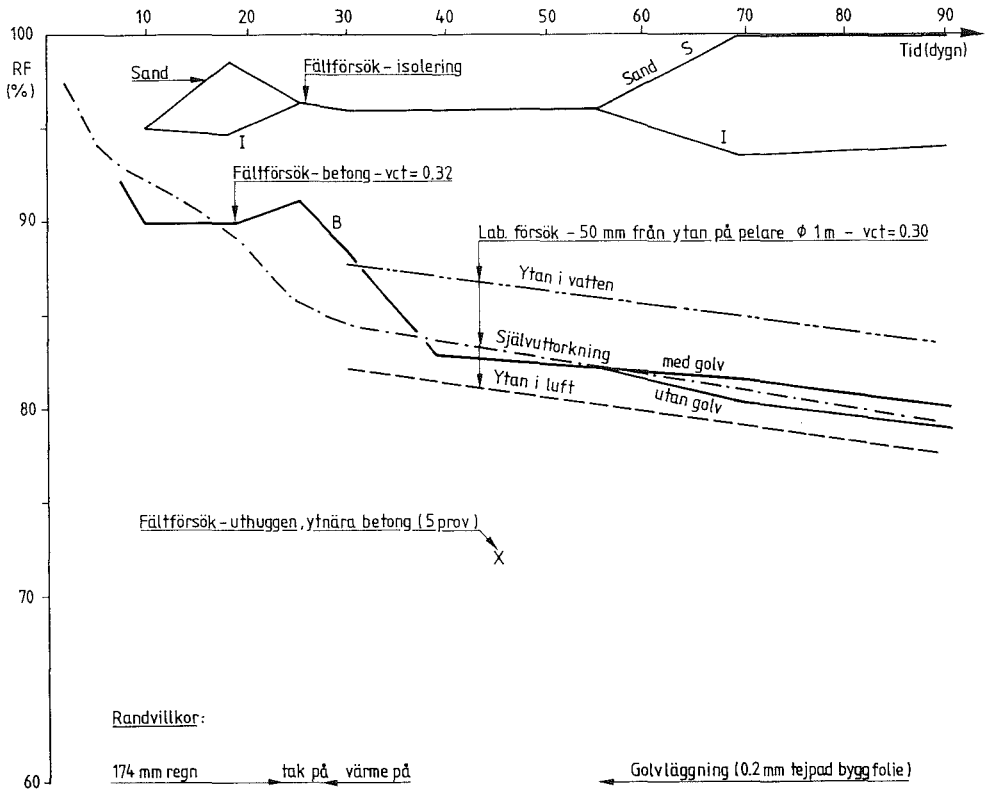
4. Aktuellt mättnadsångtryck fastställdes för den avlästa temperaturen på termoelementet.

5. Verklig RF bestämdes genom division av aktuellt ångtryck med aktuellt mättnadsångtryck.

Kalibrering i 10°C klimatrum alternativt i 20°C av RF-givare utfördes före och efter mätning. Detta utfördes för att erhålla ungefärligen samma temperatur vid mätning som kalibrering. Ytbetong höggs ut och RF-bestämdes för att inverkan av regn skulle kunna undersökas. Slutligen uppmättes nederbörden i anslutning till plattan.

11.4.6 Resultat

I figur 11.4 visas relativa fuktigheten, RF, i betongplattan, i överkant isolerskikt samt i sanden som funktion av tiden. (Mätrådata redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011, 11.7, 11.8 och 11.9).

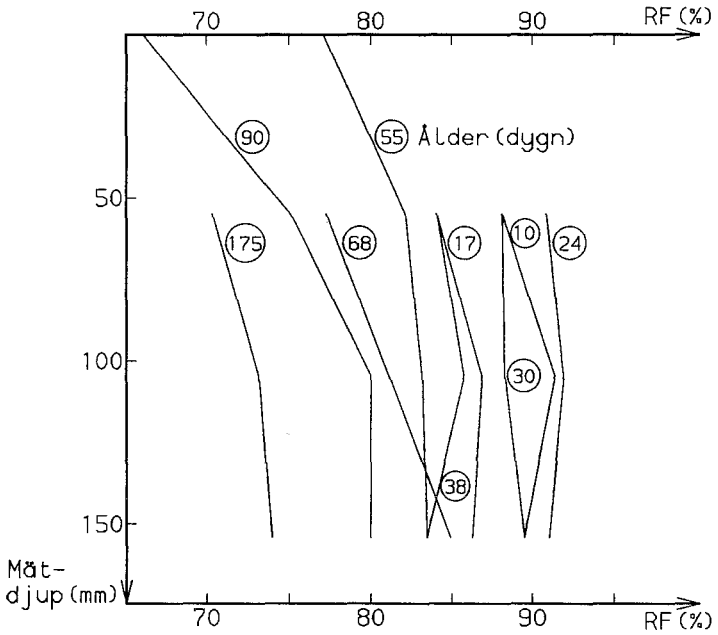


Figur 11.4 RF i betongplattan, i överkant isolerskikt samt i sanden som funktion av tiden

Figure 11.4 Relative humidity in concrete slab, upper edge of insulation layer and in sand as function of time

Resultaten i figur 11.4 visar en självuttorkning i betongen till RF=90% vid 10 dygns ålder. Vid 24 dygns ålder erhölls p g a regn en ökning till RF=91%. 30 dygns ålder gav RF=89% samt 39 dygns ålder RF=83%. En särskild mätning utfördes vid 90 dygns ålder gav RF= 75%, se DATARAPPORT TVBM-7011, 11.2. Trots att plattan utsattes för mycket kraftig nederbörd uppnåddes en RF av 90%

10 dygn efter gjutning. Detta är ofta tillräckligt för att golvmaterial skall kunna läggas i synnerhet som plattan sedan fortsätter att självuttorka och når 80% RF efter 90 dygn samt ca 70% RF ett halvår efter gjutning. RF-utveckling fram till 175 dygns ålder, i form av fuktprofiler, visas även i figur 11.5.



Figur 11.5 RF-utveckling i betongplatta fram till 175 dygns ålder som funktion av mätdjupet (mm). Siffror betecknar ålder i dygn.

Figure 11.5 Relative humidity in concrete slab as function of depth at different age of the concrete. Age (days) indicated by figures

Tryckhållfastheten, f_1, för standardkuber nådde vid 39 dygns ålder f_1=126 MPa (125, 126, 128 MPa) och vid 90 dygn f_1=133 MPa (131, 132, 135 MPa); **Nitz** *(1990)*.

11.4.7 Diskussion av resultat

Resultaten <u>överensstämmer mycket väl</u> med de som erhållits i kapitel 6. Enligt figur 6.15 kan man förvänta sig en självuttorkning hos vattenexponerad betong ned till ca 88% efter 28 dygn, när vbt_{eff}= 0.25. Vid fältförsöket erhölls RF= 89% vid 30 dygns ålder.

Vid 90 dygns ålder och luftexponering ger figur 6.15 RF=77% (vid vbt_{eff}=0.25). Vid fältförsöket erhölls RF= 75%.

Vid 450 dygn och luftexponering ger figur 6.15 RF=70% (vid vbt_{eff}=0.25). Vid fältförsöket erhölls RF= 72% vid 175 dygn.

Resultaten från fältförsöket pendlar således mellan de värden för vattenexponering och luftexponering som ges i figur 6.15.

11.5 <u>Slutsatser</u>

Fältförsöket visar att man mycket väl kan utforma betongrecept som såväl ger god gjutbarhet som hög självuttorkningsförmåga.

Man kan vid val av tillräckligt lågt vct och tillräckligt stor silikastoftmängd få betonger som självuttorkar så snabbt även under ogynnsamma yttre betingelser att golv utan risk kan läggas ca 14 dagar efter det att tak lagts på byggnaden.

Fältförsöket verifierar dessutom de undersökningsresultat av självuttorkning som erhållits i laboratorium; kapitel 6.

BILAGA 12: TILLÄMPNING 2: ARMERAD BALK

Innehåll: Sida

12.1	Målsättning	338
12.2	Bakgrund	338
12.3	Genomförande- principiellt	340
12.4	Förförsök	340
12.4.1	Målsättning	340
12.4.2	Recept	341
12.4.3	Mätmetod och felkällor	342
12.4.4	Resultat och diskussion	343
12.4.5	Slutsatser	344
12.5	Huvudförsök	345
12.5.1	Tillverkning av provbalkar	345
12.5.1.1	Armering	345
12.5.1.2	Recept vid huvudförsök	351
12.5.1.3	Tillverkning av provbalkar	351
12.5.1.4	Felkällor och noggrannhet vid tillverkning	354
12.5.1.5	Härdning av provbalkar	354
12.5.1.6	Slutsatser	355
12.5.2	Provningar	355
12.5.2.1	Allmänt	355
12.5.2.2	Provningsmetoder	355
12.5.2.3	Felkällor	357
12.5.2.4	Resultat	358
12.5.2.5	Slutsatser	361
12.6	Sammanfattning av balkförsök	373

12.1 Målsättning

Målsättningen var dels att se om man kunde tillverka vanliga slakarmerade balkar av högpresterande betong, dvs med en tryckhållfasthet överstigande 120 MPa, dels att utröna om man kunde utnyttja den höga betonghållfastheten rent statiskt eller om skadliga fenomen kunde inträffa vid betongtryckbrott. Undersökningen begränsades till normal- eller överarmerade slanka balkar med ett mycket litet tvärsnitt. Balkarna tillverkades under realistiska industriella förhållanden som en del av ordinarie produktion i en elementfabrik. Verifieringen av gjutbarhet skedde genom kontroll i laboratorium av balkarnas moment- och tvärkraftskapacitet.

12.2 Bakgrund

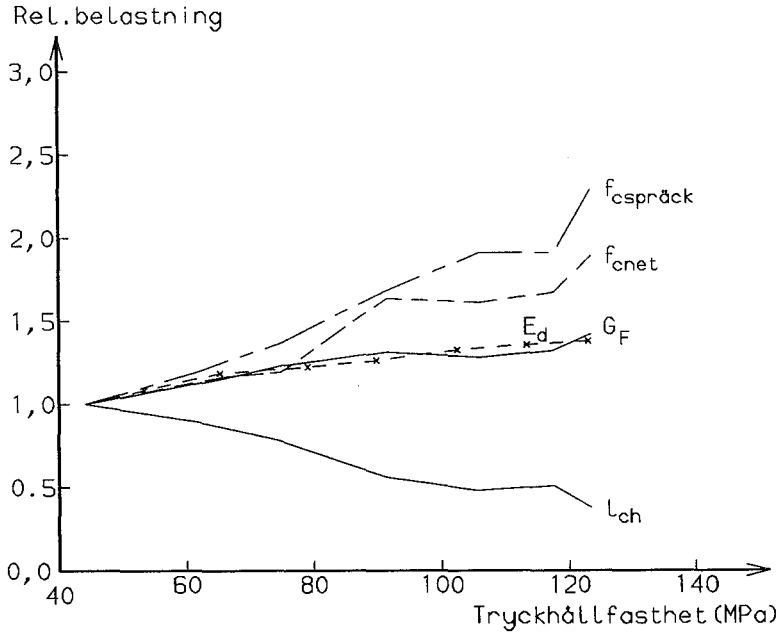
Ju högre betongens tryckhållfasthet är desto sprödare torde betongen bli vilket kan innebära ökande risker för konstruktionskollaps. Kunskaperna om armerade högpresterande betongkonstruktioners brottbeteende är mycket liten. Viss forskning har bedrivits utomlands men så gott som ingen alls i Sverige.

Det finns i Sverige inga redovisade arbeten beträffande armerade balkar med värden på tryckhållfasthet överstigande 120 MPa. För att genomföra armeringsberäkningen tillämpades därför finländska resultat beträffande brottstukningen hos högpresterande betong (2.7 $^{o}/oo$); se **Persson (1990D)**. På materialområdet genomfördes det dock ett grundläggande arbete av brottegenskaperna hos högpresterande betong med värden på tryckhållfastheten upp till 130 MPa; **Haghpassand (1992)**. I figur 12.1 visas resultatet av detta arbete i form av samband mellan tryckhållfasthet och följande egenskaper:

* spräckhållfasthet ($f_{cspräck}$)
* draghållfasthet (f_{cnet})
* brottenergi (G_F)

* dynamisk elasticitetsmodul (E_d)
* karaktäristisk längd (l_{ch}) vilken definieras

$$l_{ch}=G_F \cdot E_d / f_{cnet}^2 \qquad \text{----------(12.1)}$$



Figur 12.1 Relativa samband mellan tryckhållfasthet och spräckhållfasthet, draghållfasthet, brottenergi, dynamisk elasticitetsmodul samt karaktäristisk längd (l_{ch}). Haghpassand (1992).

Figure 12.1 Relationship between compressive strength and split strength ($f_{cspräck}$), tensile strength (f_{cnet}), fracture energy (G_F), dynamic modulus of elasticity (E_d) and characteristic length (l_{ch}). Haghpassand (1992)

Resultaten i figur 12.1 visar att betong som väntat får ett mera sprött brott ju mer tryckhållfastheten ökar. Sprödheten ökar nämligen med minskat värde på den karaktäristiska längden. I figur 12.1 kan man även notera en fördubbling av betongens draghållfasthet samt en ökning av elasticitetsmodulen med 50% då tryckhållfastheten ökas från 45 till 125 MPa.

12.3 Genomförande- principiellt

Ett antal armerade balkar med tvärsnittsdimensionen 100 x 200 mm tillverkades industriellt ur blandningar med vct mellan 0.24 och 0.32. Balkarna utformades endera överarmerade eller normal-armerade för att skillnaden i brottyper skulle kunna avslöjas. Tillverkningen genomfördes vid Skanska Prefab AB:s fabrik i Staffanstorp varefter balkarna provades vid LTH, Lund. Momentkapaciteten provades därvid på enklaste sätt genom en punktlast i balkmitt medan tvärkraftskapaciteten fastställdes genom att fragmenten från momentförsöken skjuvades till brott. Före tillverkningen av balkarna var det dock nödvändigt att optimera betongen eftersom en annan typ av ballast användes vid elementfabriken jämfört med den som användes vid Avdelning Byggnadsmaterial, LTH.

12.4 Förförsök

12.4.1 Målsättning

Syftet med förförsöken var att prova ut en gjutbar betong med hög tryckhållfasthet. Konsistensen hos betongen skulle vara trögflytande (tixotrop) medan hållfasthetsvärdena skulle ligga mellan 100 och 140 MPa.

12.4.2 Recept

Vid förförsöken kunde man dra nytta av erfarenheter från laboratorieundersökningen (kapitel 5 och 7). Enligt kapitel 5 är det från gjutbarhetssynpunkt lämpligt att använda silikastoft i betongen vid värden på tryckhållfasthet överstigande 100 MPa. Om tryckhållfastheten skulle överstiga de önskade 100 MPa, borde vct vara mindre än 0.32; se figur 7.15.

Avsikten var att i första hand använda den ballast som utnyttjas vid Skanska Prefab AB i Staffanstorp dvs Dalby granit (gnejs och amfibolit) samt sand av typ Hassle-Bösarp.

De recept som provades i förförsöket ges i tabell 12.1. Endast betongtyper som gav flytbetong redovisas. Betong av jordfuktig konsistens är ej lämpad för balktillverkning utan kasserades vid förförsöken utan att några kuber tillverkades. Detaljrecept, ballastfraktionering, siktkurvor och aktuella fuktkvoter redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 12.

Tabell 12.1 Förförsök. Översiktliga recept (kg/m^3)

Sats	Bindem		Fin ballast			Grov ballast			Flytm	Vattenbindetal		
	C	S	Typ	Filler	0-8	Typ	4-8	8-12	SP 62	Vct	Vbt	Vbt_{eff}
16F	408	41	Kv	630		D	315	940	3.2	0.36	0.33	0.30
16S1	408	41	H		630	D	315	940	3.2	0.40	0.36	0.33
16S2	408	41	H		630	D	315	940	3.2	0.36	0.33	0.30
18S1	476	48	H		525	D	330	1000	8.8	0.24	0.22	0.20
18V	476	48	V		525	D	330	1000	8.8	0.24	0.22	0.20
18K	476	48	K		525	D	330	1000	8.8	0.24	0.22	0.20
18S2	476	48	H		525	D	330	1000	8.8	0.24	0.22	0.20
19S	484	48	H		580	D	230	1110	13.3	0.22	0.20	0.18
16	408	41	H		730	Kv		1160	3.1	0.36	0.33	0.30
18	474	47	H		550	Kv		1310	8.8	0.24	0.22	0.20
26S	390	39	H		788	D		1100	4.1	0.36	0.33	0.30
28S	475	47	H		695	D		1160	10.0	0.24	0.22	0.20
29S	485	49	H		665	D		1220	15.3	0.22	0.20	0.18
10S	425	43	H		740	D		1130	6.3	0.30	0.27	0.25
11S	450	45	H		703	D		1175	8.9	0.27	0.25	0.23
38S	450	68	H		665	D		1220	12.2	0.24	0.21	0.18

Beteckningar i tabell 12.1:

C = Anläggningscement
S = Silikastoft
SP 62 = Flytmedel (naftalensulfonat, torrvikt)
$Vbt_{eff} = w_o/(C+2 \bullet S)$
w_o = blandningsvatten
Kv = Kvartsitisk sandsten
H = Hassle-Bösarp grusig sand
V = Veberöd grus
K = Klippan grus
D = Dalby granit (amfibolit och gnejs)

12.4.3 Mätmetod och felkällor

Förblandningarna syftade till att uppnå gjutbar konsistens samt tryckhållfastheter varierande mellan 100 och 140 MPa. Därför gjordes mätningar av konsistensen och tryckhållfastheten hos betongen. Det var vid denna typ av betong svårt att fastställa ett från gjutbarhetssynpunkt rättvisande konsistensmått.

Sättmåttet var ofta litet medan vebemåttet var så högt att skillnaderna mellan olika betongtypers gjutbarhet inte kunde mätas. Av tidsskäl använde vi heller ej s k omformningsmätare som annars är ett utomordentligt hjälpmedel då man skall bedöma gjutbarheten hos högpresterande betong. Vid våra mätningar hade vi ej heller tillgång till någon mer avancerad reologisk mätare t ex viskosimeter. Konsistensmåttet fick därför bedömas subjektivt främst efter erfarenheter av kubgjutningar.

Vibreringen hade vidare en större inverkan på konsistensen hos denna typ av betong än hos normal betong. Variationer i ballastfukt var den största orsaken till variationer i konsistens och vct.

12.4.4 Resultat och diskussion

I tabell 12.2 redovisas resultat från 16 st förblandningar.

Tabell 12.2 Förförsök. Recept (kg/m^3), konsistensnivå och hållfasthet (MPa)

Sats	Bindem		Fin ballast			Grov ballast			Flytm	K	Hållfasthet		
	C	S	Typ	Filler	0-8	Typ	4-8	8-12	SP 62		Åld	f_1	f_{spl}
16F	408	41	Kv	630		D	315	940	3.2	St	7 d	64	5.3
16S1	408	41	H		630	D	315	940	3.2	P	7	63	4.7
16S2	408	41	H		630	D	315	940	3.2	P	7	56	4.3
18S1	476	48	H		525	D	330	1000	8.8	P	7	73	5.8
18V	476	48	V		525	D	330	1000	8.8	St	7	91	6.0
18K	476	48	K		525	D	330	1000	8.8	St	7	93	6.6
18S2	476	48	H		525	D	330	1000	8.8	St	7	85	6.2
19S	484	48	H		580	D	230	1110	13.3	SS	7	83	6.0
16	408	41	H		730	Kv		1160	3.1	St	7	70	4.3
18	474	47	H		550	Kv		1310	8.8	St	7	96	5.8
26S	390	39	H		788	D		1100	4.1	F	7	68	–
28S	475	47	H		695	D		1160	10.0	St	7	87	–
29S	485	49	H		665	D		1220	15.3	TF	7	89	–
10S	425	43	H		740	D		1130	6.3	TF	7	86	–
11S	450	45	H		703	D		1175	8.9	St	7	89	–
38S	450	68	H		665	D		1220	12.2	TF	7	84	–

Beteckningar i tabell 12.2:

K = Konsistensnivå
C = Anläggningscement
S = Silikastoft
SP 62 = Flytmedel (naftalensulfonat, torrvikt)
Åld = Ålder
d = dygn
f_1 = tryckhållfasthet
f_{spl} = spräckhållfasthet

Kv = Kvartsitisk sandsten
H = Hassle-Bösarp grusig sand
V = Veberöd grus
K = Klippan grus
D = Dalby granit (amfibolit och gnejs)
F = Lättflytande
P = Plastisk
St = Styv
SS = Mycket styv
TF = Trögflytande

Värdena på tryckhållfasthet med Dalby granit (amfibolit+ gnejs) blev lägre än önskat varför ett byte fick ske till makadam i form av Hardeberga kvartsitisk sandsten. Sanden från Hassle-Bösarp behölls, eftersom dess andel av ballasten var mindre än makadamens. Den gjutbara konsistensen bedömdes i samband med tillverkningen av provkuberna. Resultat av förförsöken redovisas även i DATARAPPORT TVBM-7011; 12.

12.4.5 Slutsatser

Baserat på det stora antalet förförsök fastställdes 4 st recept. Dessa innehöll makadam av typ Hardeberga kvartsit 8-12 mm, Hassle-Bösarp natursand 0-4 mm, Anläggningscement, silikastoft av typ Micropoz samt flytmedel av typ SP 62 (naftalensulfonat). Recept redovisas i tabell 12.3.

12.5 Huvudförsök

12.5.1 Tillverkning av provbalkar

12.5.1.1 Armering

Beräkning av böjarmering:

Beräkning av böjarmering genomfördes enligt Bestämmelser för betongkonstruktioner, BBK 79. Vad gäller armering för momentpåverkan skall statisk stabilitet föreligga inom tvärsnittet dvs

$$0.8 \bullet b \bullet x \bullet f_{cc} = A_s \bullet \sigma_s \qquad \text{----------(12.2)}$$

där

b är balkbredd
x är tryckzonshöjd
f_{cc} är tryckpåkänning för betong
A_s är armeringsarea
σ_s är aktuell påkänning i armering,

Dessutom skall Bernoullis hypotes uppfyllas dvs antagandet att plana tvärsnitt förblir plana vid böjning. Ur ekvationen (12.2) kan momentet vid normalarmerat tvärsnitt beräknas

$$M = 0.8 \bullet b \bullet x \bullet f_{cc} \bullet (d - 0.4 \bullet x) = A_s \bullet \sigma_s \bullet (d - 0.4 \bullet x) \qquad \text{----------(12.3)}$$

d är tvärsnittets effektiva höjd

Med hjälp av Bernoullis hypotes beräknas kvoten mellan tryckzonshöjd och effektiv höjd i tvärsnittet vid balanserad armering dvs

$$(x/d)_{bal} = 1/(1 + \epsilon_{sy}/\epsilon_{cu}) \qquad \text{---------} \quad (12.3)$$

där

ϵ_{sy} är armeringens flytgräns
ϵ_{cu} är betongens gränsstukning (0.35% vid normal betong, 0.27% vid högpresterande betong; se **Persson (1990D)**.

Vid beräkning av tryckarmerat normalarmerat tvärsnitt tillämpades följande beräkningsgång:

1. Antag påkänning i tryckarmering.

2. Beräkna stukning av tryckarmering.

3. Beräkna moment p g a tryckarmering.

4. Beräkna dragarmering för att kompensera för tryckarmering.

5. Beräkna resterande dragarmering.

6. Beräkna erforderlig tryckzonshöjd, x, enligt ekvation (12.2), vid armering enligt punkt 5.

7. Kontrollera att kvoten mellan tryckzonshöjd och effektiv höjd är <u>mindre</u> än det värde som gäller vid balanserad armering enligt ekvation (12.4).

8. Kontrollera (med hjälp av likformighet) att stukning av tryckarmering stämmer med antagandet. Om stukning av tryckarmering ej stämmer med antagandet göres hela beräkningen om (passningsberäkning).

9. Beräkna total momentkapacitet som summan av tryckarmeringsandel och dragarmeringsandel.

Vid tryckarmerat överarmerat tvärsnitt tillämpades följande beräkningsprinciper:

1. Antag att påkänningen i tryckarmeringen överstiger den som gäller för armeringens flytgräns s k flytspänningen.

2. Beräkna moment p g a tryckarmering.

3. Beräkna dragarmering för att kompensera för tryckarmering.

4. Beräkna resterande dragarmering.

5. Beräkna erforderlig tryckzonshöjd, x, enligt ekvation (12.2), vid armering enligt punkt 5.

6. Kontrollera att kvoten mellan tryckzonshöjd och effektiv höjd är <u>större</u> än det värde som gäller vid balanserad armering enligt ekvation (12.4).

7. Antag en tryckzonshöjd som är mindre än den som krävs vid balanserad armering.

8. Beräkna, med hjälp ekvation (12.2), aktuell påkänning i dragarmering vid tryckzonshöjd enligt punkt 7.

9. Beräkna vid aktuell brottstukning i betongen, ϵ_{cu}, och med hjälp av likformighet, aktuell töjning i armeringen.

10. Beräkna spänning i dragarmeringen vid töjning enl punkt 9.

11. Jämför resultat enligt punkt 8. och 10. Om dessa ej överensstämmer göres hela beräkning om (passningsberäkning)

12. Kontrollera med hjälp av likformighet att stukningen av tryckarmeringen överstiger den som gäller för armeringens flytgräns, den s k flytspänningen

13. Om krav enl punkt 12. ej är uppfyllda görs beräkningen om.

14. Beräkna momentkapaciteten som summan av andel från tryckarmeringen och andel från dragarmering.

Beräkning av skjuvarmering:

Vid beräkning av skjuvarmering tillämpades den s k superpositionsprincipen enligt Bestämmelser för betongkonstruktioner, BBK 79, d v s

$$V = V_c + V_s \qquad \text{----------(12.5)}$$

där

V är tvärkraft
V_c är tvärkraft som upptas av betongen och dragarmeringen
V_s är tvärkraft som upptas av skjuvarmeringen

Vid beräkning av tvärkraft som upptas av betongen och dragarmeringen, V_c, gäller följande formel enligt BBK 79:

$$V_c = b_w \cdot d \cdot \Theta \cdot (1 + 50 \cdot A_{s0}/(b_w \cdot d)) \cdot 0.3 \cdot f_{ct} \qquad \text{--------- (12.6)}$$

där

värdet av stora parentesen högst får vara 2 (enligt BBK 79) samt

b_w är balkbredd
d är effektiv balkhöjd
Θ är faktor som beror av balkhöjd, h. Varierar mellan 1.0 och 1.4 för tvärkraftsarmerat tvärsnitt. Vid h=0.2 m är Θ=1.4
A_{s0} är minsta dragarmeringsarea i betraktad balkdel mellan momentnollpunkten och snitt för momentmaximum
f_{ct} är dragpåkänning i betongen

Vid beräkning av tvärkraft som upptas av skjuvarmeringen, V_s, gäller vid vertikala byglar följande formel enligt BBK 79:

$$V_s = A_{sv} \cdot f_{sv} \cdot 0.9 \cdot d/s \qquad \text{----------(12.7)}$$

där

A_{sv} är skjuvarmeringsarea per armeringsenhet (tvåskäriga byglar ger bidraget 2x bygelns tvärsnittsarea)
f_{sv} är dragpåkänning i tvärkraftsarmeringen
d är balkens effektiva höjd
s är tvärkraftsarmeringens inbördes centrumavstånd

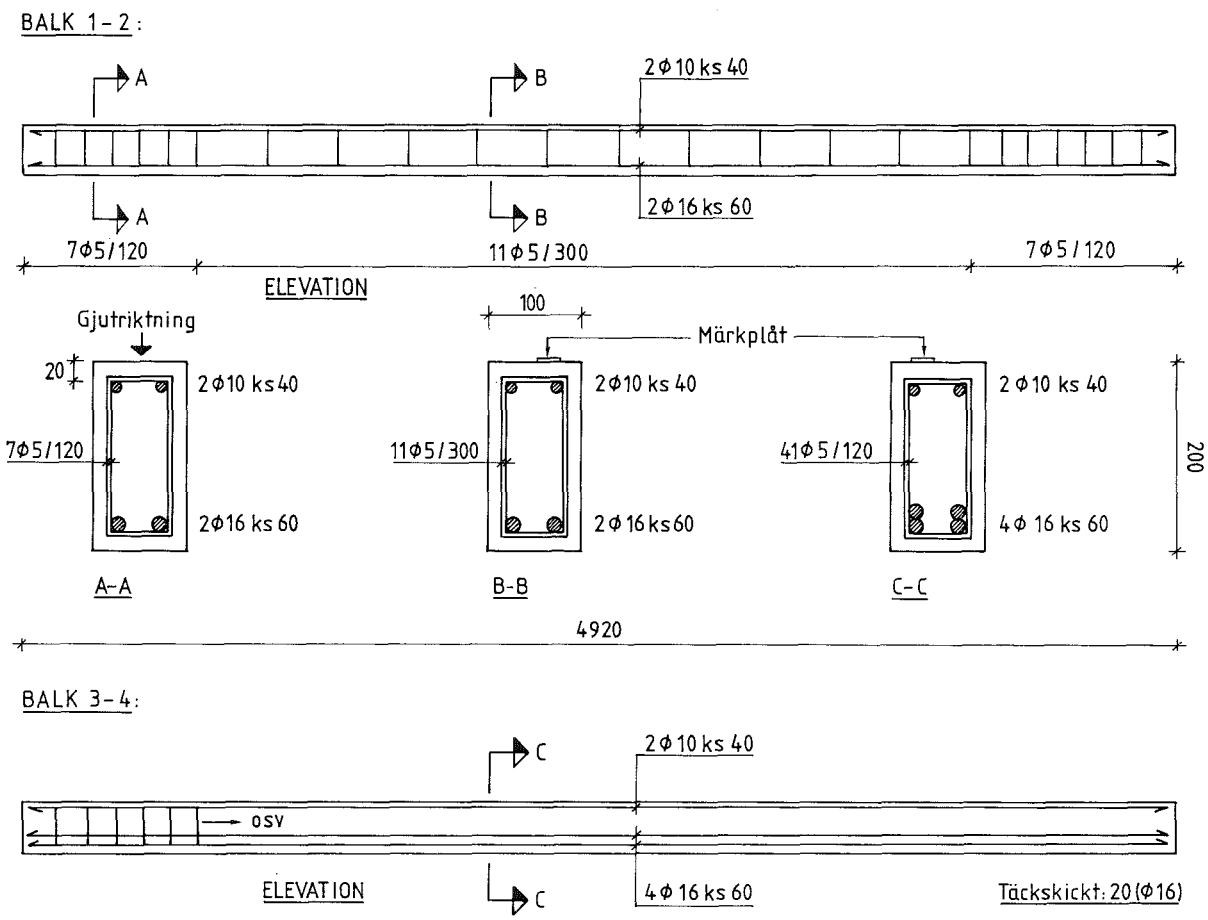
Armering i balkarna:

Målsättningen var att uppnå 50, 100, 120 och 140 MPa i tryckhållfasthet vid 28 dygns ålder. Studium skulle utföras av dels normalarmerad sektion, dels överarmerad. Statiska beräkningar av armering redovisas i DATARAPPORT TVBM-7011; 12. Därvid tillämpades normal brottstukning för betong med 50 Mpa i tryckhållfasthet nämligen ϵ_{cu}=3.5 $^{o}/oo$ samt ϵ_{cu}=2.7 $^{o}/oo$ för övriga betongkvaliteter.

Normalarmerade balkar hade som böjarmering 2ϕ16 Ks60 medan överarmerade balkar hade 4ϕ16 Ks60 buntad armering som huvudarmering. Överkantsarmeringen bestod av 2ϕ10 Ks 40, vilka i vissa fall kom att verka som tryckarmering.

Som skjuvarmering fanns det i normalarmerade balkar byglar ϕ5/120 Nps 50 på 1 m vid upplag samt ϕ5/300 Nps 50 i övrigt. Den överarmerade balken hade ϕ5/120 Nps 50 genomgående som bygelarmering.

I figur 12.2 visas elevationer och sektioner av provbalkar.



Figur 12.2 Elevationer och sektioner av provbalkar, 100x200 mm

Figure 12.2 Elevations and sections of test beams, 100x200 mm

12.5.1.2 Recept vid huvudförsök

I tabell 12.3 redovisas recept för de 4 st blandningar vilka användes vid huvudförsök. Fuktgivare saknades i fabrikens silor varför fuktkontroll genomförts vid gjutningen med efterföljande justering av vct. (Detaljrecept, fuktinnehåll m m ges i DATARAPPORT TVBM-7011; 12).

Tabell 12.3 Huvudförsök. Översiktliga recept (kg/m^3)

Typ	Bindem		Ballast				Flytm	Vattenbindetal		
	C	S	Typ	0-8	Typ	8-12	SP 62	Vct	Vbt	Vbt_{eff}
24	480	48	H	550	Kv	1310	11.7	0.24	0.22	0.20
28	450	45	H	610	Kv	1260	7.2	0.28	0.25	0.23
32	420	42	H	670	Kv	1210	4.7	0.31	0.28	0.26
58	300	-	H	810	Kv	1150	-	0.57	0.57	0.57

Beteckningar i tabell 12.3:

C = Anläggningscement
S = Silikastoft
SP 62 = Flytmedel (naftalensulfonat, torrvikt)
$Vbt_{eff} = w_o/(C+2 \bullet S)$
w_o = blandningsvatten
Kv = Hardeberga kvartsitisk sandsten
H = Hassle-Bösarp grusig sand

12.5.1.3 Tillverkning av provbalkar

16 st balkar med tvärsnitt 100 x 200 mm och längd 4.92 m tillverkades industriellt vid Skanska Prefab AB, Staffanstorp.För varje recept göts således 4 st balkar varav 2 st normalarmerade och 2 st överarmerade. Tillverkning av betong och balkar utfördes enligt följande:

1. Armeringen tillverkades enligt fig 12.2.

2. Formen inoljades väl.

3. Blandaren avspolades.

4. Blandaren avtorkades.

5. Blandarens lock lades på.

6. Makadamen tillsattes.

7. Sanden tillsattes.

8. Anläggningscementet tillsattes.

9. Silikastoftet tillsattes manuellt.

10. Torrblandning utfördes under ca 1/2 minut.

11. Vatten tillsattes, våtblandning utfördes under 1/2 minut.

12. Tillsatsmedel (SP 62) tillsattes manuellt.

13. Blandning utfördes under ca 3 minuter.

14. Tömning utfördes i transportvagn.

15. Transport utfördes till gjuthall.

16. Tömning i bask utfördes.

17. Transport utfördes till form.

18. Gjutning utfördes av 4 st balkar.

19. Vibrering utfördes under 4-5 minuter.

20. Gjutning utfördes av 6 st kuber 150 x 150 mm.

Armeringstiden uppgick till 60 resp 75 manminuter för fyra balkar. Basken var försedd med vibrator. Tömning och ifyllnad av balkformen med 4 st balkar utfördes på mellan 15 och 16 minuter. Totalt med efterbearbetning ökade gjuttiden för fyra balkar från ca 22 manminuter för 4 st normala trafficbalkar till ca 44 manminuter för högpresterande betongbalkar främst p g a det tillkommande arbetet med skjuvarmering.

Vid blandningen av betong användes en tvångsblandare typ Fejmert. Flytande konsistens i blandningen erhölls ca 90 sekunder efter det att flyttillsatsen utförts. Övergången mellan jordfuktig och trögflytande konsistens skedde inom en tidsrymd av några sekunder. Tidpunkten för konsistensändringen kunde därför observeras som en ändring av strömstyrkan till blandarmotorn.

Efter det att flytande konsistens erhållits, utfördes ytterligare 90 sekunders blandning varefter betongen tömdes i transportvagn. Personalen ansåg att betongen med vct=0.58 och utan flyttillsats var sämst från gjutbarhetssynpunkt. Betongen med vct=0.24 ansågs som mer svårarbetad än normal betong. Betongen med vct=0.28 betraktades som mest lättgjuten av de som provades.

Tillverkningen av betongen utfördes under en värmebölja, varför betongtemperaturen vid gjutning uppgick till drygt 30°C.
Som balkform utnyttjades en stålform till den s k trafficbalken. Formen var försedd med 2 st vibratorer, vilket underlättade ifyllnaden av formen.

12.5.1.4 Felkällor och noggrannhet vid tillverkning

Fuktkvotsbestämning av ballasten utgjorde den största felkällan vid bestämning av vct och därmed av betongkvaliteten. För att ta ut aktuellt ballastmaterial måste provtagaren luta sig ut över en stor våg och försöka fånga material som silon släpper ut; en ofta riskfylld uppgift i en bullrig och dammbemängd miljö. Om högpresterande betong skall kunna produceras på ett rationellt sätt, krävs helt andra metoder för att bestämma fuktkvoten på ingående material; se **Persson (1991F)**.

Noggrannheten på hur mycket ballast, cement samt vatten som tillsattes kan bedömas till ± 2%. Silikastoft och tillsatsmedel vägdes och tillsattes manuellt. Uppvägningsfelen var således små.

Sandfukten var relativt konstant vid tillverkningen eftersom sanden leverades fuktmättad till fabriken (ca 4% fuktinnehåll). Stora variationer förekom däremot i stenfukten p g a skiktning i silor. Kontroll utfördes omedelbart före uppvägning. Under den tid som det tog att torka det uttagna provet hade dock fuktkvoten ändrats vilket resulterade i ett fel i vct av ±0.02. Teoretiskt motsvarade detta fel enligt figur 7.15 en variation av ±4 MPa i erhållen tryckhållfasthet.

12.5.1.5 Härdning av provbalkar

Balkarna täcktes efter gjutningen med plastfolie. Avformning utfördes efter 16 timmar genom att formen stjälptes upp och ned. Mindre ytporer med en största storlek av 4 mm kunde därvid noteras. Betongen med vct=0.58 hade flest porer. Härdningen fram till provningen utfördes i laboratoriet på LTH; RF=40-60% samt temperatur ca 23°C. Vattenbegjutning utfördes ej under härdningsperioden.

12.5.1.6 Slutsatser vid tillverkning av provbalkar

Det praktiska arbetet i elementfabriken visade att det är möjligt att tillverka högpresterande betong med vct ned till 0.24 i en befintlig elementfabrik. Vid vct$\geq$0.28 kan betong produceras utan några större problem. Man bör dock komplettera ballastsilor med fuktgivare i den mån sådana saknas i syfte att minska variationer i vct och därmed betongkvalitet.

12.5.2 Provningar

12.5.2.1 Allmänt

Alla provningar utfördes vid LTH:s laboratorium (frånsett vissa av kubprovningarna). Provningar utfördes vid 28 och 90 dygns ålder. Provningarna omfattade följande moment:

* Brottlast vid böjning av balken med tillhörande registrering av deformationer.

* Brottlast vid skjuvning av balken med tillhörande registrering av deformationer.

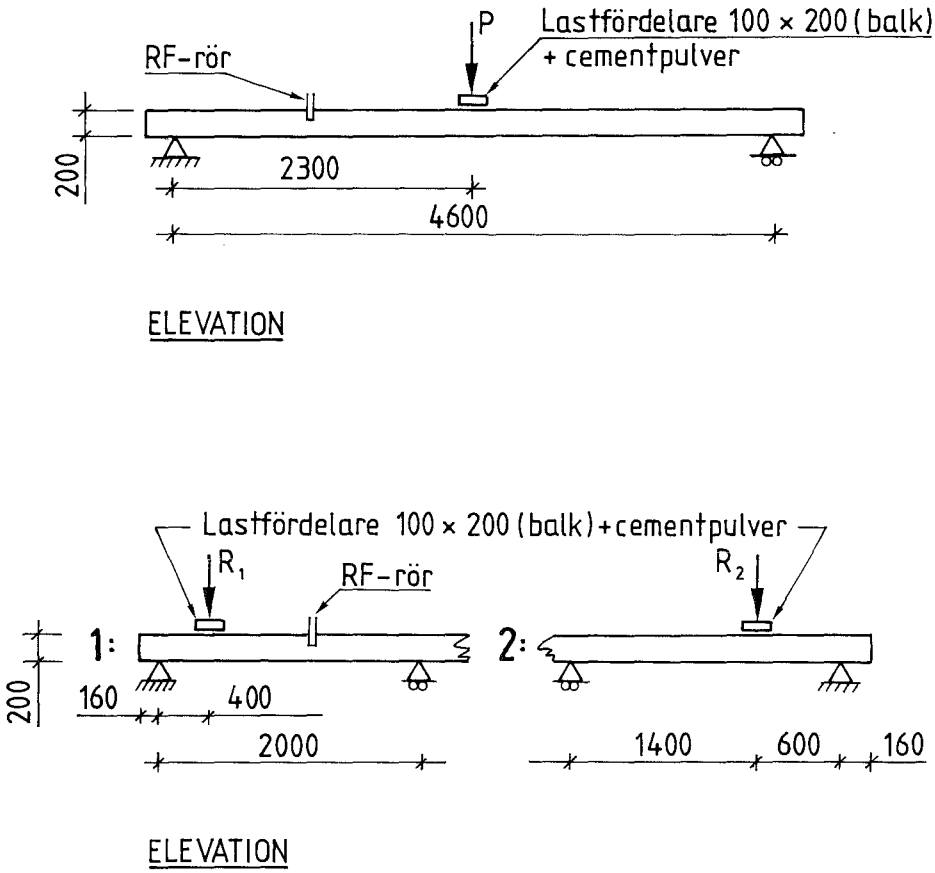
* Tryckhållfasthet hos normenligt lagrade kuber vid tidpunkt för bestämning av brottlast.

* Relativ fuktighet i balken vid tidpunkt för bestämning av brottlast.

12.5.2.2 Provningsmetod

Brottlast i balkmitt (böjbrott):

Balkarna vitmålades och placerades på upplag med 4.6 m i fri spännvidd. Därefter monterades mätklockor samt en punktlast på mitten av spännvidden. Figur 12.3 visar försöksuppställningen.



Figur 12.3 Försöksuppställning vid brottbelastning av balkar

Figure 12.3 Ultimate load of beams - test procedure

Mätklockor monterades vid bägge upplagen samt vid punktlasten. Punktlasten ökades hydrauliskt tills maximal last uppnåddes. Last och deformation registrerades därvid på data. Sprickor imålades efterhand med notering av aktuell last. Fotografering utfördes.

Brottlast vid stöd:

Balkändar från provning av böjbrott i balkmitt placerades med spännvidd varierande mellan 2.0 och 2.2 m. En punktlast placerades antingen 0.6 m eller 0.4 m från stöd så att ett skjuvfält i balken erhölls; se figur 12.3. Mätklockor monterades vid punktlasten och vid upplaget. Lasten höjdes tills maximal last erhölls. Last och deformation noterades på data. Fotografering utfördes.

Tryckhållfasthet:

3 st standardkuber tryckprovades vid tidpunkten för balkprovning dels vid 28 dygn, dels vid 90 dygns ålder. En stor del av kuberna sändes till CEMLAB i Slite för provning eftersom LTH:s tryckpress inte hade tillräcklig kapacitet.

RF:

Mätning av relativa fuktigheten, RF, utfördes i mitten av balktvärsnittet under 24 timmars tid. Mätningen av RF utfördes omedelbart före brottprovningen, se även figur 12.3.

12.5.2.3 Felkällor

Toleranser:

Aktuella mått på armeringsläget mättes in för samtliga armeringsstänger efter kapning av samtliga tillverkade balkar i tre

snitt. Dessa data var nödvändiga för de statiska kontrollberäkningarna. Aktuella betongmått framgår också av nämnda kontrollberäkningar; se DATARAPPORT TVBM-7011, 12.

Yttre krafter:

Domkrafter och tryckpressar kalibrerades med lastceller.

Armering:

Provdragning utfördes av armering Ks 60. Vid samtliga tre provdragningar uppvisade armeringen en dragpåkänning vid brott av 700 MPa; se DATARAPPORT TVBM-7011, 12.

RF-givare:

RF-givare kalibrerades vid +23°C inom 5 dygn före och efter mättillfället.

12.5.2.4 Resultat

I tab. 12.4 och 12.5 redovisas mätresultaten från balkförsöken. Balknumret består av tre siffror. De <u>två första siffrorna ger</u> avsett vct i % medan den <u>tredje siffran</u> anger böjarmeringens utseende. Den är "1" och "2" vid 2Φ16 samt "3" och "4" vid 4Φ16.

Tabell 12.4 Provresultat från balkförsök; vct=0.24 och vct=0.28

No	28 dygn		90 dygn		28 dygn		90 dygn		28 dygn		90 dygn		28 dygn	90 dygn	Vct
	f_1	f_{1m}	f_1	f_{1m}	P_1	Def	P_1	Def	R_1	R_2	R_1	R_2	RF	RF	
	MPa	MPa	MPa	MPa	kN	mm	kN	mm	kN	kN	kN	kN	%	%	
241	145 137 134	139			40	100			158	117			74.0		.24
242			141 153 135	143			39	100			169	128		59.0	.24
243			141 153 135	143			69	72			240	194		61.0	.24
244	145 137 134	139			71	100			276	208			73.0		.24
281	115 132 126	124			39	90			159	115			69.5		.28
282			140 132 138	136			39	80			165	120		74.0	.28
283			140 132 138	136			67	90			236	140		75.5	.28
284	115 132 126	124			66	90			252	200			83.0		.28

Beteckningar:

f_1 tryckhållfasthet för standardkub
f_{1m} medeltryckhållfasthet för 3 st standardkuber
P_1 punktlast i balkmitt vid brott
Def deformation av balkmitt vid brott
R_1 punktlast 400 mm från stöd vid brott
R_2 punktlast 600 mm från stöd vid brott

Tabell 12.5 Provresultat från balkförsök; vct=0.32 och vct=0.58

No	28 dygn		90 dygn		28 dygn		90 dygn		28 dygn		90 dygn		28 dygn	90 dygn	Vct
	f_1	f_{1m}	f_1	f_{1m}	P_1	Def	P_1	Def	R_1	R_2	R_1	R_2	RF	RF	
	MPa	MPa	MPa	MPa	kN	mm	kN	mm	kN	kN	kN	kN	%	%	
321	117 117 115	116			39	68			155	110			81.0		.32
322			138 128 137	134			39	50			162	122		70.0	.32
323			138 128 137	134			68	81			255	195		73.5	.32
324	117 117 115	116			66	80			254	184			83.0		.32
581	57 55 57	56			35	90			122	107			92.0		.58
582			65 67 64	65			35	85			145	102		82.0	.58
583			65 67 64	65			47	74			184	135		80.5	.58
584	57 55 57	56			45	65			150	134			92.0		.58

Beteckningar:

f_1 tryckhållfasthet för standardkub
f_{1m} medeltryckhållfasthet för 3 st standardkuber
P_1 punktlast i balkmitt vid brott
Def deformation av balkmitt vid brott
R_1 punktlast 400 mm från stöd vid brott
R_2 punktlast 600 mm från stöd vid brott

De uppmätta last-deformationskurvorna liksom kontrollberäkningar av samtliga balkars bärförmåga och kubprovningar återfinns i DATARAPPORT TVBM-7011; 12. Fotografier av brottbeteendet förvaras på Avdelning Byggndasmaterial, Lunds Tekniska Högskola, Lund.

12.5.2.5 Slutsatser

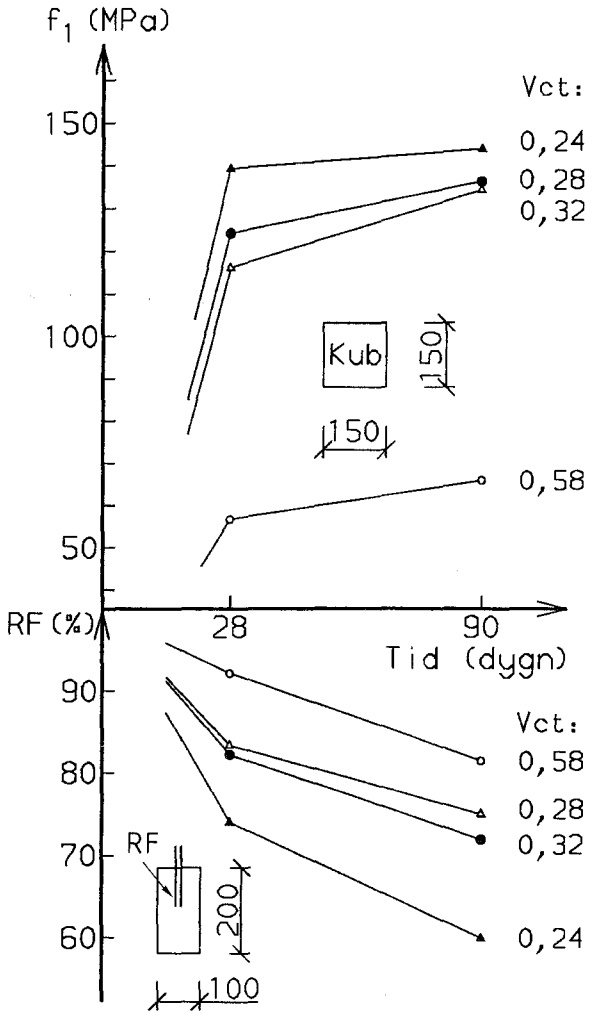
Självuttorkning och tryckhållfasthet:

I figur 12.4 och 12.5 visas samband mellan vct, ålder (dygn), kubhållfasthet, f_1, och relativ fuktighet, RF. Följande slutsatser kan dras:

* Vid vct=0.24 fanns det mycket litet fritt vatten kvar i betongen efter 28 dygns ålder eftersom RF var mindre än 74%. Hydratiseringstillväxten var därför mycket liten. Av denna anledning ökade ej heller tryckhållfastheten, f_1, något nämnvärt efter 28 dygns ålder.

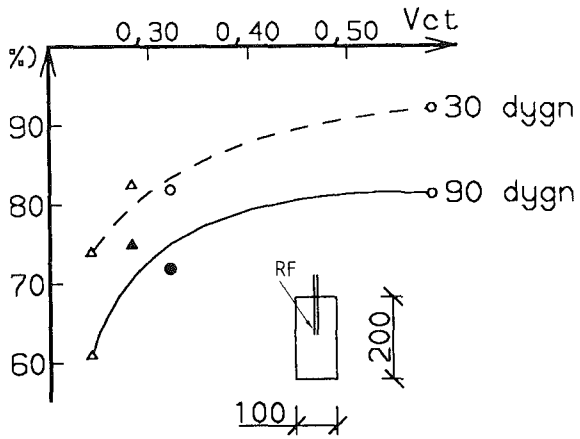
* Vid vct=0.58 var RF≈92% vid 28 dygns ålder, vilket var en anmärkningsvärt hög nivå för en så tunn konstruktion med tanke på att betongen ej utsattes för vatten utan torkade inomhus under ca 25 dygn. Hydratation och hållfasthetstillväxt kunde därför fortskrida fram till 90 dygns ålder.

* Hållfasthetstillväxten från 28 dygn fram till 90 dygns ålder var ca 15% hos betong med vct=0.58. Denna ökning berodde, förutom på en fortsatt hydratation i viss mån även på en uttorkning av betongen, se kapitel 7.



Figur 12.4 Samband mellan ålder, tryckhållfasthet, f_1 och relativ fuktighet, RF. f_1 avser tryckhållfasthet för standardkub och RF är mätt mitt i balksektionen

Figure 12.4 Compressive strength, f_1, and relative humidity, RF as function of time. Compressive strength for standard cube 150 mm and RF in center of beam

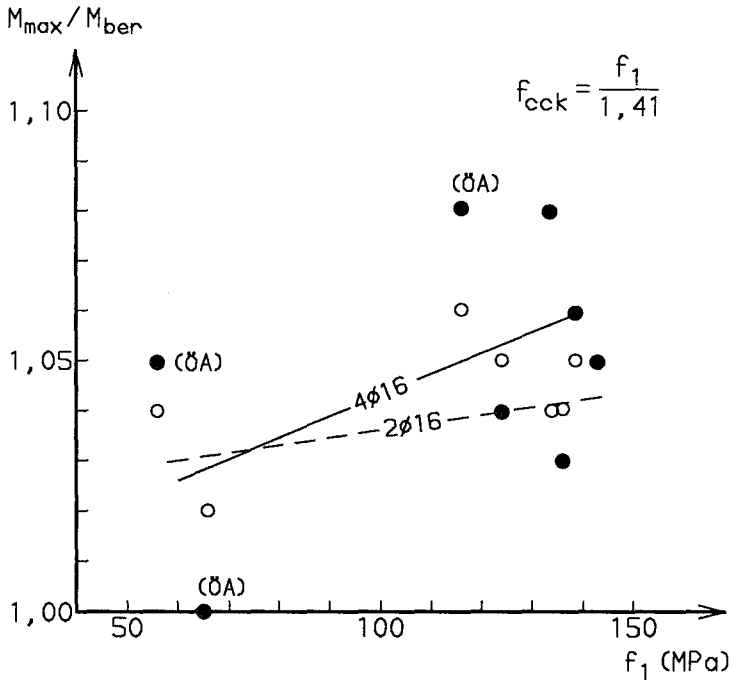


Figur 12.5. Relativ fuktighet, RF, som funktion av vct mitt i en balksektion om 100x200 mm. Uttorkning i RF=40-60%.

Figure 12.5 Relative humidity, RF, as function of water-cement ratio in center of beam. Environment: RH=40-60%

Momentkapacitet vid punklast i balkmitt (böjbrott):

I figur 12.6 visas kvoten mellan det maximala moment vid brott, M_{max}, och det enligt BBK beräknade brottmomentet, M_{ber}, som funktion av kubhållfastheten, f_1. Karaktäristiska tryckhållfastheten, f_{cck}, sattes därvid till $f_{cck}=f_1/1.41$.



Figur 12.6. Kvoten mellan det uppmätta maximala moment vid brott, M_{max}, och det enligt BBK beräknade brottmomentet, M_{ber}, som funktion av kubhållfastheten, f_1

Figure 12.6 Ratio of maximal measured ultimate moment, M_{max}, to calculated ultimate moment, M_{ber}, as function of cube compressive strength, f_1

Följande slutsatser kan dras:

* Kvoten M_{max}/M_{ber} varierar enl figur 12.6 som mest mellan 1.00 och 1.08.

* Spridningen i resultatet är mycket liten, vilket till en del beror på att noggrann inmätning utfördes av all armering men även på att betongen var homogen och hade en mycket god gjutbarhet.

* Kvoten M_{max}/M_{ber} ökar med ökad tryckhållfasthet, f_1.

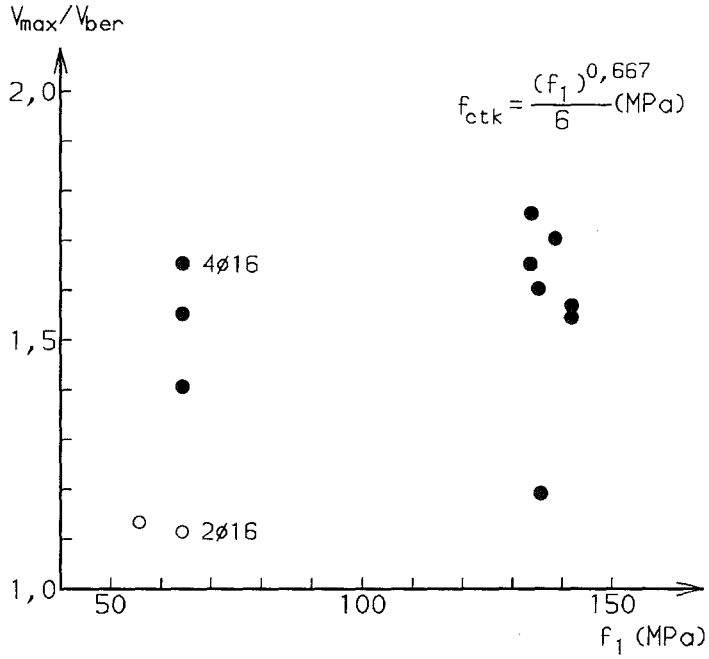
* Kvoten M_{max}/M_{ber} ökar med mängden armering.

* Bestämmelser för betongkonstruktioner, BBK, kan användas vid statisk beräkning av en slank balksektion med tvärsnittsmåttet 100x200 mm ända upp till kubhållfastheten 150 MPa. Detta förutsätter att balken är normalarmerad eller överarmerad.

* Antalet överarmerade brott, dvs brott i balkens tryckzon utan att armeringen dessförinnan flyter, (3 st), blev färre än förväntat (8 st) eftersom dels balkformen var något bredare än nominella 100 mm, dels kubhållfastheten, f_1, var högre än förväntat.

Tvärkraftskapacitet:

I figur 12.7 visas kvoten mellan den maximala tvärkraften vid brott, V_{max}, och den enligt BBK beräknade tvärkraften vid brott, V_{ber}, som funktion av tryckhållfastheten, f_1. Den karaktäristiska draghållfastheten sattes till $f_{ctk}=(f_1)^{0.667}/6$.



Figur 12.7 Kvoten mellan den uppmätta maximala tvärkraften vid brott, V_{max}, och den enligt BBK beräknade tvärkraften vid brott, V_{ber}, som funktion av kubhållfastheten, f_1

Figure 12.7 Ratio of measured maximal shear force to calculated shear force as function of cube compressive strength, f_1

Följande slutsatser kan dras:

* Kvoten V_{max}/V_{ber} varierar enl figur 12.7 mellan 1.1 och 1.8.

* Kvoten V_{max}/V_{ber} ökar något med ökad kubhållfasthet, f_1.

* Kvoten V_{max}/V_{ber} ökar något med mängden armering.

* Bestämmelser för betongkonstruktioner, BBK, kan användas vid statisk beräkning av en slank balksektion med tvärsnittsmåttet 100x200 mm ända upp till kubhållfastheten 150 MPa.

* Antalet tvärkraftsbrott (12 st) blev färre än förväntat (32 st) eftersom dels balkformen var bredare än 100 mm dels tryckhållfastheten, f_1, blev högre än förväntat. I st för tvärkraftsbrott inträffade böjbrott nära stöd.

Mometkapacitet vid last nära stöd:

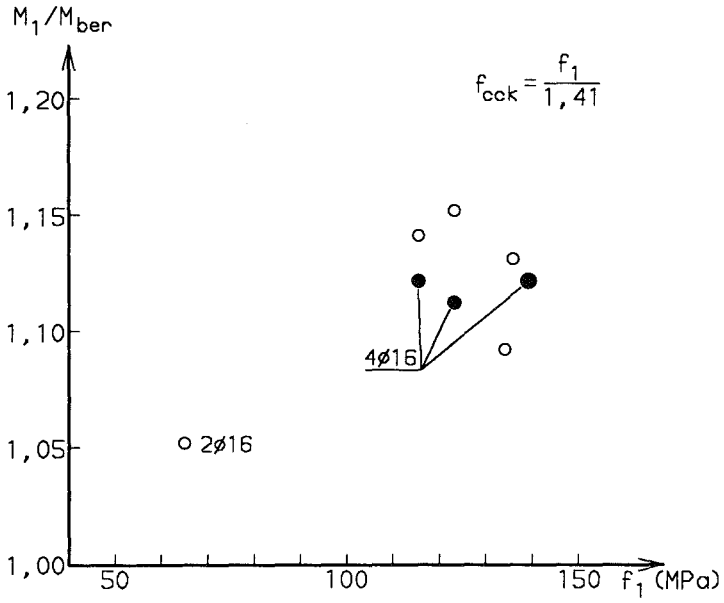
I figur 12.8 visas kvoten mellan det maximala moment vid brott, M_1, och det enligt BBK beräknade brottmoment, M_{ber}, som funktion av tryckhållfastheten, f_1. Den karaktäristiska tryckhållfastheten, f_{cck}, sattes därvid enligt Bestämmelser för betongkonstruktioner, BBK, till $f_{cck}=f_1/1.41$. I figur 12.8 redovisas enbart resultat från belastningsfall med punktlast 400 mm från stöd, vilka ej gav tvärkraftsbrott.

Följande slutsatser kan dras:

* Kvoten M_1/M_{ber} varierar enl figur 12.8 mellan 1.05 och 1.15.

* Kvoten M_1/M_{ber} ökar med ökad kubhållfasthet, f_1.

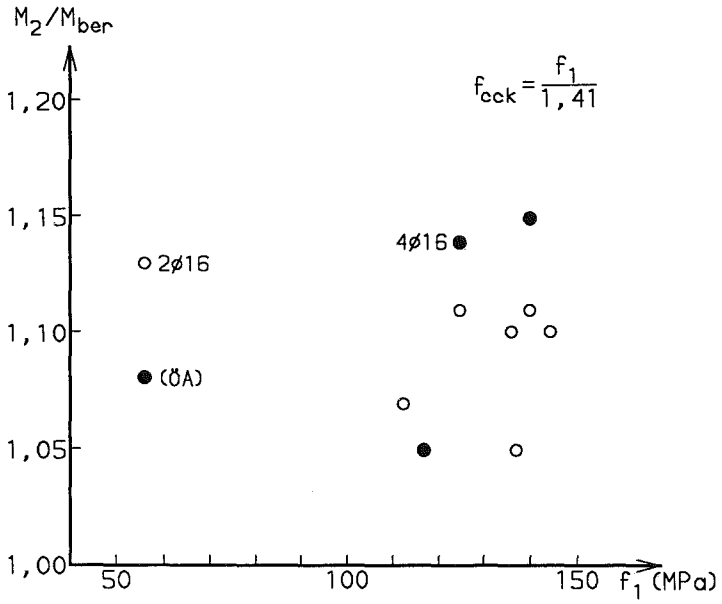
* Bestämmelser för betongkonstruktioner, BBK kan användas vid statisk beräkning av en slank balksektion med tvärsnittet 100x200 mm ända upp till kubhållfastheten 150 MPa.



Figur 12.8. Kvoten mellan det uppmätta maximala momentet vid brott, M_1, och det, enligt BBK, beräknade brottmomentet, M_{ber}, som funktion av kubhållfastheten, f_1

Figure 12.8 *Ratio of measured maximal ultimate moment, M_1, to calculated ultimate moment, M_{ber}, as function of cube compressive strength, f_1*

I figur 12.9 visas kvoten mellan det maximala momentet vid brott, M_2, och det, enligt BBK, beräknade brottmomentet, M_{ber}, som funktion av tryckhållfastheten, f_1. Karaktäristiska tryckhållfastheten, f_{cck}, sattes därvid, enligt BBK, till $f_{cck}=f_1/1.41$. I figur 12.9 redovisas enbart resultat från belastningsfall med punktlast 600 mm från stöd, vilka ej gav tvärkraftsbrott.



Figur 12.9. Kvoten mellan det maximala momentet vid brott, M_2, och det enligt BBK beräknade brottmoment, M_{ber}, som funktion av kubhållfastheten, f_1

Figure 12.9 *Ratio of maximal ultimate moment, M_2, to calculated ultimate moment, M_{ber}, as function of cube compressive strength, f_1*

Följande slutsatser kan dras:

* Kvoten M_2/M_{ber} varierar enl figur 12.9 mellan 1.05 och 1.15.

* Kvoten M_2/M_{ber} ökar med ökad kubhållfasthet, f_1.

* Bestämmelser för betongkonstruktioner, BBK, kan användas vid statisk beräkning av en balksektion med tvärsnittsmåttet 100x200 mm ända upp till kubhållfastheten 150 MPa.

Tryckhållfastheten jämfört med kapitel 7:

Eftersom samma typ av grov ballast, bindemedel samt flytmedel användes vid tillverkningen av de armerade balkarna som vid tillverkningen av betongen i katitel 7 är det av stort intresse att verifiera resultaten enligt kapitel 7. I figur 7.24 ges ett generellt samband mellan cylinderhållfastheten, f_3, och vbt_{eff}. För 28 dygns ålder gäller:

$$f_3=220\bullet(0.70-vbt_{eff}) \qquad (12.8)$$

samt för 90 dygns ålder

$$f_3=240\bullet(0.72-vbt_{eff}) \qquad (12.9)$$

Ekv. (12.8) coh (12.9) avser provning med mellanlägg. Enligt tabell 7.3 erhålles en uppfattning om hur stor inverkan mellanlägget har på tryckhållfastheten; utan mellanlägg ökar tryckhållfastheten ca 12% för normal betong och ca 6% för högpresterande. Slutligen kan man med hjälp av ekv. (7.7) utföra en omräkning av cylinderhållfastheten, f_3, till kubhållfasthet, f_1:

$$f_1=0.95\bullet f_3+21 \qquad (7.7)$$

I tabell 12.6 ges enligt ekv 12.8, 12.9 och 7.7 beräknad tryckhållfasthet (med beaktande av mellanläggets inverkan enligt tabell 7.3) samt verklig tryckhållfasthet vid industriell tillverkning av balkar. Överensstämmelsen är mycket god vilket verifierar de i kapitel 7 redovisade relationerna mellan tryckhållfasthet och vbt_{eff}. De redovisade ekvationerna kan således bli ett utomordentligt bra hjälpmedel vid proportionering av högpresterande betong.

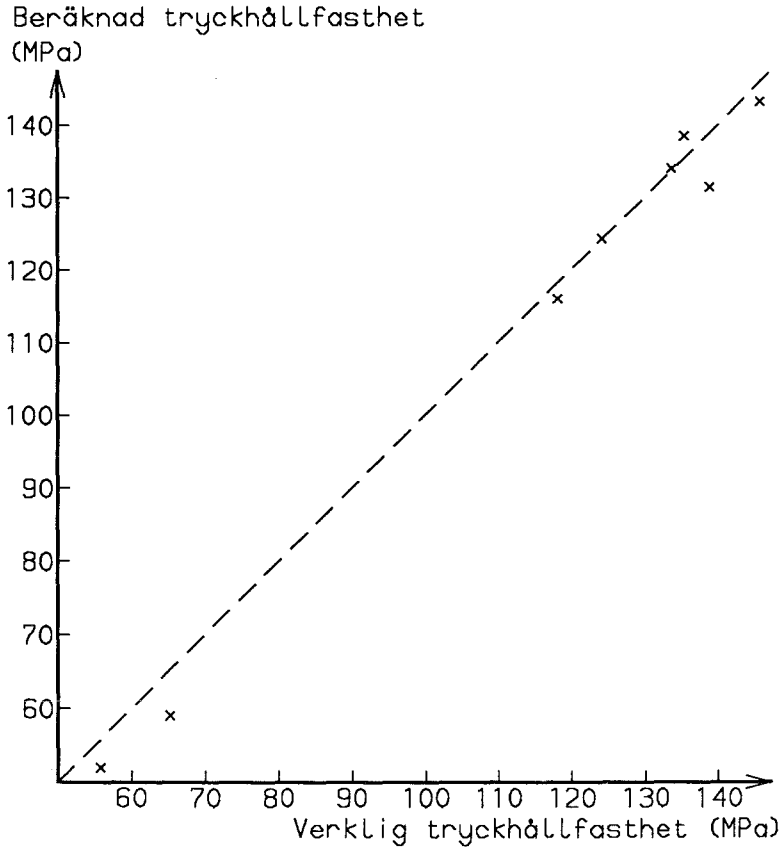
Tabell 12.6 Enl ekv 12.8, 12.9 och 7.7 beräknad tryckhållfasthet (med beaktande av mellanläggets inverkan enligt tabell 7.3) samt verklig tryckhållfasthet (MPa).

Typ	Vct	Vbt_{eff}	Ålder 28 dygn				Ålder 90 dygn			
			Beräknad			Verklig	Beräknad			Verklig
			f_3	f_3 utan m.l.	f_1	f_1	f_3	f_3 utan m.l.	f_1	f_1
24	0.239	0.199	110	117	132	139	125	133	146	143
28	0.278	0.232	103	109	124	124	117	124	138	136
32	0.308	0.257	97	103	118	116	111	118	134	134
58	0.570	0.570	29	32	52	56	36	40	59	65

Beteckningar i tabell 12.6:

Vbt_{eff} = $w_o/(C+2 \cdot S)$
f_1 Tryckhållfastheten för torr kub
f_3 är -"- -"- utborrad cylinder
f_3 utan m.l. är -"- -"- -"- -"-
utan mellanlägg

I figur 12.10 visas samband mellan enligt ekv 12.8, 12.9 och 7.7 beräknad tryckhållfasthet (med beaktande av mellanläggets inverkan enligt tabell 7.3) samt verklig tryckhållfasthet (MPa).



Figur 12.10 Enligt ekvationerna (7.7), (12.8) och (12.9) samt tabell 7.3 beräknad tryckhållfasthet som funktion av verklig (provad) tryckhållfasthet.

Figure 12.10 According to equations (7.7), (12.8), (12.9) and table 7.3 calculated compressive strength as function of real (tested) strength.

12.6 Sammanfattning av balkförsök

* Balkförsöken visade att det var möjligt att med befintlig produktionsutrustning, kompletterad med en utökad fuktkontroll av ballasten, industriellt tillverka tätt armerade balkar i högpresterande betong.

* Nu gällande bestämmelser för betongkonstruktioner, BBK 79, kunde användas för statisk beräkning av en balk med tvärsnittet 100x200 mm ända upp till kubhållfastheten 150 MPa. Den karaktäristiska tryckhållfastheten, f_{cck}, sattes därvid till $f_1/1.41$ och den karaktäristiska draghållfastheten, f_{ctk}, till $(f_1)^{0.667}/6$ (MPa) där f_1 är tryckhållfastheten för standardkub (150 mm).

ALFABETISKT REGISTER

Aktiveringsenergi, 262
Anläggningscement, 12, 32, 46, 58, 69, 82, 86, 121, 122, 321, 328, 341, 351
Balanserad armering, 345, 347
Ballast, 1 , 11, 97, 98, 125, 128, 221, 344
Ballastfraktionering, 341
Beständighet
  armeringskorrosion, 8
  brand-, 8
  frost-, 8, 99
  kemiska angrepp, 8
  kiselsyraangrepp, 8
  sulfatangrepp, 8
Blandningsordning, 76, 88, 352
Blandningsrecept, 7, 24, 32, 58, 82, 86, 122, 188, 234, 256, 258, 265, 321, 323, 328, 341, 343, 351
Blandningstid, 76, 88, 98, 320, 352
Blandningstemperatur, 98, 353
Brottenergi, 338
Böjarmering, 345, 349
Cementpasta, 12, 128, 185, 188, 206
Dehydratation, 48, 186, 192, 222, 236
Desorptionsisoterm, 12, 52, 53, 62, 69, 73
Dimensioneringsgång, 121, 319
Dragarmering, 346 , 347
Efterbehandling, 75
Efterdosering, 320
Ekonomi, 7, 93-96, 353
Elasticitetsmodul, 1, 339
Emissioner, 8
Exsickator, 34, 189
Filler, 98
Flygaska, 81, 232
Flytgräns, 346

Flyttillsats (superplasticerare), 1 , 75, 80, 266
Frifallsblandare, 76, 83
Fukt
  ballast-, 83, 90, 98, 322, 354
  bygg-, 1, 8, 53, 73, 99, 116, 318, 333
  mark-, 70, 115
Fuktdiffusivitet, 10, 11, 225, 227, 232, 234, 237, 247
Fuktkontroll, 83
Fuktkvot (fukthalt), 55, 125
Fuktläckage, 106
Fuktpotential, 228
Fuktprofil, 333
Fuktspänningar, 166
Fuktspärr, 115
Fukttransportkoefficient, 227, 228, 232
Gelporositet, 16, 55
Gjutteknik, 156, 171, 326
Glödgningsförlust, w_n, 26, 189
Gränsstukning (brottstukning), 346, 347
Hydratation
  w_n/C, 202, 213
  w_n/w_e, 47, 48, 60, 202
  w_n/w_0, 69, 181, 185, 202, 206, 213, 214, 218, 246
Hydratationgrad, α, 3, 16, 36, 53, 67, 71, 185, 188, 209, 214
Hydratationsutveckling, 195, 197, 210, 222, 267
Hydratationsvärme, 7
Hygroskopiciteten, 51
Hållfasthet
  cylinder-, 129, 147, 180, 370
  drag-, 125, 126, 146, 178, 338, 373
  karaktäristisk, tryck, 2, 125, 126, 276, 373
  kub-, 140, 151, 370
  spräck-, 125, 126, 144, 148, 178, 222, 338
  tryck-, 140, 147, 163, 174, 204, 206, 217, 367
    relativ, 171, 179, 184
  vidhäftnings-, 128, 146

Hållfasthetsutveckling, 140, 142, 167, 175, 179, 361
Härdningsvatten, 4, 206
Härdning
  allmänt, 142, 156, 179, 354
  membran-, 102, 196
Höghållfast betong, 1
Injekteringscement, 32, 46, 58, 69
Isoterm, 52
Jämviktsfuktkurva, 52
Kalciumhydroxid, 15, 48, 128, 187
Kalciumsilikathydrat (kalciumsilikatgel), 15, 181, 187
Kalorimeter, 258
Kalorimeterkonstant, 260
Kapillaritet, 229, 233, 235, 237, 241, 246, 251
Kapillärporer, 55, 252
Karaktäristisk hållfasthet 2, 125, 126, 276, 373
Karaktäristisk längd, 339
Karbonatisering, 236
Kemisk krympning (kontraktion), 2, 6, 15, 19, 36, 65, 99
Knickpunktstid, 253
Kompaktering, 7, 125, 342, 353
Komprimering, 75, 76, 171
Koldioxid, 236
Konsistens, 80, 88, 90, 98, 322, 340, 353
Kornkurva, 83, 86, 88
Kristallisationsskål, 16, 32, 38, 35, 46
Lufthalt, 90
Luftporbildare, 12, 99, 326
Markfukt, 70
Massiva konstruktioner, 9, 10
Melaminformaldehyd, 12
Mikrostruktur, 129, 240
Momentkapacitet, 340, 354, 363, 367
Motståndstal, 229, 233, 241, 252
Naftalensulfonat, 12, 80
Normalarmerat tvärsnitt, 345, 351

Omformningsmätare, 322
Packningsgrad, 77
Partikelsprång, 77, 325
Platta på mark, 11
Plastisk krympning, 76, 329
Polymerisation, 48, 64, 71, 181, 220
Porfyllnadsgrad efter självuttorkning, S_0, 3, 5 65, 71, 202, 208, 221
Porositet, 187, 252
Porstruktur, 53, 226
Porradie, 53, 65
Porvattnet, 3
Proportionering, 75
Pyknometer, 32
Relativ fuktighet, *RF*
  allmänt, 3, 73, 225
  mätning av, 104, 196, 236, 330, 354, 361
Retardation, 76
Separation, 156
Silikastoft, 1, 11, 12, 38, 64, 65, 71, 80, 88, 91, 97, 100, 114, 116, 118, 128, 144, 146, 154, 174, 175, 180, 186-188, 207, 216-218, 222, 224, 255, 265, 266, 320, 324
Självtorkning, 1, 4, 73, 99, 115, 120, 175, 318, 326, 335, 361
Skjuvarmering, 348, 349
Slipning, 154
Slitecement, 21, 32, 58, 69, 82, 121
Sloda, 76, 320, 329
Sorptionsisoterm, 52, 227
Sorptionsmetod, 228, 235
Specifik volym, 29, 31, 38, 44, 49
Sprickbildning, 255
Spräckbrottandel, 144
Superpositionsprincipen, 348
Statisk bärförmåga, 12
Temperatursprickbildning, 7
Tryckarmerat tvärsnitt, 346

Tryckarmering, 346, 248
Tryckzonshöjd, 345, 347
Tvärkraftskapaciteten, 340, 354, 365
Uttorkning, 161, 370
Vatten
  adsorberat, 15, 51
  avdunstning, 29, 36
  fysikaliskt bundet, 64
  förångningsbart, w_e, 15, 26, 51, 196
  kapillärt, 15
  kemiskt bundet (hydratvatten), w_n, 15, 37, 162, 183, 196
  specifik volym, 29, 31, 38, 44, 49
  w_e/C, 53, 192, 197
  w_{por}, 65
  w_0/C (vattencementtal, vct), 55, 68, 125, 183, 199, 206
  $w_0/(C+S)$ (vattenbindetal), 58, 199
  $w_0/(C+2S)$ ("effektivt vattenbindetal"), 58, 120, 167, 174, 367
Vattentäthet, 99
Vattenuppsugning, 229, 254
Vattenupptagning i sand, 29
Vidhäftningsbrott, 144
Vinsolharts, 12
Väggeffekt, 78
Värmeförlusttal, 260
Värmeutveckling
  allmänt, 7, 255
  adiabatiska, 10, 257
Ytspänning, 79
Ångdiffusion, 225
Ånggenomsläpplighet, 228
Ångpermeabilitet, 228, 232, 240
Ångtryck, 227
Ångsprängning, 8
Återuppfuktning, 161, 163, 180
Överarmerat tvärsnitt, 347, 351
Övergångszon (fasgräns), 128, 144, 240