

Cathrine Ewertson

Säkerhet vid Betongarbete del 2

- Materialparametrar för betong med tillsatsmaterial

Abstract

Safety at concrete working site - material parameters for concrete with silica fume or flushing slag

Two usually used methods for determination of the strength at the time of the form stripping are, compressive tests conducted on control samples at the time of the form stripping and the utilization of the maturity functions.

In this project, which is a continuation on the earlier project which is reported in Safety at concrete working site - Development of the bearing capacity of the reinforced concrete structures [1], six different types of concrete were studied. The binding agents were Swedish standard Portland cement and Portland cement with silica fume or blast furnace slag cement. The water cement ratios were varied from 0.35 to 0.85. The compressive strength was determined at different ages, from 10 h to 28 days. The temperature in the concrete was recorded.

From the results the maturity functions and the curves of the strength development were calculated for each type of concrete.

Keywords: Concrete, form stripping, early age and strength development

**SP Sveriges Provnings- och
Forskningsinstitut**
SP Rapport 1998:36
ISBN 91-7848-742-0
ISSN 0284-5172
Borås 1998

**SP Swedish National Testing and
Research Institute**
SP Report 1998:36

Postal address:
Box 857, SE-501 15 BORÅS,
Sweden
Telephone: +46 33 16 50 00
Telefax: +46 33 13 55 02
E-mail: info@sp.se
Internet: www.sp.se

Innehållsförteckning

Abstract	2
Innehållsförteckning	3
Förord	4
Sammanfattning	5
1 Inledning	6
1.1 Bakgrund	6
1.2 Syfte	6
1.3 Genomförande av projektet	7
2 Mognadsålder och ekvivalent härdningstal	8
3 Provningsprogram	9
3.1 Allmänt	9
3.2 Betongblandning	9
3.2.1 Bindemedel	9
3.2.2 Beteckningar	10
3.2.3 Vattencementtal	10
3.2.4 Ballast	11
3.2.5 Flyttillsatsmedel	11
3.3 Proportionering	11
3.4 Blandning av betong	13
3.5 Konditionering och härdning	15
3.6 Provningar	15
3.6.1 Provningsålder	15
3.6.2 Provningsmetoder	15
4 Provningsresultat	16
4.1 Tryckhållfasthet enligt svensk standard	16
4.2 Tryckhållfasthet bestämd vid olika åldrar	19
4.3 Spräckhållfasthet	22
4.4 Samband mellan spräck- och tryckhållfasthet	23
4.5 Temperaturutveckling i provkroppar	24
5 Bestämning av tendenskurvor	25
5.1 Tryckhållfasthet som funktion av vattencementtal	25
5.2 Tendenskurvor - tryckhållfasthet som funktion av mognadsgrad	29
5.3 Spräckhållfasthet som funktion av vattencementtal	33
5.4 Tendenskurvor - spräckhållfasthet som funktion av mognadsgrad	34
6 Kommentarer	36
Referenser	38
Bilaga A Siktkurvor	
Bilaga B Tryckhållfasthet	
Bilaga C Spräckhållfasthet	
Bilaga D Temperaturutveckling	
Bilaga E Verklig effektivitetsfaktor	

Förord

I rapporten redovisas resultat som har erhållits i projektet ”Säkerhet vid betongarbete del 2 - Framtagning av materialparametrar”. Projektets syfte var att ta fram kompletterande materialdata till tidigare utfört projekt ”Säkerhet vid Betongarbete - Utveckling av bär-förmåga hos armerade betongkonstruktioner i tidig ålder”. Projektens huvudsakliga syfte är att öka säkerheten vid formrivning vid betongarbete vintertid, vilket erhålls genom att bättre känna till olika materials hållfasthetstillväxt vid tidig ålder.

Projektet har finansierats av Rådet för Arbetslivsforskning, RALF. Projektet har genomförts vid sektionerna för Byggnadskonstruktion och Betong, enheten för Byggnadsteknik, vid SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut.

Planeringen av detta projekt har utförts av tekn dr Manouchehr Hassanzadeh, Byggnadsmateriallära - Lunds Tekniska Högskola. Projektet har genomförts i två delar. En del har utförts av examensarbetaren Korosh Saidi, Högskolan i Borås, handledd av Hassanzadeh. Återstående arbete har utförts av Cathrine Ewertson, Betongsektionen.

Vid projektets genomförande har medverkan från Gert-Olof Johansson och Sten Hjelm varit ovärderlig. Ett stort tack till dessa och alla andra som har hjälpt till.

Slutligen stort tack till Manouchehr Hassanzadeh för stöd och hjälp vid genomförande av projektet och utarbetandet av rapporten.

Borås, december 1998.

Cathrine Ewertson

Sammanfattning

För sex betongblandningar med portlandcement och olika mineraliska tillsatsmaterial har hållfasthetstillväxten studerats. Projektet, som är en direkt fortsättning på ett tidigare arbete som redovisas i Säkerhet vid betongarbete - Utveckling av bärformåga hos armerade betongkonstruktioner i tidig ålder [1], har genomförts dels som examensarbete och dels vid betongsektionen, Byggnadsteknik, SP.

Huvudbindemedlet var standard portlandcement, Slite standard, som blandades med varierande mängd silikastoft eller slagg. Det effektiva vattencementtalet varierades mellan 0,35 till 0,85 (8 olika vct_{ekv}) för att erhålla betonger med varierande 28 dygns tryckhållfasthet. För att bestämma betongernas tryckhållfasthetstillväxt bestämdes deras tryckhållfasthet vid 7 olika åldrar. Provkropparna härdades i plastpåsar med våta fiberdukar fram till provning. För varje betongblandning härdades och bestämdes även tryckhållfastheten enligt svensk standard SS 13 72 10, vilken är den metod som används i Sverige för hållfasthetsbedömning.

Spräckhållfastheten bestämdes för ett mindre antal kombinationer av bindemedel och vct respektive vct_{ekv} vid olika åldrar.

De erhållna resultaten har använts för att bl a beräkna, mognadsålder, sambandet mellan tryckhållfasthet och vct samt sambandet mellan tryckhållfasthet och tid vid 20 °C - tendenskurva.

Resultaten från det utförda arbetet visar att hållfasthetsutvecklingen med avseende på tryckhållfasthet inte är densamma för de sex olika bindemedelstyperna, vilket i sin tur ger olika tendenskurvor.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I BBK 94 avsnitt 8.2 och 8.5 ställs följande krav vid formrivning: ”Om erforderlig betonghållfasthet vid formrivning inte anges i bygghandling, bör normalt tryckhållfastheten vid rivning av bärande form vara minst 70 % av fordrad hållfasthet” samt ”Nygjuten betong bör skyddas mot nederbörd, uttorkning och frysning. Skydd mot frysning bör ske till dess att betongen uppnått en tryckhållfasthet av 5 MPa”. Detta har en avgörande betydelse så att formrivning inte utförs förrän man vet att betongen har uppnått den erforderliga hållfastheten. Annars kan vid formrivningen allvarliga kollapser av gjutna betongkonstruktioner ske med bland annat stor risk för personskador.

Det finns två huvudgrupper av metoder för att bestämma betongens hållfasthet vid formrivning; förstörande och icke förstörande metoder.

De förstörande metoderna har den fördelen att de ger relativt tillförlitliga resultat av betongens hållfasthet. Nackdelen är att de gör ingrepp i konstruktionen som behöver åtgärdas efter formrivning.

En icke-förstörande metod är att bestämma betongens hållfasthet genom mätning av dess mognadsgrad -mognadsålder. Det vill säga att bestämma hur långt den aktuella betongens kemiska reaktioner har fortskridit i förhållande till om samma betong hade härdats vid referenstemperaturen, 20 °C, under lika lång tid. För att bestämma mognadsgraden mäter man betongens temperaturutveckling, vilken används för att beräkna dess mognadsgrad. Med hjälp av mognadsgraden kan man avläsa betongens hållfasthet ur en tendenskurva. En förutsättning för att få tillförlitliga resultat är att rätt tendenskurva används. Metoden är lätt att utföra och kräver ingen efterlagning m m.

I det tidigare projektet ”Säkerhet vid Betongarbete - Utveckling av bärformåga hos armerade betongkonstruktioner i tidig ålder” bestämdes temperaturkänslighetskurvor för 6 olika typer av bindemedel. Temperaturkänslighetskurvor beskriver sambandet mellan hållfasthetstillväxten och temperaturen, se figur 15 i [1]. Det bestämdes även tendenskurvor för en hållfasthetsklass. Efter att arbetet var slutfört föreslogs att man skulle ta fram kompletterande materialparametrar för att möjliggöra en generell användning av de mognadsgradsbaserade metoderna för betonger tillverkade med de bindemedel som ingick i det tidigare projektet och som inte finns redovisade i litteraturen.

1.2 Syfte

Syftet med projektet har varit att ta fram kompletterande materialparametrar, i form av tendenskurvor, till det tidigare genomförda projektet.

1.3 Genomförande av projektet

Hållfasthetstillväxten för olika betonger med avseende på bindemedelstyp har studerats för 8 olika vct_{ekv} . För samtliga betongblandningar bestämdes tryckhållfastheten vid olika tidpunkter. Spräckhållfastheten bestämdes för två bindemedelstyper och 3 olika vct_{ekv} .

En del av projektet har utförts av examensarbetaren Korosh Saidi, Högskolan i Borås. Han bestämde tendenskurvor för två olika bindemedel, ren portlandcement och portlandcement med 35 % slagg. Resten av projektet genomfördes av Cathrine Ewertson.

Examensarbetaren Saidis arbete redovisas i ”Bestämning av tendenskurvor hos betong med olika bindemedel” [2]. I föreliggande rapport redovisas samtliga resultat för de sex olika bindemedelstyperna.

2 Mognadsålder och ekvivalent härdningstal

Begreppet mognadsålder används i allmänhet i de sammanhang där betongen har härdats vid annan temperatur än referenstemperaturen 20 °C. När man bestämmer betongens mognadsålder enligt Betonghandboken [3] är det detsamma som att bestämma hur långt den aktuella hållfasthetsutvecklingen har hunnit i förhållande till samma betong som härdats vid referenstemperaturen. Mognadsåldern, M, beräknas enligt Arreheniusfunktionen, se nedan:

$$M = \int_0^t \beta_t \cdot dt \quad (1)$$

där M är mognadsålder (h)
 β_t är hastighetsfaktor beroende av temperaturen
 t är tiden (h)

Temperatkänsligheten β_t definieras enligt nedan:

$$\beta_t = e^{-\theta \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T} \right)} \quad (2)$$

$$\text{där } \theta = \theta_0 \cdot \left(\frac{30}{v + 10} \right)^{\kappa_3} \quad (3)$$

där v är provkroppens temperatur, °C
 T är $273 + v$, absoluta temperaturen, K
 θ_0 respektive κ_3 är specifika för varje bindemedelstyp. Värden för sex bindemedel har tagits fram av Hassanzadeh [1], se tabell 1.

Tabell 1. θ_0 och κ_3 värden för bindemedlen, [1]. Bindemedlen är desamma som används i denna undersökning.

Bindemedel	θ_0 °C	κ_3
Portlandcement	5150	0,47
Portlandcement + 20 % slag	5500	0,17
Portlandcement + 35 % slag	6000	0,12
Portlandcement + 65 % slag	5400	0,19
Portlandcement + 5 % silikastoft	5250	0,37
Portlandcement + 10 % silikastoft	4850	0,19

Ofta benämns M istället med t_e -ekvivalent tid, alltså den tid som krävs vid 20 °C för att erhålla samma hydratationsgrad som har uppnåtts vid den aktuella tiden och temperaturen.

3 Provningsprogram

3.1 Allmänt

Tendenskurvor har bestämts för sex olika bindemedelstyper. De bindemedel som har ingått i projektet är följande; standard portlandcement och standard portlandcement blandat med olika mängd av mineraliska tillsatsmaterial i form av slagg eller silikastoft. För varje bindemedelstyp varierades vct respektive det ekvivalenta vattencementtalet (se kap. 3.2.3) från 0,35 till 0,85. För varje bindemedelstyp tillverkades provkroppar för bestämning av tryckhållfasthet vid 7 olika åldrar. Provropparna härdades i plastpåsar med våta fiberdukar vid cirka +20 °C fram till provning. För en del serier har även betongens spräckhållfasthet bestämts. Projektets genomförande beskrivs nedan.

3.2 Betongblandning

3.2.1 Bindemedel

I samtliga blandningar ingick standard portlandcement "Slite standard", vilket för 5 st blandningar blandades med mineraliska tillsatsmaterial i form av slagg eller silikastoft. Slaggen var av märke Merit, Merox från Oxelösund. Silikastoftet var av märke Elkem Microsilica, från Aarhus-tanken. Silikastoftet var blandat med vatten, det vill säga det var en 50 %-ig slurry. Mängden tillsatsmaterial utgjorde en bestämd viktsandel av portlandcementet. De olika varianterna av bindemedel som ingick framgår av tabell 2.

Tabell 2. I projektet ingående bindemedelstyper

Serie I	Portlandcement	
Serie II	Portlandcement	+ Slagg 20 %
Serie III	Portlandcement	+ Slagg 35 %
Serie IV	Portlandcement	+ Slagg 65 %
Serie V	Portlandcement	+ Silikastoft 5 %
Serie VI	Portlandcement	+ Silikastoft 10 %

3.2.2 Beteckningar

I rapporten förekommer beteckningar på de olika betongblandningarna, vilka förklaras i nedanstående tabell.

Tabell 3. Beteckningar på betongblandningar

vct _{ekv}	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,65	0,75	0,85
<u>SERIE I - PORTLANDCEMENT</u>								
PL-0,35	PL-0,40	PL-0,45	PL-0,50	PL-0,55	PL-0,65	PL-0,75	PL-0,85	
<u>SERIE II - PORTLANDCEMENT + 20 % SLAGG</u>								
SL20-0,35	SL20-0,40	SL20-0,45	SL20-0,50	SL20-0,55	SL20-0,65	SL20-0,75	SL20-0,85	
<u>SERIE III - PORTLANDCEMENT + 35 % SLAGG</u>								
SL35-0,35	SL35-0,40	SL35-0,45	SL35-0,50	SL35-0,55	SL35-0,65	SL35-0,75	SL35-0,85	
<u>SERIE IV - PORTLANDCEMENT + 65 % SLAGG</u>								
SL65-0,35	SL65-0,40	SL65-0,45	SL65-0,50	SL65-0,55	SL65-0,65	SL65-0,75	SL65-0,85	
<u>SERIE V - PORTLANDCEMENT + 5 % SILIKASTOFT</u>								
SI5-0,35	SI5-0,40	SI5-0,45	SI5-0,50	SI5-0,55	SI5-0,65	SI5-0,75	SI5-0,85	
<u>SERIE VI - PORTLANDCEMENT + 10 % SILIKASTOFT</u>								
SI10-0,35	SI10-0,40	SI10-0,45	SI10-0,50	SI10-0,55	SI10-0,65	SI10-0,75	SI10-0,85	

3.2.3 Vattencementtal

Vattencementtalet, vct, har beräknats för betongen med enbart portlandcement enligt följande:

$$vct = \frac{W}{C} \quad (4)$$

där W respektive C är vattnets respektive cementets vikt.

Ekvivalent vattencementtal, vct_{ekv}, har beräknats för de betonger som har bindemedel som består dels av cement och dels mineraliskt tillsatsmaterial enligt följande:

$$vct_{ekv} = \frac{W}{C+\epsilon D} \quad (5)$$

där ϵ är en effektivitetsfaktor. ϵ har antagits till 1,0 för silikastoft och 0,6 för granulerad masugnsslagg, vilket motsvarar de värden som anges i BBK94 Band 2, kap 7.2.3.
D är tillsatsmaterialets vikt.

I projektet har vct respektive vct_{ekv} valts till 0,35, 0,40, 0,45, 0,50, 0,55, 0,65, 0,75 och 0,85 för de sex olika betongblandningarna med avseende på bindemedel.

3.2.4 Ballast

Ballasten var sammansatt av två delmaterial; natursand, 0-8 mm, och krossat berg 8-16 mm. Stenmax var 16 mm. Materialens siktkurvor återfinns i bilaga A.

3.2.5 Flyttillsatsmedel

Till en del betongblandningar användes flyttillsatsmedel för att få en mer ”gjutbar” betong. Cementas V33 (melaminbaserad) med en torrhalt på 33 % användes.

3.3 Proportionering

Proportioneringen av betongen har utförts enligt Hassanzadeh [1]. Recepten för samtliga betongblandningar redovisas i följande tabeller 4-10.

Tabell 4. Betongrecept för portlandcement. (Tryckhållfasthet) [2].

Serie I (kg/m ³)	PL- 0,36*	PL- 0,40	PL- 0,45	PL- 0,50	PL- 0,55	PL- 0,65	PL- 0,75	PL- 0,85
Portlandcement	457	400	400	394	361	305	262	247
Vatten	165	160	180	197	199	198	196	210
Slagg	0	0	0	0	0	0	0	0
Silikastoft	0	0	0	0	0	0	0	0
vct	0,36	0,40	0,45	0,50	0,55	0,65	0,75	0,85
Flyttillsats i lösning	11,7	8	4,8	0	0	0	0	0
Ballast 0-8 mm	766	829	846	827	915	942	959	990
Ballast 8-16 mm	1016	1002	932	911	845	869	885	840
Ballast, totalt	1782	1831	1778	1738	1760	1811	1843	1830

* på grund av felberäkning, det skulle ha varit 0,35.

Tabell 5. Betongrecept för portlandcement och 20 % slagg

Serie II (kg/m ³)	SL20- 0,35	SL20- 0,40	SL20- 0,45	SL20- 0,50	SL20- 0,55	SL20- 0,65	SL20- 0,75	SL20- 0,85
Portlandcement	395	344	345	340	313	265	228	216
Vatten	155	154	174	190	193	193	192	206
Slagg	79	69	69	68	63	53	46	43
Silikastoft	0	0	0	0	0	0	0	0
Ekvivalent vct	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,65	0,75	0,85
Flyttillsats i lösning	18,1	11,1	4,7	0	0	0	0	0
Ballast 0-8 mm	799	898	871	870	898	941	981	1005
Ballast 8-16 mm	977	934	907	871	862	869	870	822
Ballast, totalt	1776	1832	1778	1741	1760	1810	1851	1827

Tabell 6. Betongrecept för portlandcement och 35 % slagg [2].

Serie III (kg/m ³)	SL35- 0,35	SL35- 0,40	SL35- 0,45	SL35- 0,50	SL35- 0,55	SL35- 0,65	SL35- 0,75	SL35- 0,85
Portlandcement	425	312	313	314	294	241	218	205
Vatten	180	151	170	190	195	190	198	210
Slagg	149	109	110	110	103	85	76	72
Silikastoft	0	0	0	0	0	0	0	0
Ekvivalent vct	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,65	0,75	0,85
Flyttillsats i lösning	6	8	5,5	0	0	0	0	0
Ballast 0-8 mm	697	872	846	821	894	904	933	974
Ballast 8-16 mm	924	960	932	904	894	907	936	826
Ballast, totalt	1621	1831	1778	1725	1787	1811	1869	1800

Tabell 7. Betongrecept för portlandcement och 65 % slagg

Serie IV (kg/m ³)	SL65- 0,35	SL65- 0,40	SL65- 0,45	SL65- 0,50	SL65- 0,55	SL65- 0,65	SL65- 0,75	SL65- 0,85
Portlandcement	350	292	264	261	241	205	177	168
Vatten	170	162	165	181	184	185	185	198
Slagg	227	190	172	170	156	133	115	109
Silikastoft	0	0	0	0	0	0	0	0
Ekvivalent vct	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,65	0,75	0,85
Flyttillsats i lösning	14,4	11,3	6,5	1,9	0	0	0	0
Ballast 0-8 mm	738	855	871	869	898	941	980	1005
Ballast 8-16 mm	902	889	906	870	863	869	870	823
Ballast, totalt	1640	1744	1777	1739	1761	1810	1850	1828

Tabell 8. Betongrecept för portlandcement och 5 % silikastoft

Serie V (kg/m ³)	SI5- 0,35	SI5- 0,40	SI5- 0,45	SI5- 0,50	SI5- 0,55	SI5- 0,65	SI5- 0,75	SI5- 0,85
Portlandcement	484	408	378	372	342	288	248	234
Vatten	178	171	179	195	198	197	195	209
Slagg	0	0	0	0	0	0	0	0
Silikastoft	24	20	19	19	17	14	12	12
Ekvivalent vct	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,65	0,75	0,85
Flyttillsats i lösning	7,8	8,0	4,9	2,1	1,4	0	0	0
Ballast 0-8 mm	757	867	871	870	898	943	982	1006
Ballast 8-16 mm	926	902	907	869	863	870	871	824
Ballast, totalt	1683	1769	1778	1739	1761	1813	1853	1830

Tabell 9. Betongrecept för portlandcement och 10 % silikastoft

Serie VI (kg/m ³)	SI10- 0,35	SI10- 0,40	SI10- 0,45	SI10- 0,50	SI10- 0,55	SI10- 0,65	SI10- 0,75	SI10- 0,85
Portlandcement	461	388	358	353	324	274	235	222
Vatten	178	171	177	194	196	196	194	208
Slagg	0	0	0	0	0	0	0	0
Silikastoft	46	39	36	35	32	27	24	22
Ekvivalent vct	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,65	0,75	0,85
Flyttilsats i lösning	10,4	8,0	6,0	3,2	1,7	0,8	1,4	1,2
Ballast 0-8 mm	755	865	871	869	899	941	983	1006
Ballast 8-16 mm	922	901	907	869	863	869	871	824
Ballast, totalt	1677	1766	1778	1738	1762	1810	1854	1830

Tabell 10. Betongrecept för portlandcement. (Spräckhållfasthet)

Serie I * (kg/m ³)	PL-0,36	PL-0,55	PL-0,75
Portlandcement	457	361	262
Vatten	165	199	196
Slagg	0	0	0
Silikastoft	0	0	0
vct	0,36	0,55	0,75
Flyttilsats i lösning	10,1	0	0
Ballast 0-8 mm	766	915	959
Ballast 8-16 mm	1016	845	885
Ballast, totalt	1782	1760	1844

* Extra gjutning

3.4 Blandning av betong

Samtliga provkroppar för varje kombination av bindemedelstyp och vct_{ekv} tillverkades av en betongsats.

Blandningen av betongen utfördes enligt följande. De torra materialen cement, slagg och ballast, tillsattes först och blandades under en minut före det att vattnet tillsattes. Betongen blandades därefter ytterligare tre minuter. I de fall där silikastoft ingick i receptet tillsattes detta till blandningsvattnet. Till de betongblandningar där flyttilsatsmedel användes tillsattes halva mängden med blandningsvattnet och resterande delen under den sista minuten.

Den använda betongblandaren var av typ Sandby SU350 en 350-liters gummiinklädd tvångsblandare. Betongsatsernas storlek var 130 l eller 200 l. Betongen tömdes i en bask efter blandningens slut. Följande bestämningar av den färsk betongens egenskaper gjordes direkt; temperatur, konsistens (sättmått enligt SS 13 71 21) och lufthalt enligt tryckmetoden SS 13 71 24. Därefter tillverkades erforderligt antal provkroppar enligt SS 13 72 10. Stålformar (med innermått 150x150x150 mm) fyldes med betong i två lager. Varje lager vibrerades under ca 15 sekunder på ett vibrationsbord. Ytan ströks av med en stållinjal.

Önskad betongtemperatur vid blandning var +20 °C. Detta var svårt att uppnå i en del fall på grund av ballastens och vattnets ursprungstemperatur. I tabell 11 redovisas erhållna värden på temperatur, sättmått och lufthalt i den färsk betongen för de olika betongblandningarna. Uppmätta temperaturer i betongblandningarna enligt tabell 11 har använts i de följande beräkningarna.

Tabell 11. Betongblandningarnas temperatur, sättmått och lufthalt

Betongblandning Märkning	Temperatur (° C)	Sättmått (mm)	Lufthalt (%)
PL-0,36*	20,6	87	1,5
PL-0,40*	22,2	50	2,3
PL-0,45*	19,8	70	1,8
PL-0,50*	20,0	68	1,9
PL-0,55*	18,5	65	1,7
PL-0,65*	18,7	70	1,5
PL-0,75*	18,9	75	1,6
PL-0,85*	17,7	75	1,7
SL20-0,35	25,1	55	1,9
SL20-0,40	23,5	85	1,2
SL20-0,45	21,8	75	
SL20-0,50	20,9	75	1,7
SL20-0,55	21,3	75	2,0
SL20-0,65	20,6	60	2,3
SL20-0,75	20,4	60	2,0
SL20-0,85	19,9	80	1,3
SL35-0,35*	19,1	55	2,3
SL35-0,40*	19,3	65	1,9
SL35-0,45*	19,4	68	2,4
SL35-0,50*	17,3	68	1,9
SL35-0,55*	16,8	84	2,0
SL35-0,65*	17,9	55	2,2
SL35-0,75*	16,5	76	2,1
SL35-0,85*	16,4	82	1,6
SL65-0,35	21,9	90	1,6
SL65-0,40	21,3	85	1,7
SL65-0,45	20,7	80	2,2
SL65-0,50	20,1	80	2,3
SL65-0,55	20,0	70	2,0
SL65-0,65	19,6	75	2,0
SL65-0,75	19,5	80	1,4
SL65-0,85	19,2	80	1,3
SI5-0,35	21,9	100	1,3
SI5-0,40	21,5	85	1,3
SI5-0,45	21,1	80	1,4
SI5-0,50	20,9	80	1,2
SI5-0,55	21,7	90	1,1
SI5-0,65	20,6	65	1,2
SI5-0,75	21,2	75	1,3
SI5-0,85	20,3	70	1,5
SI10-0,35	21,2	80	1,3
SI10-0,40	21,1	85	1,5
SI10-0,45	21,2	70	1,4
SI10-0,50	21,1	70	1,4
SI10-0,55	20,6	65	1,1
SI10-0,65	20,6	75	1,1
SI10-0,75	21,1	70	1,5
SI10-0,85	20,9	70	1,8

* Resultat hämtade från [2].

3.5 Konditionering och härdning

Samtliga provkroppar förvarades under det första dygnet, på en träpall täckta av en plastfolie, i ett klimatstyrkt provningsrum, ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ och 40 - 80 % RF). Efter 10 h avformades de tre första provkropparna för provning. Vid ett dygns ålder avformades samtliga återstående provkroppar. De provkroppar som skulle provas vid 2 dygn och vid senare ålder, härdades genom att förvaras tre och tre i plastpåsar med våta fiberdukar inuti. Plastpåsarna förslöts för att få en god fukthärdning, vilket innebär en RF på närmare 100 %. Samtliga provkroppar förvarades fram till provning i ovan nämnda provningsrum.

Tre provkroppar från varje betongsats härdades enligt SS 13 72 10, det vill säga att efter avformning förvarades de i $+20^\circ\text{C}$ vatten fram till 5 dygns ålder. Resterande tid fram till 28 dygn förvarades de i $20 \pm 2^\circ\text{C}$ och 40 - 80 % RF.

Temperaturen och tiden registrerades hos 3 provkroppar från varje betongblandning med hjälp av termoelement som var anslutna till en datalogger.

3.6 Provningar

3.6.1 Provningsålder

Samtliga seriers tryckhållfasthet bestämdes i de flesta fall efter 10, 24, 48, 72, 168, 336 och 672 timmar, dvs efter 0,33, 1, 2, 3, 7, 14 och 28 dygn. Provningsåldern avser tiden från det att vattnet har tillsatts till betongen vid blandning fram till provningen. Provningsåldern för de serier där spräckhållfasthet har provats var densamma som för tryckhållfasthet.

3.6.2 Provningsmetoder

Tryckhållfastheten har bestämts enligt SS 13 72 10.

Spräckhållfastheten har bestämts enligt SS 13 72 13.

4 Provningsresultat

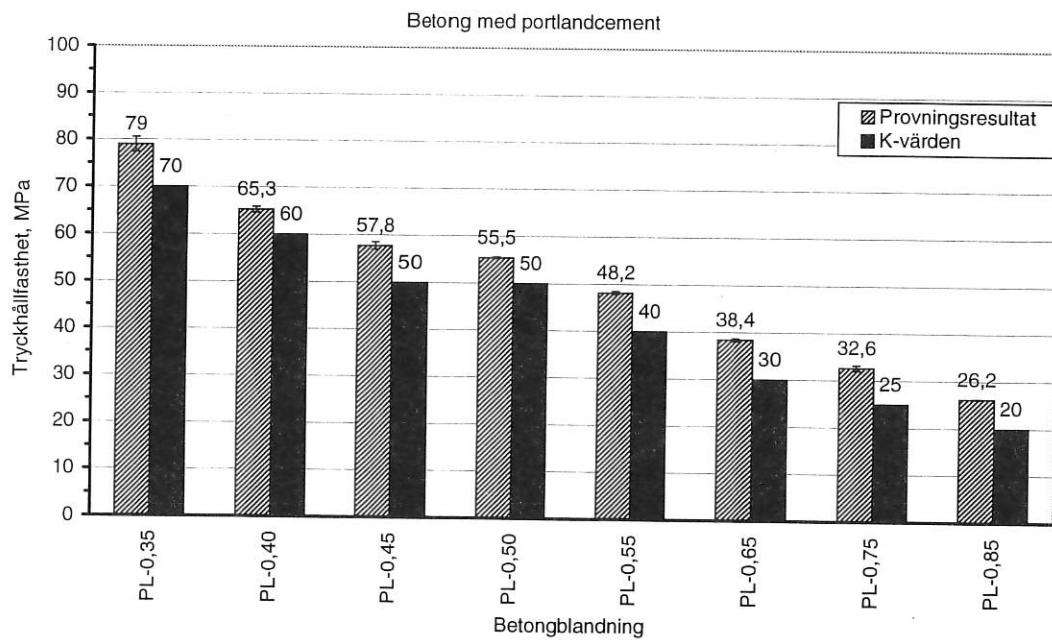
4.1 Tryckhållfasthet enligt svensk standard.

Tryckhållfastheten har bestämts enligt svensk standard SS 13 72 10 vid 28 dygn. Resultaten redovisas i följande figurer, 1-6. I figurerna har även betongernas hållfasthetsklass plottats. Den är beräknad enligt BBK 7.3.3.2 ”Hållfasthetsvärdering vid fortlöpande provning”, följande formel:

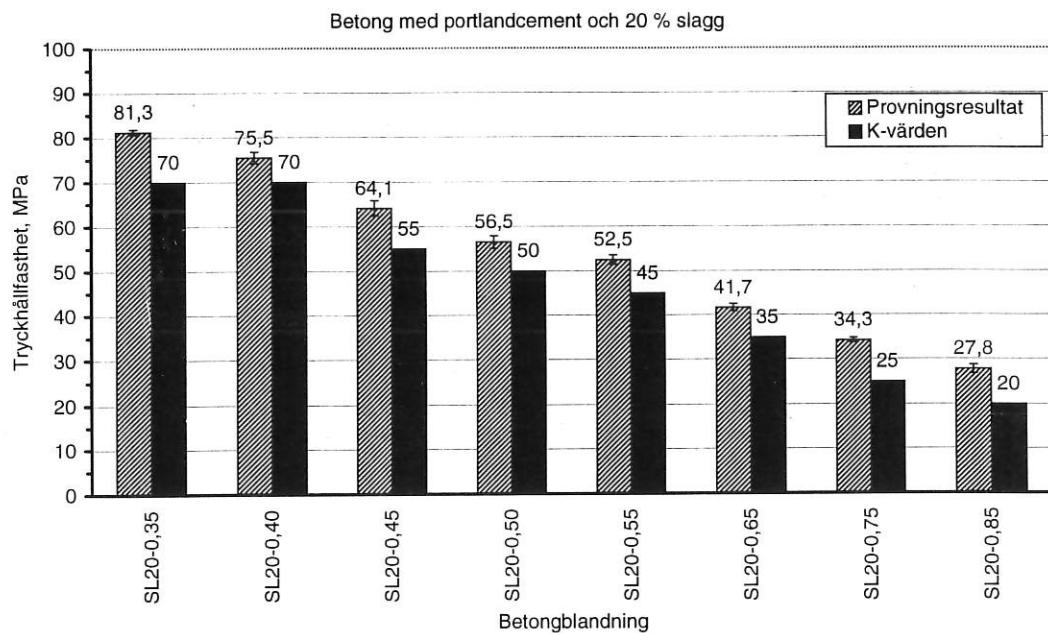
$$f_k \leq m_3 - 5 \quad \text{MPa} \quad (6)$$

där m_3 (MPa) är medelvärdet av tre provningar
 f_k (MPa) är fordrat värde på tryckhållfasthet
5 har valts med anledning av att det är endast en serie som har provats

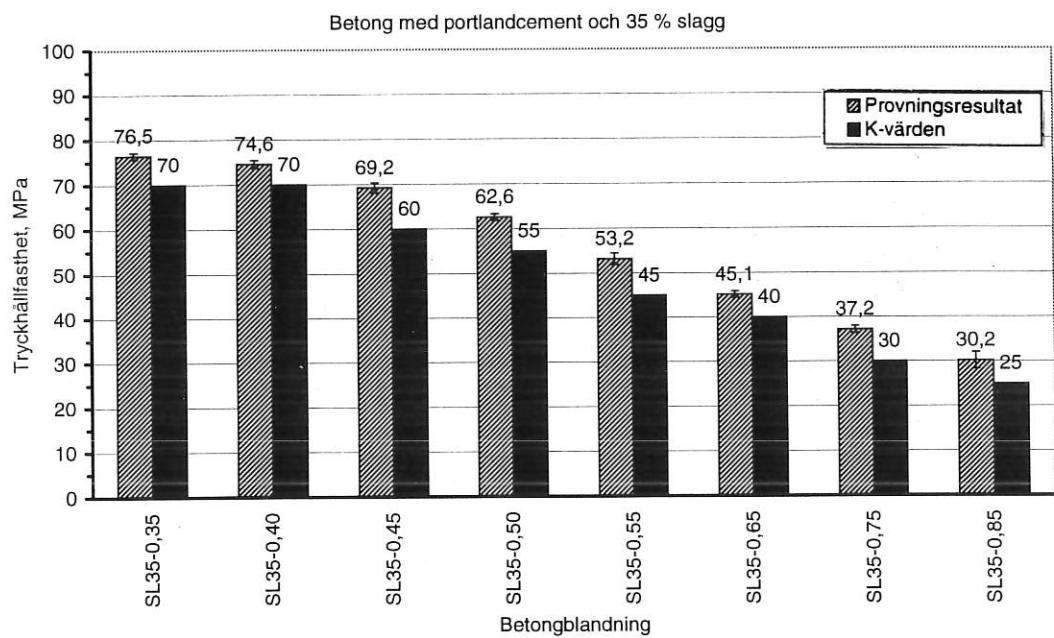
Betongens hållfasthetsklass har erhållits genom avrundning av f_k ned till närmsta klass.



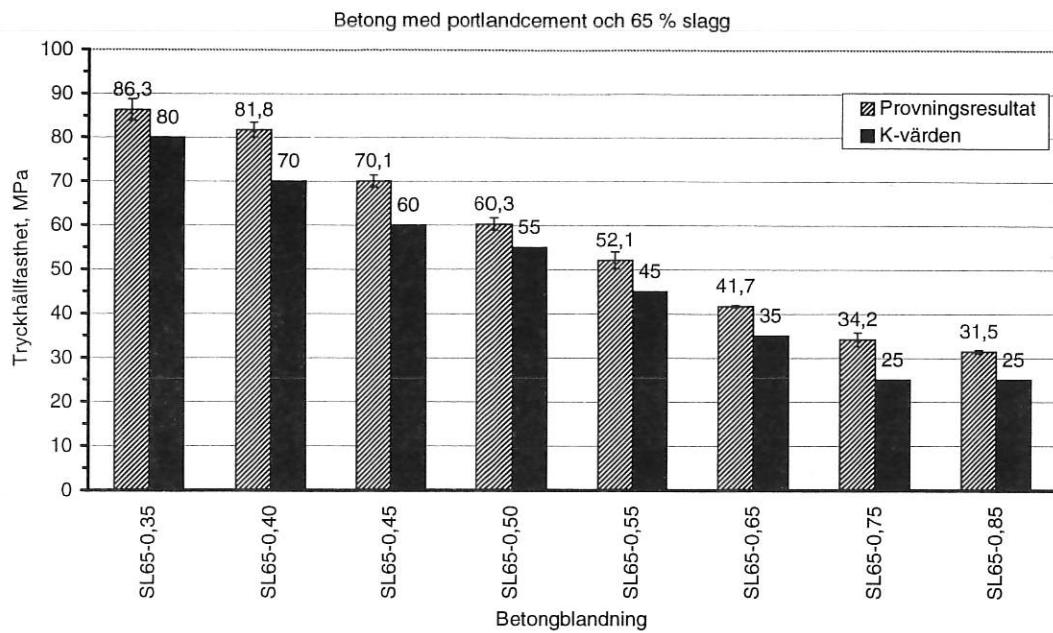
Figur 1. Tryckhållfasthet bestämd enligt svensk standard, serie I. [2]



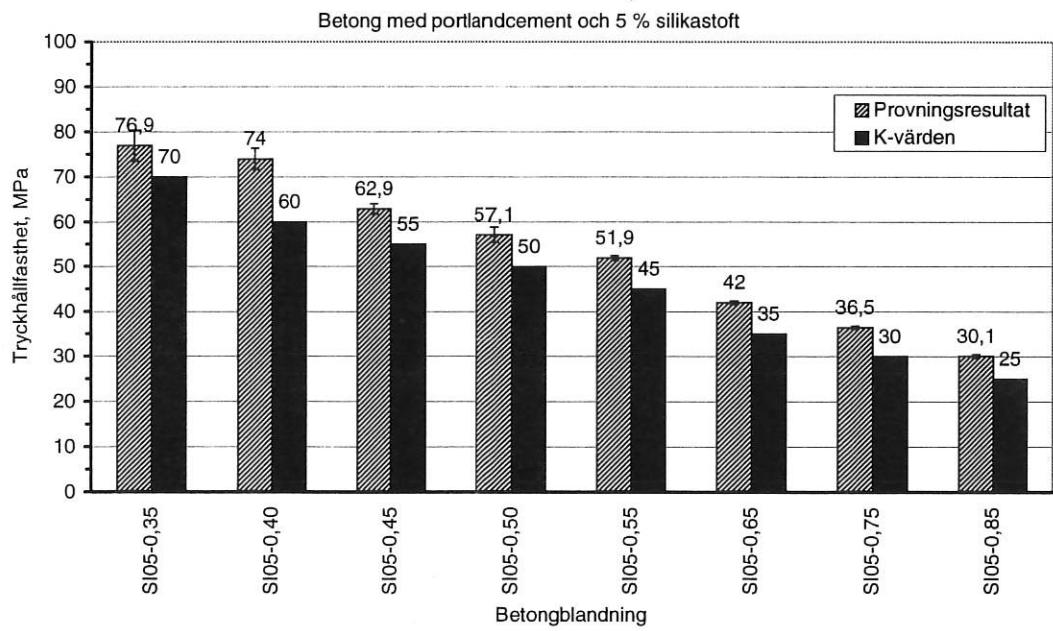
Figur 2. Tryckhållfasthet bestämd enligt svensk standard, serie II.



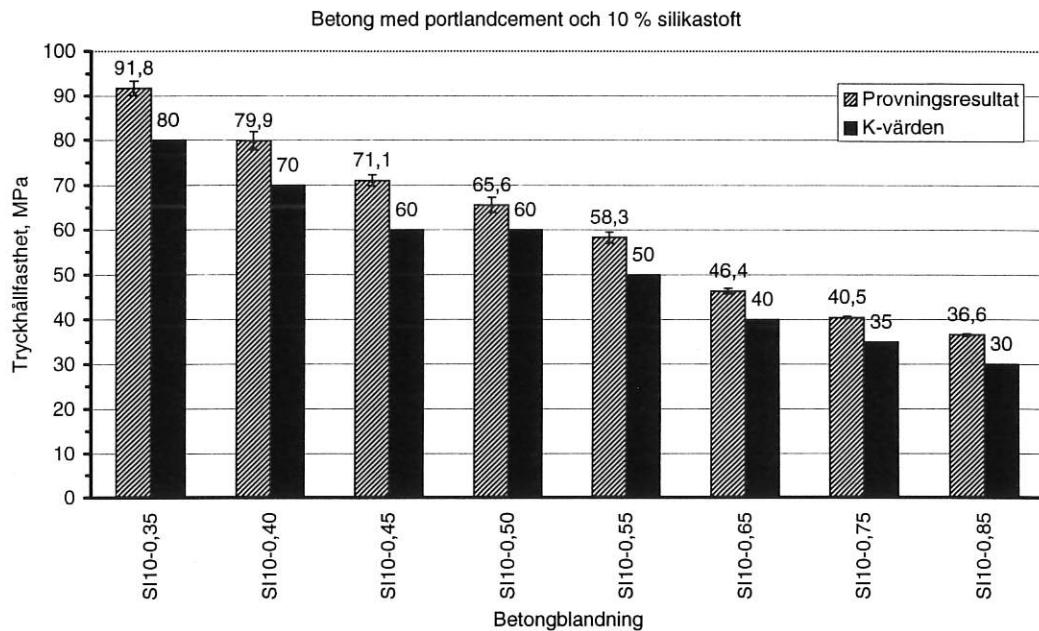
Figur 3. Tryckhållfasthet bestämd enligt svensk standard, serie III. [2]



Figur 4. Tryckhållfasthet bestämd enligt svensk standard, serie IV.



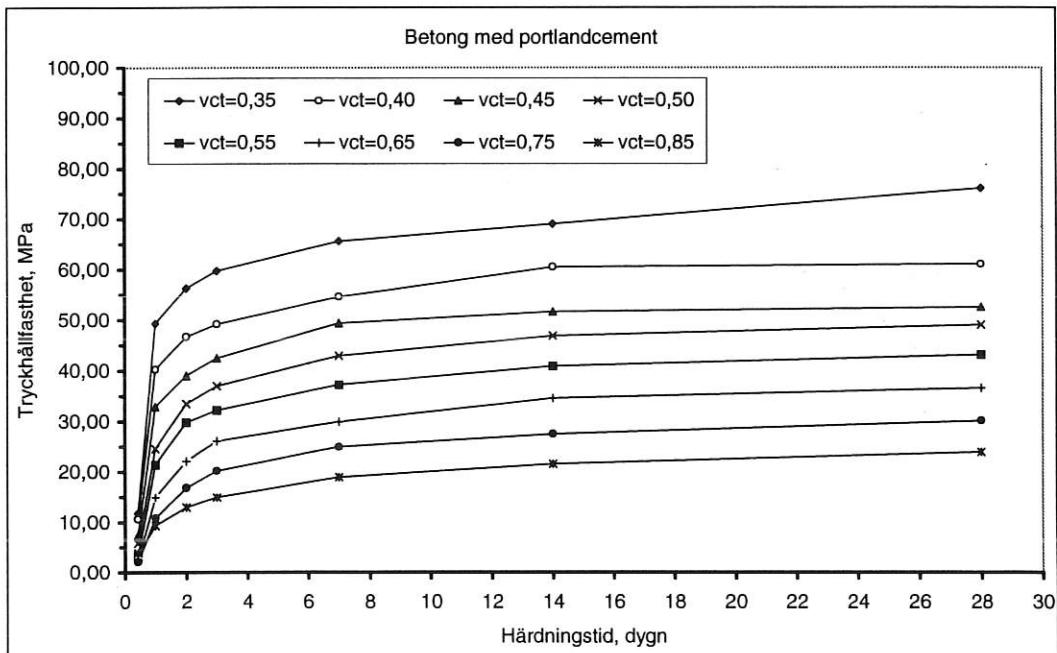
Figur 5. Tryckhållfasthet bestämd enligt svensk standard, serie V.



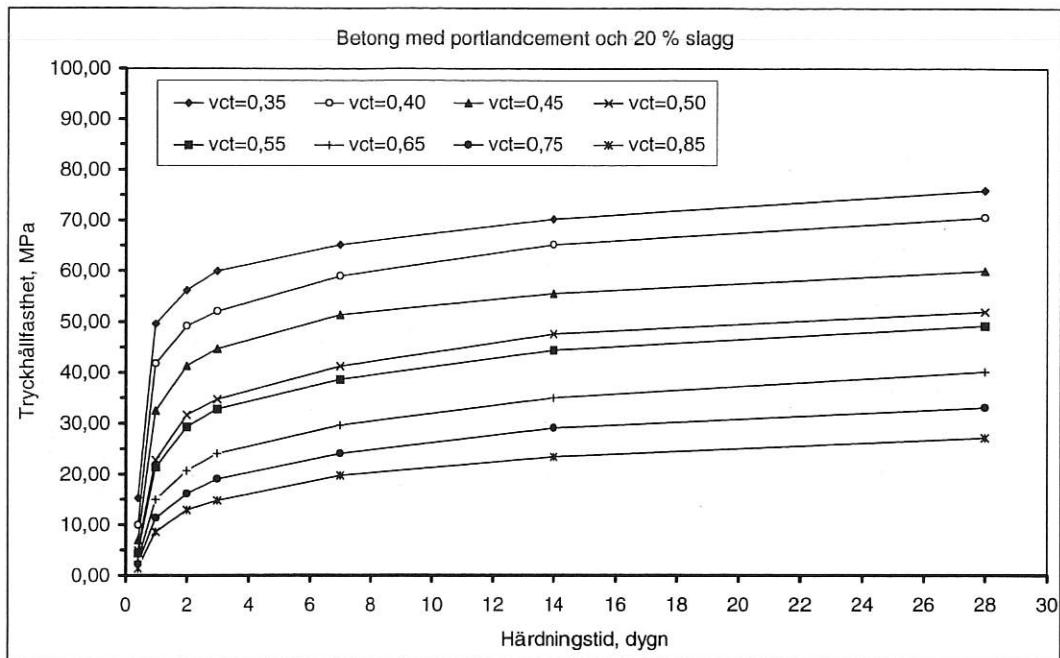
Figur 6. Tryckhållfasthet bestämd enligt svensk standard, serie VI.

4.2 Tryckhållfasthet bestämd vid olika åldrar

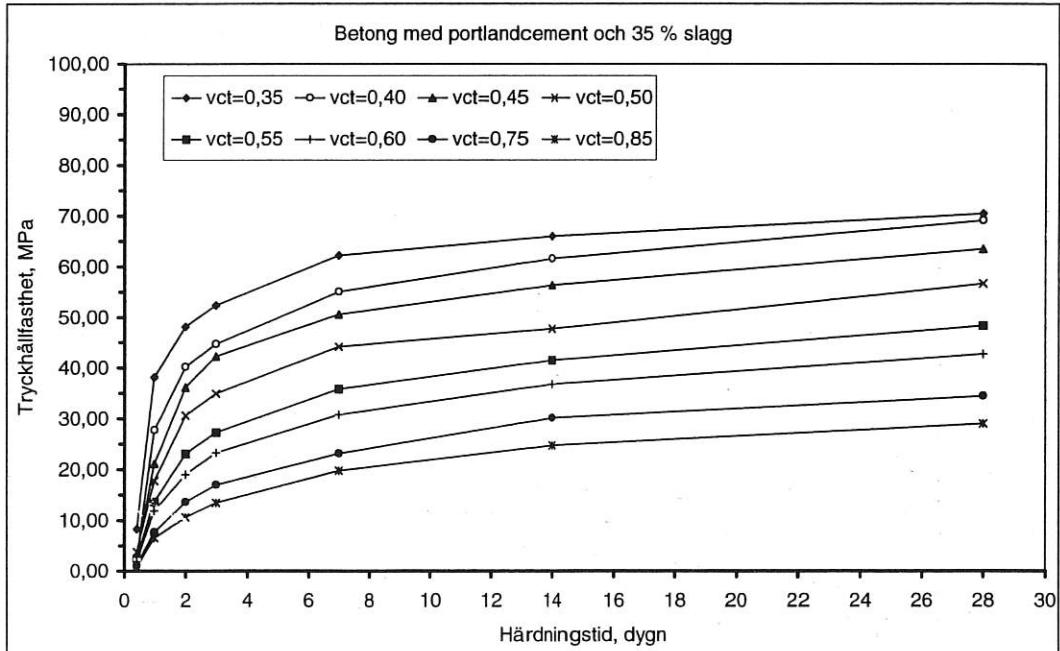
Betongernas tryckhållfasthetsutveckling för olika vct respektive ekvivalent vct som funktion av provningsålder framgår av figur 7-12. Varje datapunkt är medelvärdet av tre provkroppar. Samtliga resultat redovisas i bilaga B.



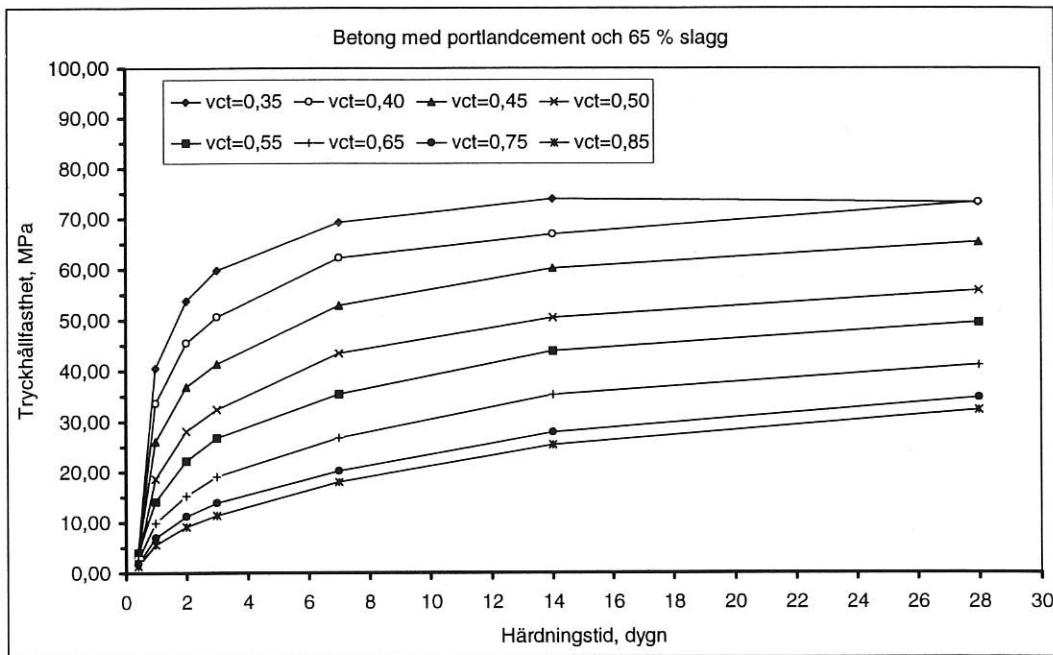
Figur 7. Tryckhållfasthetsutveckling för serie I. [2]



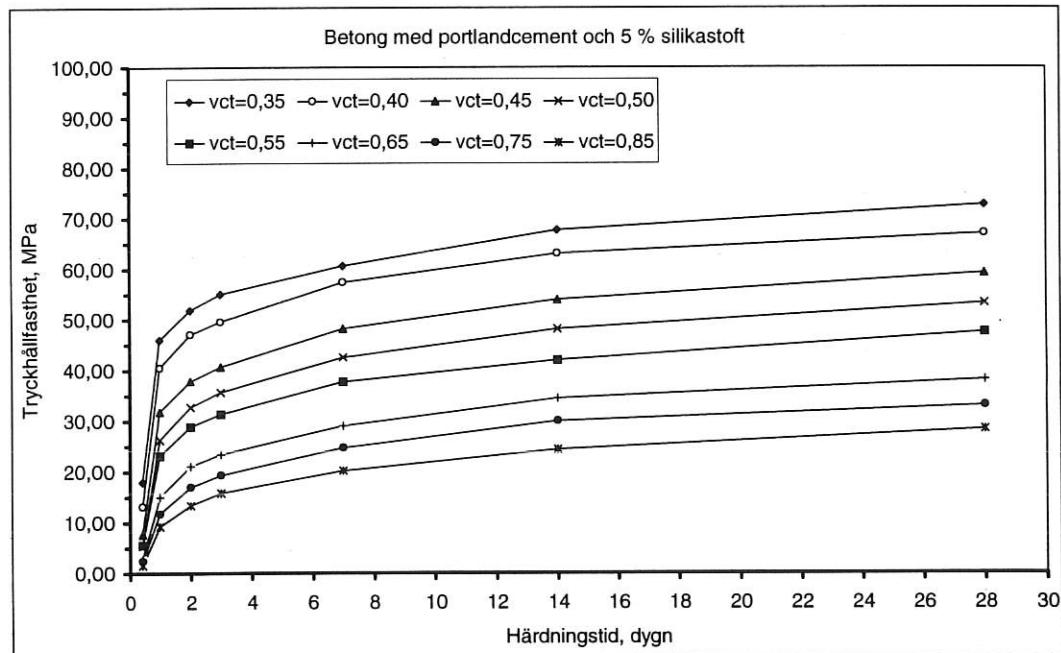
Figur 8. Tryckhållfasthetsutveckling för serie II. Angivna vct i figuren är vct_{ekv} .



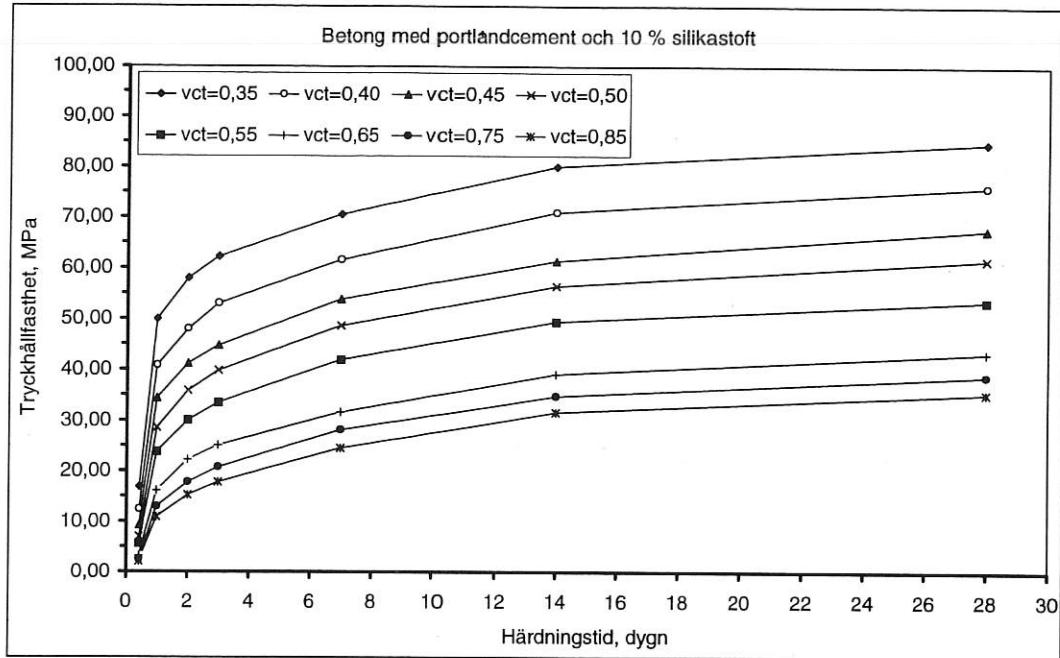
Figur 9. Tryckhållfasthetsutveckling för serie III [2]. Angivna vct i figuren är vct_{ekv} .



Figur 10. Tryckhållfasthetsutveckling för serie IV. Angivna vct i figuren är vct_{ekv}



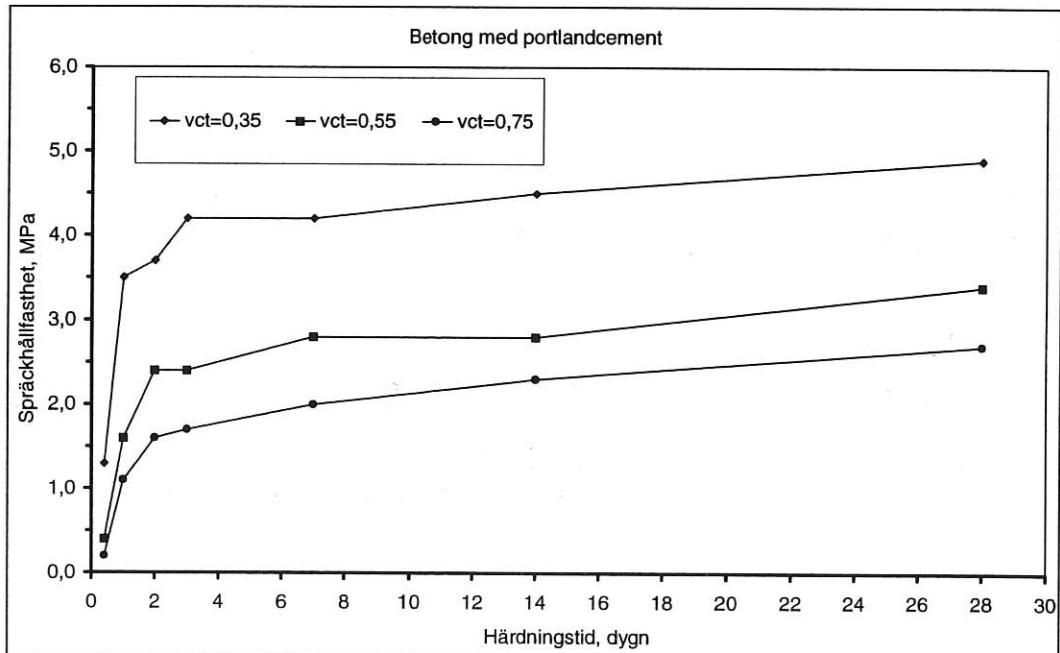
Figur 11. Tryckhållfasthetsutveckling för serie V. Angivna vct i figuren är vct_{ekv}



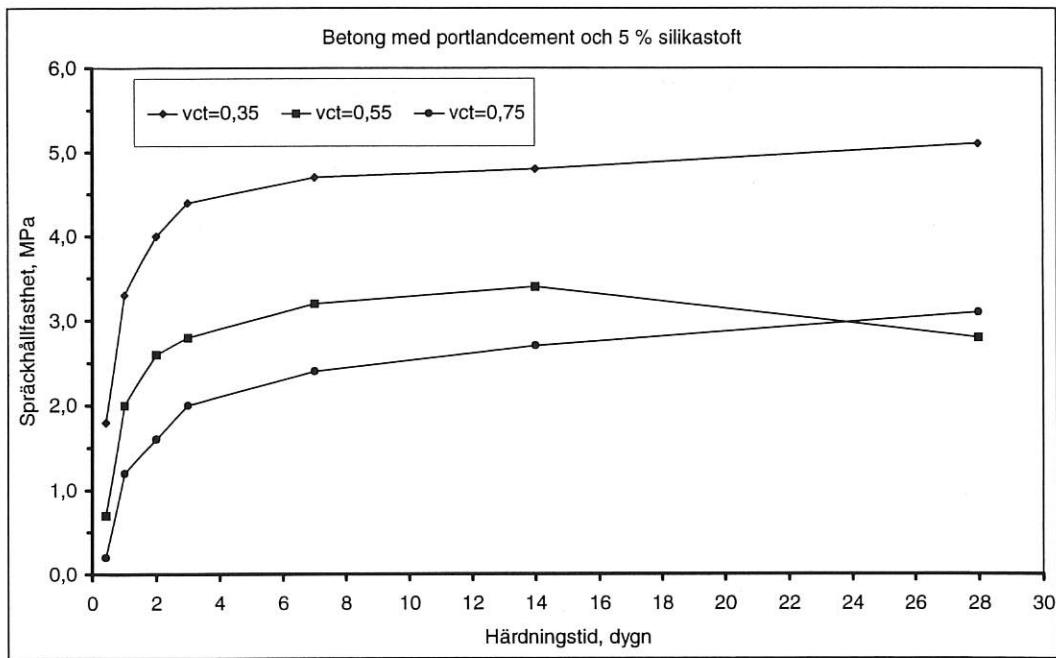
Figur 12. Tryckhållfasthetsutveckling för serie VI. Angivna vct i figuren är vct_{ekv} .

4.3 Spräckhållfasthet

Betongens spräckhållfasthetsutveckling för olika vct respektive ekvivalent vct som funktion av provningsålder framgår av figur 13-14. Varje datapunkt är medelvärdet av tre provningar. Samtliga resultat redovisas i bilaga C.



Figur 13. Spräckhållfasthetsutveckling för serie I.



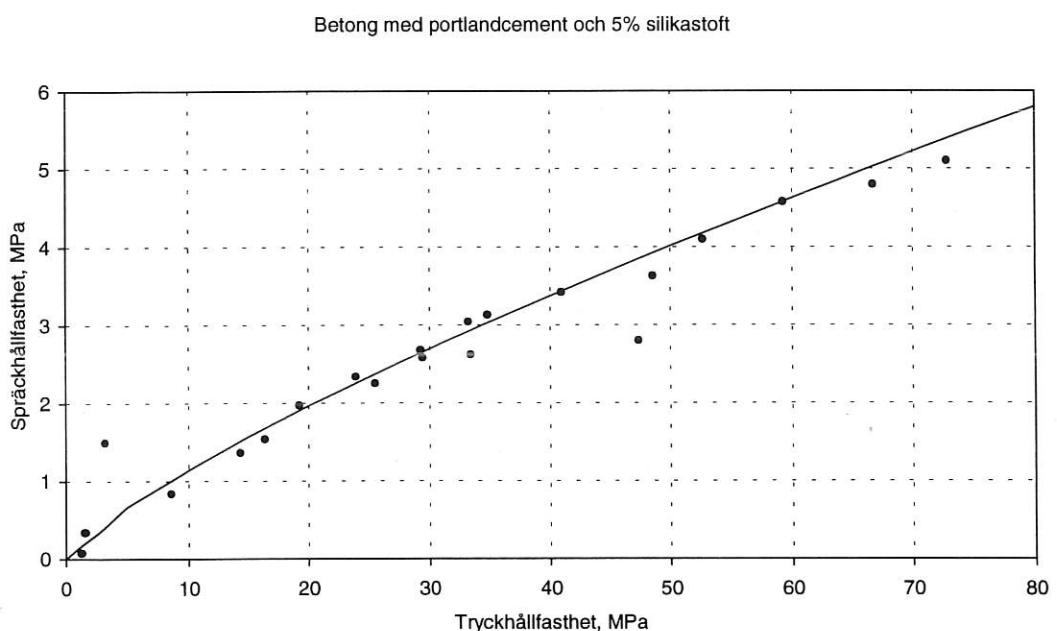
Figur 14. Spräckhållfasthetsutveckling för serie V. Angivna vct i figuren är vct_{ekv}

4.4 Samband mellan spräck- och tryckhållfasthet

Spräckhållfasthet som funktion av tryckhållfasthet för betong med portlandcement och 5 % silikastoft visas i figur 15. Varje datapunkt är medelvärdet av tre provningar. I figuren visas även en matematisk funktion som har anpassats till resultaten, vilken är följande;

$$f_{csp} = 0,19 \cdot f_c^{0,78}$$

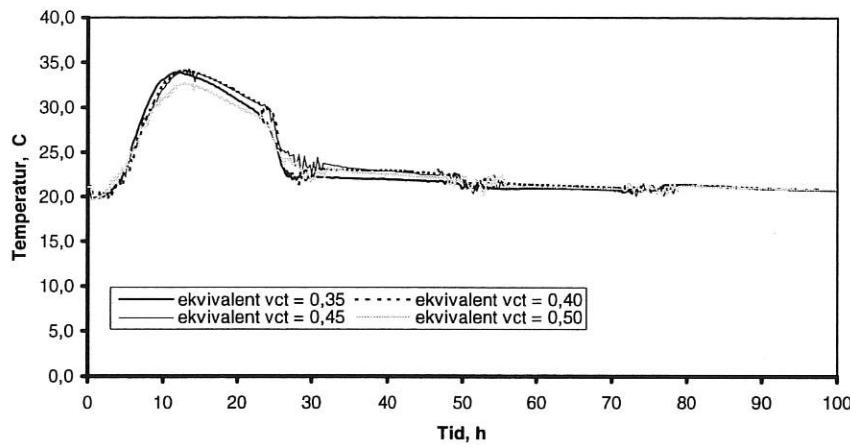
där f_{csp} är spräckhållfastheten i MPa
 f_c är tryckhållfastheten i MPa



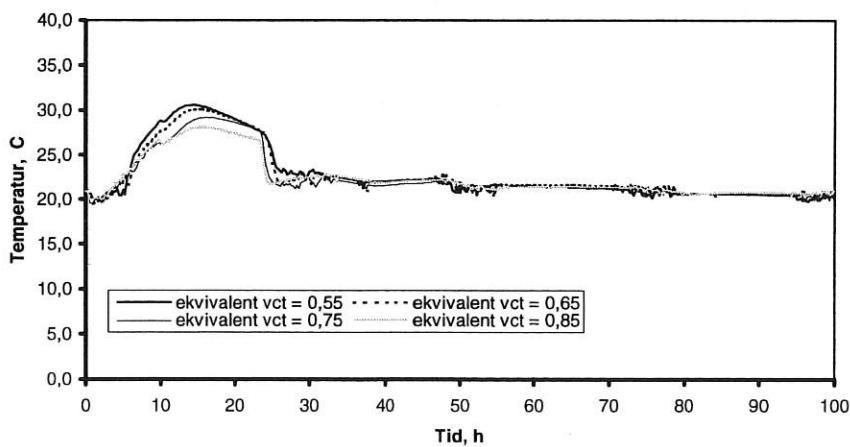
Figur 15. Samband mellan spräck- och tryckhållfasthet

4.5 Temperaturutveckling i provkroppar

Temperaturutvecklingen i betongkuber för portlandcement med 10 % silikastoft som funktion av tid från vatteninblandning visas i nedanstående figurer 16-17. Varje kurva är medelvärdet av tre temperaturmätningar. Temperaturutvecklingen för andra betongblandningar framgår av bilaga D.



Figur 16. Temperaturutveckling i provkroppar för portlandcement med 10 % silikastoft och $vct_{ekv} = 0,35, 0,40, 0,45$ och $0,50$



Figur 17. Temperaturutveckling i provkroppar för portlandcement med 10 % silikastoft och $vct_{ekv} = 0,55, 0,65, 0,75$ och $0,85$

5 Bestämning av tendenskurvor

5.1 Tryckhållfasthet som funktion av vatten-cementtal

På grund av temperaturutvecklingen blir inte mognadsåldern vid provningstillfället den samma för de olika vct respektive ekvivalenta vct för en och samma bindemedelstyp. Mognadsåldern har beräknats enligt Arreheniusfunktionen, se kapitel 2 formel 1. Dessutom är den framräknade mognadsåldern inte den som man normalt vill ha, d.v.s. jämna dygnsvärdet 1, 2, 3... dygn. Därför har tryckhållfasthetsvärdena räknats om med hjälp av icke linjär interpolering för att gälla vid 10 h, 1, 2, 3, 7, 14 och 28 dygn.

De olika betongernas tryckhållfasthet som funktion av vattencementtalet framgår av figur 18-23. I figurerna visas anpassade kurvor för varje mognadsgrad beräknad enligt ovan, vilken har beräknats enligt sambandet som finns i Betonghandbok, Material [3].

$$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{vct_{ekv}} - a \right) \quad (8)$$

där f_c = betongs tryckhållfasthet
 vct_{ekv} = ekvivalent vct
 K, a = empiriskt bestämda faktorer

Parametrarna K och a redovisas i tabell 12-14 för samtliga betongtyper med avseende på bindemedel. K och a har även beräknats för standardprovkropparna.

Tabell 12. Parametrar för beräkning av f_c enligt formel 8.

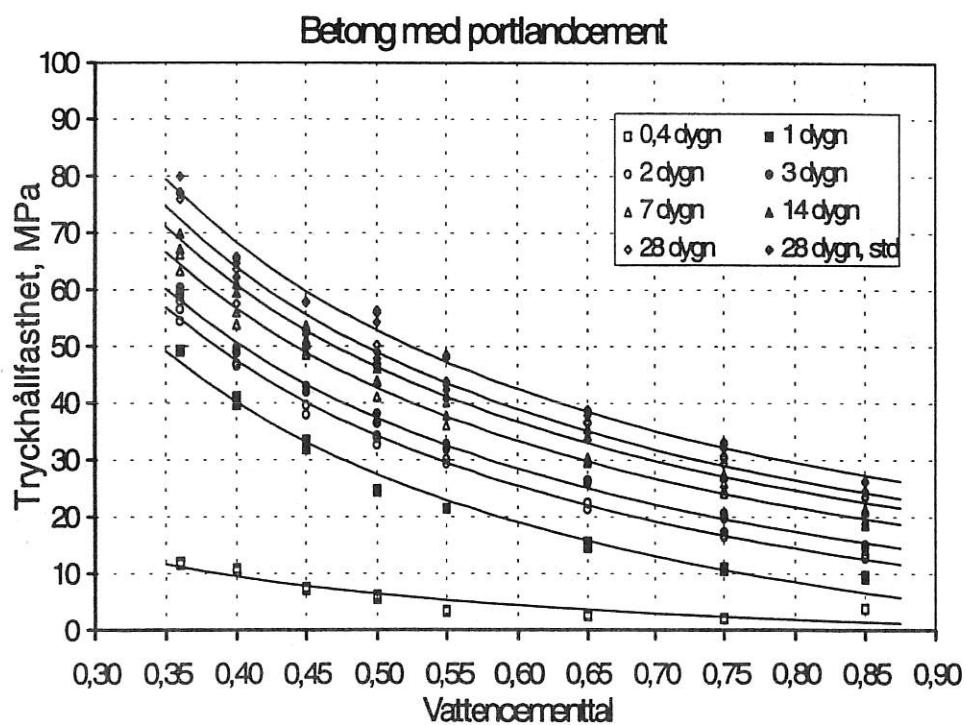
Tid		Betong med portlandcement		Betong med portlandcement och 20 % slagg	
h	dygn	K, MPa	a	K, MPa	a
10	0,4	6,065	0,941	4,34247	1,2549
24	1	25,275	0,914	14,2634	0,8276
48	2	26,382	0,703	24,4618	0,7872
72	3	26,613	0,598	26,2587	0,6908
168	7	27,940	0,474	27,769	0,5124
336	14	28,891	0,397	28,5177	0,351
672	28	29,986	0,368	29,436	0,2149
standard					
672	28	31,046	0,299	32,6249	0,2685

Tabell 13. Parametrar för beräkning av f_c enligt formel 8.

Tid		Betong med portlandcement och 35 % slagg		Betong med portlandcement och 65 % slagg	
h	dygn	K, MPa	a	K, MPa	a
10	0,4	3,306	1,059	0,59285	-0,88123
24	1	18,091	0,932	13,0097	0,9392
48	2	22,823	0,718	23,5678	0,9262
72	3	23,774	0,588	27,3401	0,8703
168	7	26,257	0,400	31,8647	0,71
336	14	25,448	0,138	31,194	0,4325
672	28	26,338	-0,036	28,2793	0,0509
standard					
672	28	29,242	0,013	35,8222	0,3327

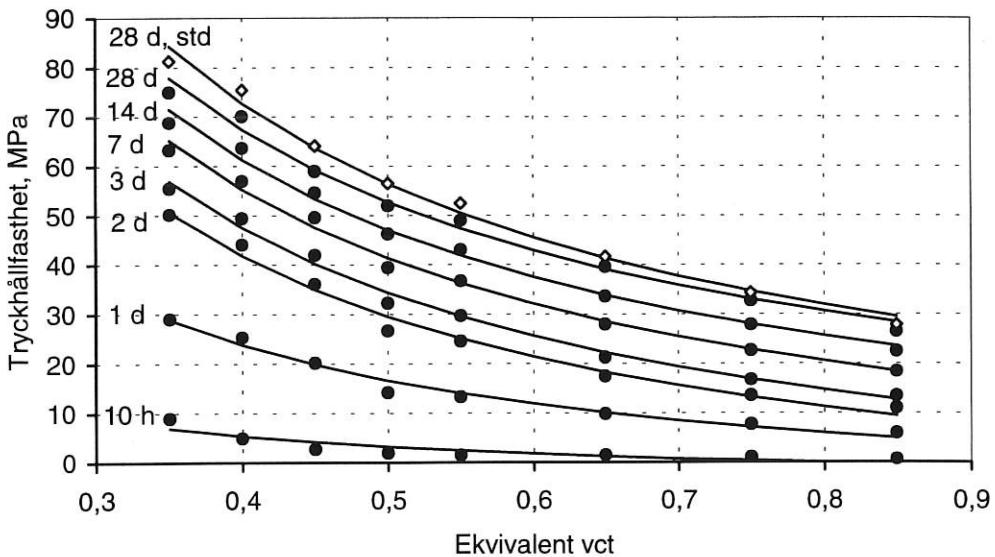
Tabell 14. Parametrar för beräkning av f_c enligt formel 8.

Tid h	dygn	Betong med portlandcement och 5 % silikastoft K, MPa	a	Betong med portlandcement och 10 % silikastoft K, MPa	a
10	0,4	2,85151	0,987463	6,12529	1,218
24	1	16,37736	0,862868	15,5713	0,7565
48	2	22,48941	0,664464	22,5274	0,6122
72	3	23,35155	0,553383	26,8962	0,6283
168	7	25,07453	0,393811	27,8895	0,3682
336	14	26,5179	0,24862	29,564	0,1774
672	28	27,52114	0,11773	30,9421	0,0655
standard					
672	28	29,1422	0,0802	33,5172	0,1022

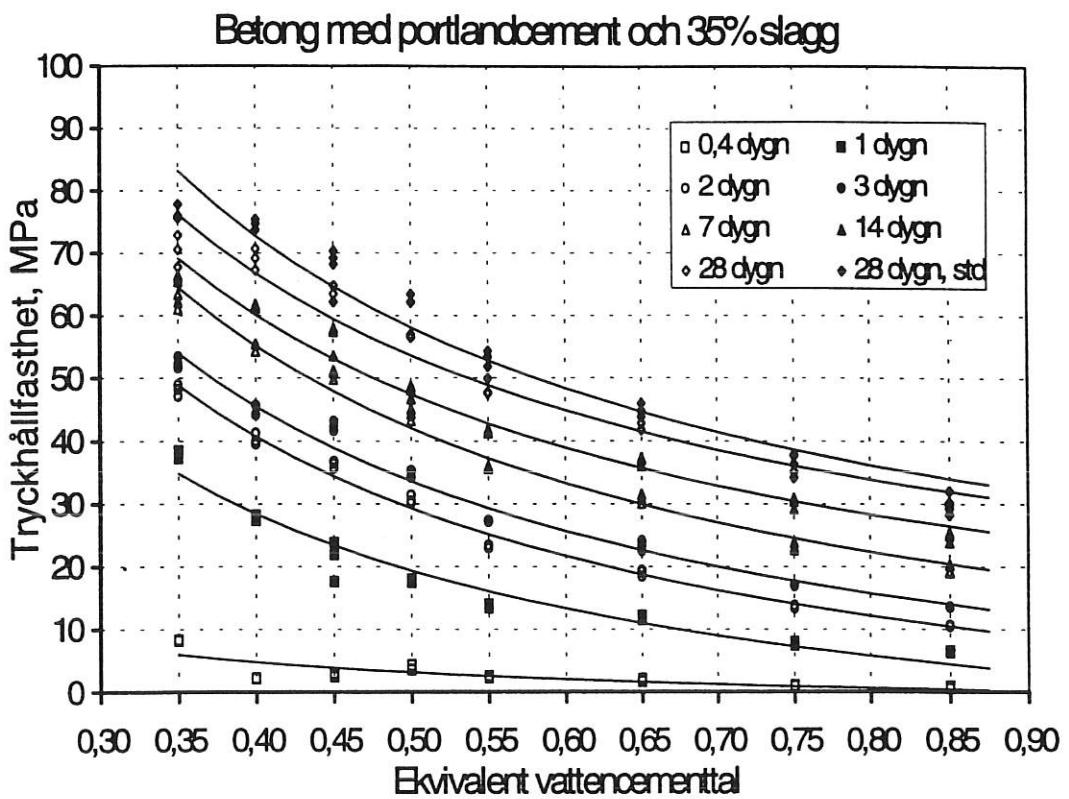


Figur 18. Samband mellan ekvivalent vattencementtal och tryckhållfasthet för portlandcement. [2]

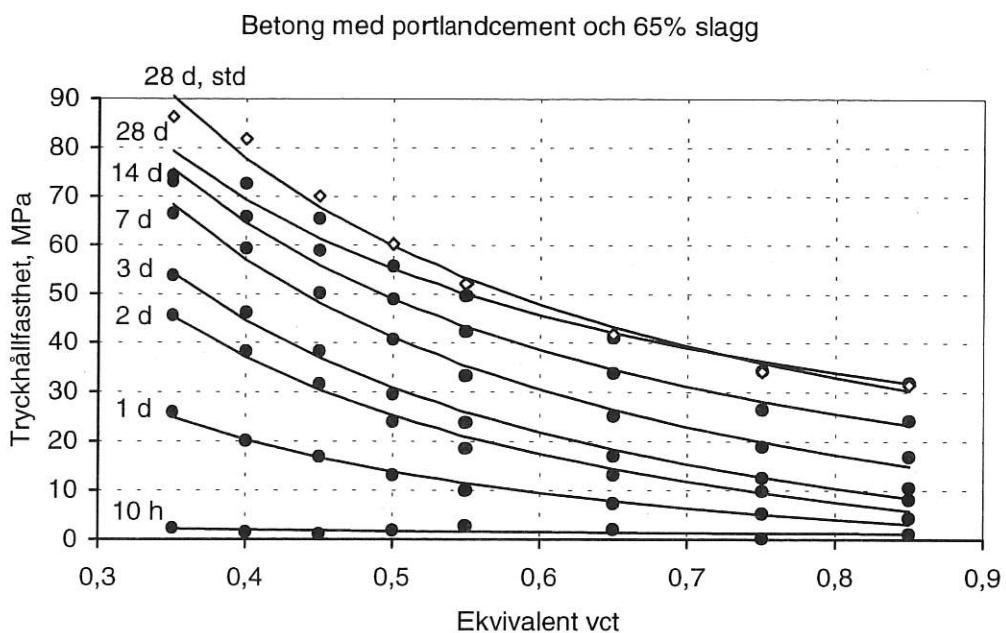
Betong med portlandcement och 20% slagg



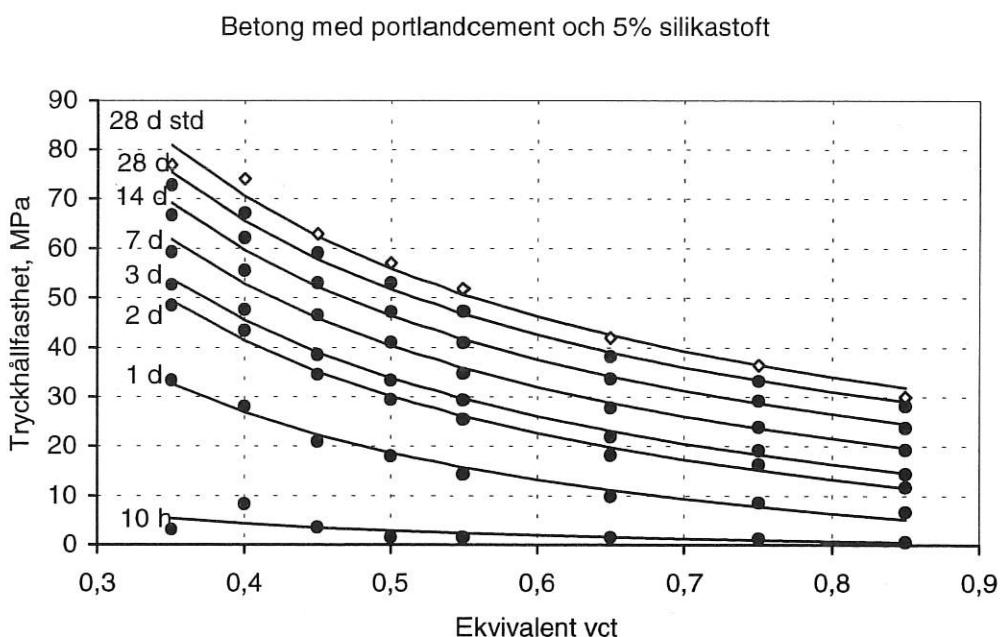
Figur 19. Samband mellan ekvivalent vattencementtal och tryckhållfasthet för portlandcement och 20 % slagg.



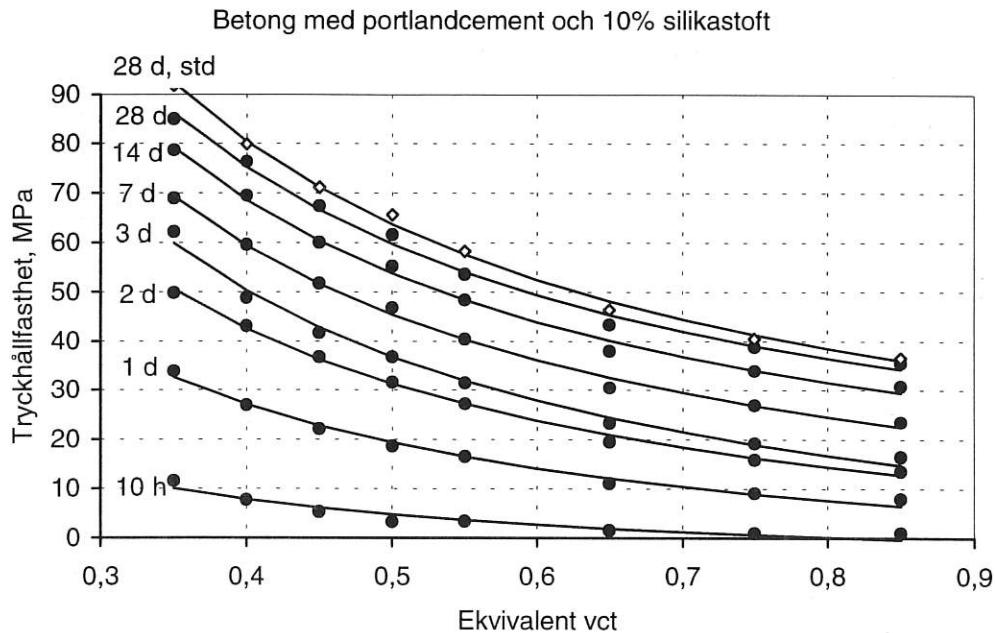
Figur 20. Samband mellan ekvivalent vattencementtal och tryckhållfasthet för portlandcement och 35 % slagg. [2]



Figur 21. Samband mellan ekvivalent vattencementtal och tryckhållfasthet för portlandcement och 65 % slagg.



Figur 22. Samband mellan ekvivalent vattencementtal och tryckhållfasthet för portlandcement och 5 % silikastoft.

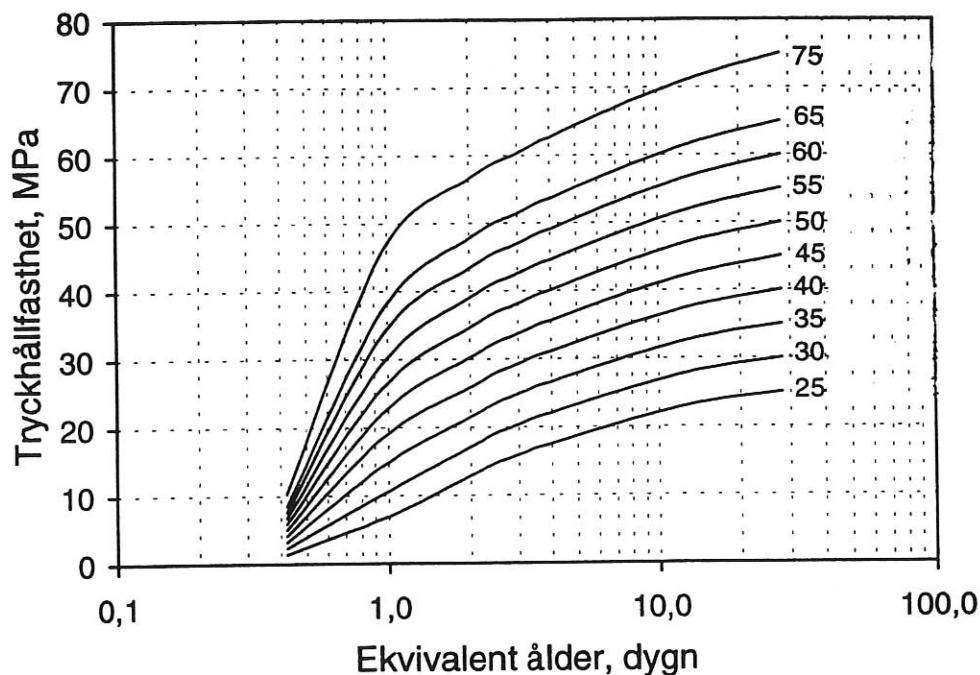


Figur 23. Samband mellan ekvivalent vattencementtal och tryckhållfasthet för portlandcement och 10 % silikastoft.

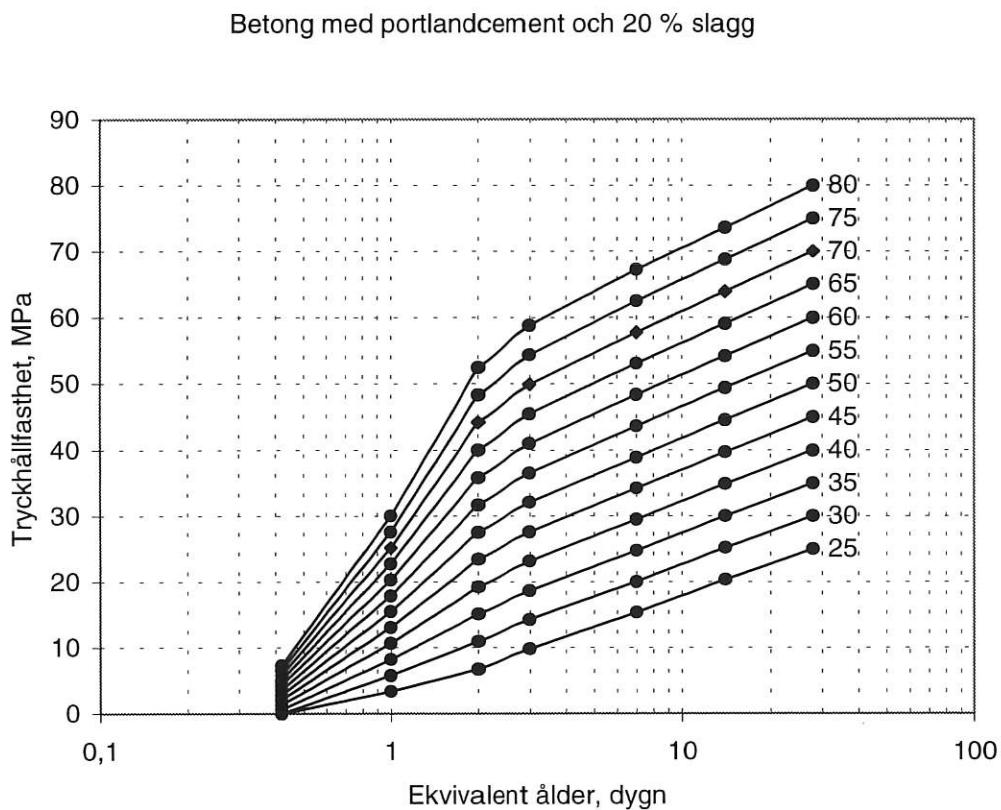
5.2 Tendenskurvor - tryckhållfasthet som funktion av mognadsgrad

Tendenskurvor, det vill säga tryckhållfastheten som funktion av den ekvivalenta åldern har beräknats för varje bindemedelstyp. Kurvorna vilka visas i figur 24-29 har beräknats enligt formel 8 och tabell 12-14. Vid varje kurva anges betongens medeltryckhållfasthet vid 28 dygn.

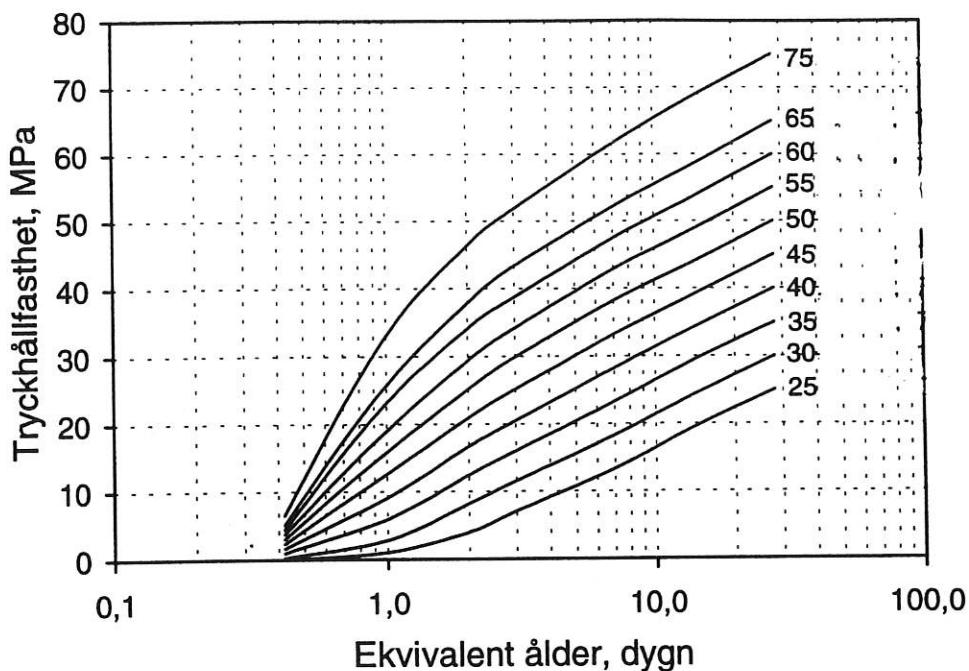
I och med att kurvorna baseras på provkroppar härdade i plastpåsar med våta fiberdukar så erhölls lägre tryckhållfasthetsvärdet än för de provkroppar som har konditionerats enligt svensk standard. Skillnaden i hållfasthetsvärdena mellan de två härdningstyperna framgår i figur 18-23 av de två översta kurvorna.



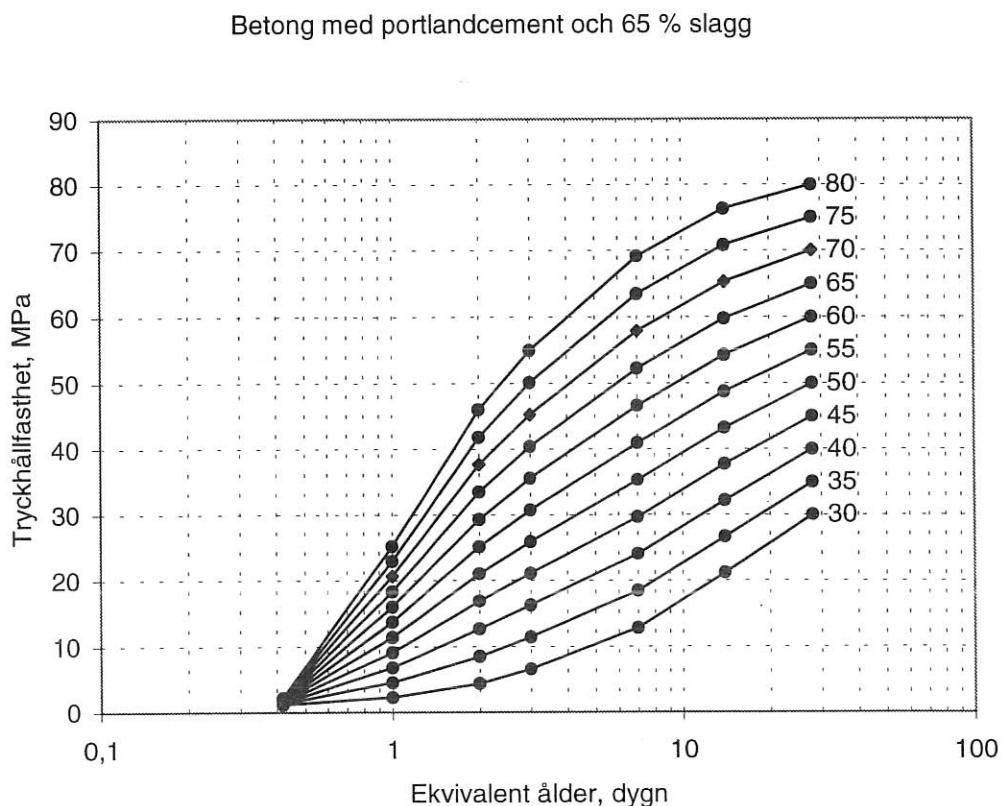
Figur 24. Tendenskurvor för betong med portlandcement. [2]



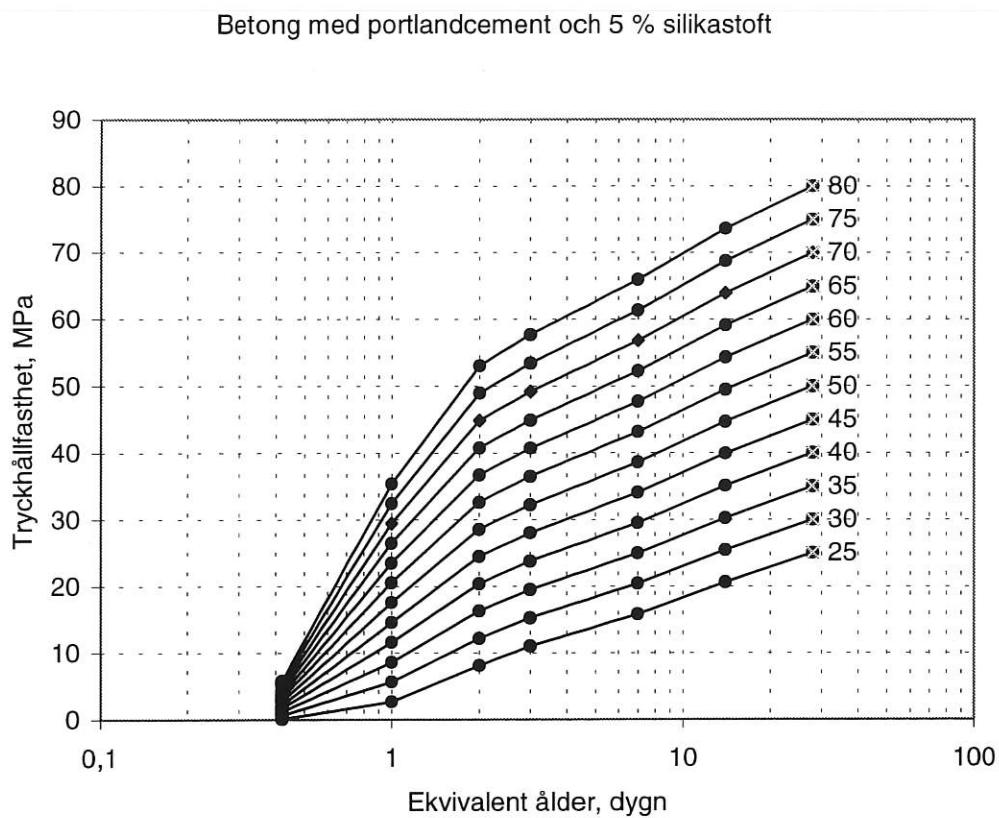
Figur 25. Tendenskurvor för betong med portlandcement och 20 % slagg.



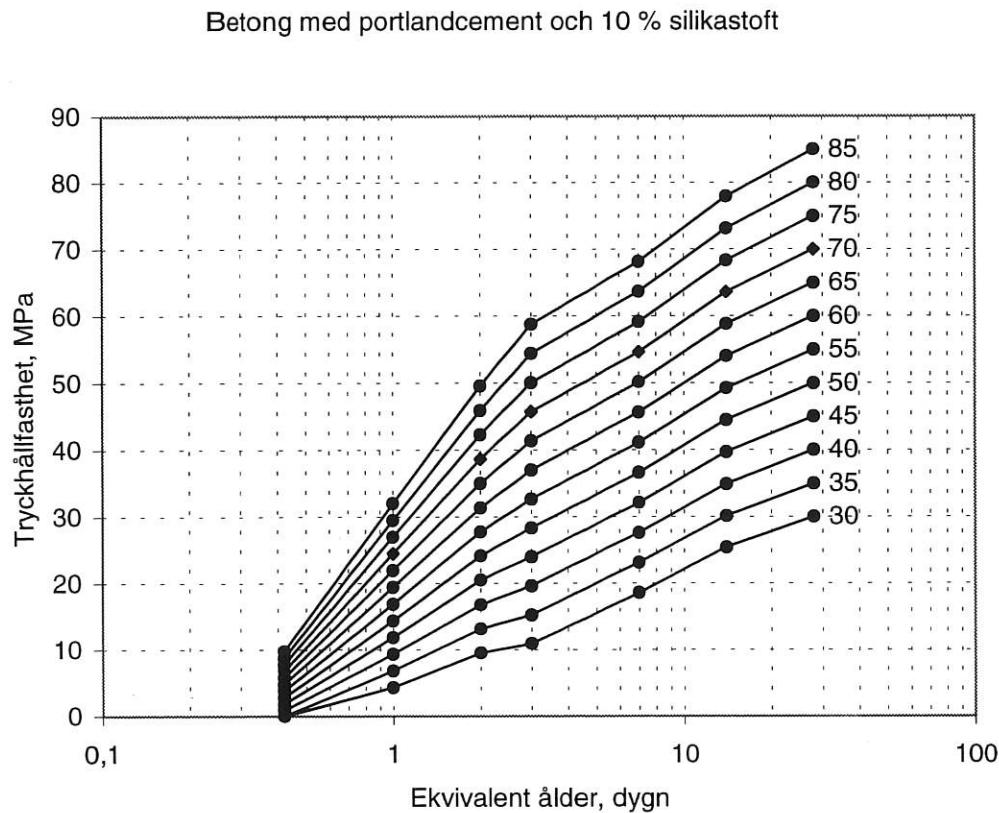
Figur 26. Tendenskurvor för betong med portlandcement och 35 % slagg. [2]



Figur 27. Tendenskurvor för betong med portlandcement och 65 % slagg.



Figur 28. Tendenskurvor för betong med portlandcement och 5 % silikastoft.



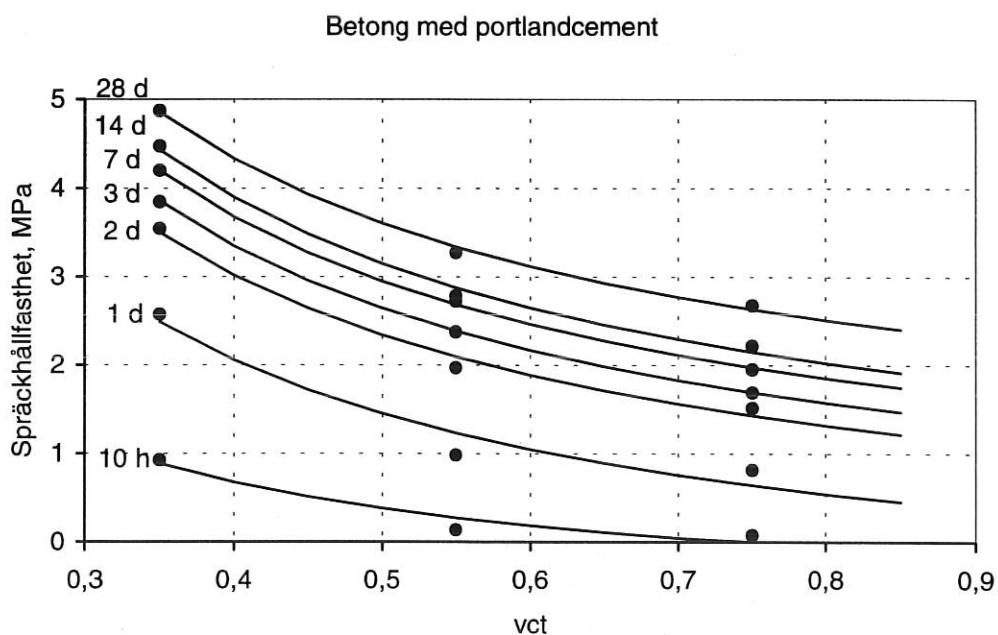
Figur 29. Tendenskurvor för betong med portlandcement och 10 % silikastoft.

5.3 Spräckhållfasthet som funktion av vatten-cementtal

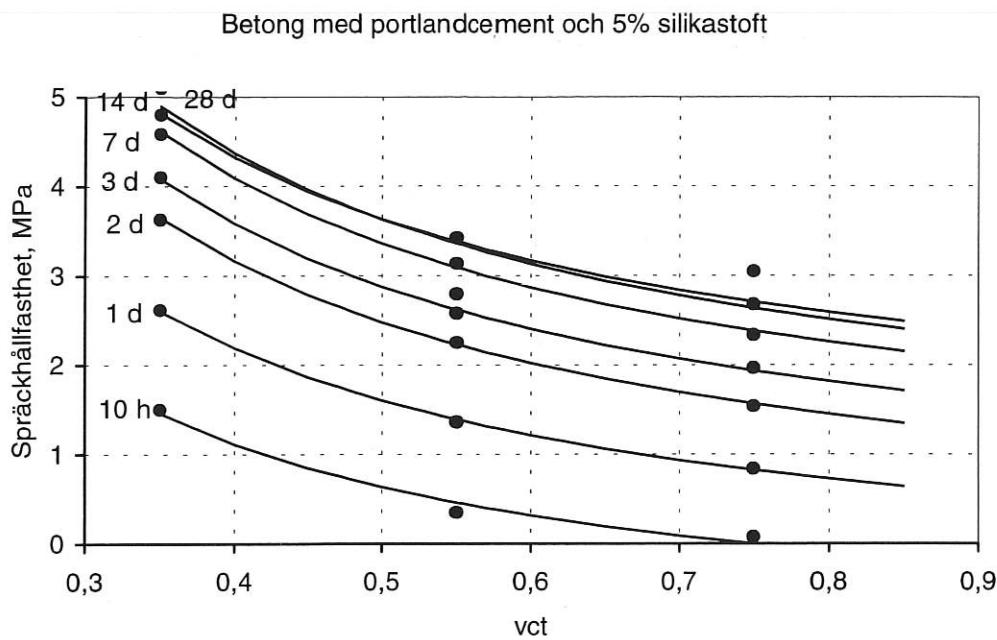
På liknande vis har de olika betongernas spräckhållfasthet som funktion av vatten-cementtalet plottats, vilket framgår av figur 30-31. Spräckhållfastheten har endast bestämts för betong med enbart portlandcement och betong med 5 % silikastoft och endast för tre olika vct_{ekv} ; 0,35, 0,55 och 0,75. I figur 30-31 visas anpassade kurvor för varje mognadsgrad, vilken har beräknats enligt formel 8. Parametrarna K och a redovisas i tabell 15 för de två betongtyperna med avseende på bindemedel.

Tabell 15. Parametrar för beräkning av f_c enligt formel 8.

Tid		Betong med portlandcement		Betong med portlandcement och 5 % silikastoft	
h	dygn	K, MPa	a	K, MPa	a
10	0,4	0,588	1,353	0,962	1,339
24	1	1,212	0,799	1,174	0,633
48	2	1,358	0,278	1,367	0,193
72	3	1,417	0,142	1,409	-0,044
168	7	1,464	-0,017	1,457	-0,297
336	14	1,505	-0,097	1,378	-0,633
672	28	1,457	-0,473	1,485	-0,455



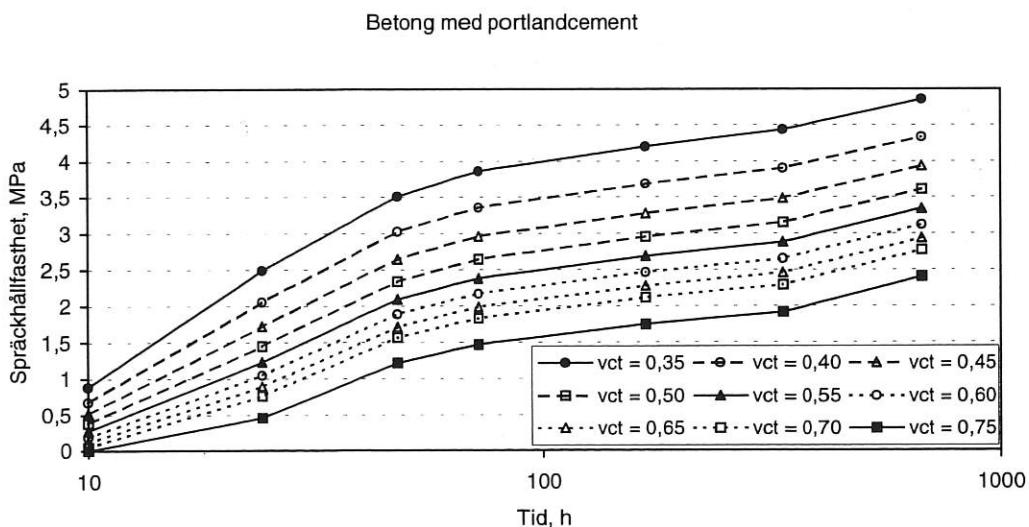
Figur 30. Samband mellan ekvivalent vattencementtal och spräckhållfasthet för portlandcement.



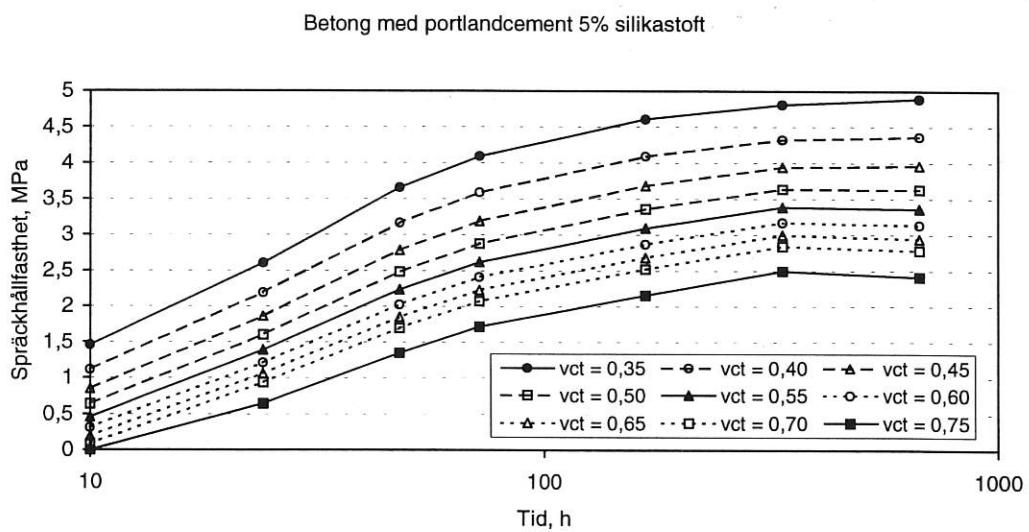
Figur 31. Samband mellan ekvivalent vattencementtal och spräckhållfasthet för portlandcement och 5 % silikastoft.

5.4 Tendenskurvor - spräckhållfasthet som funktion av mognadsgrad

Tendenskurvor, det vill säga spräckhållfastheten som funktion av den ekvivalenta åldern har beräknats för de två betongtyperna. Kurvorna vilka visas i figur 32-33 har beräknats enligt formel 8 och tabell 15. I diagrammet är de tre kurvor som motsvarar resultaten som har erhållits i projektet markerade med heldragna linjer. De streckade kurvorna är kurvor beräknade enligt formel (8). För varje kurva anges betongens vct respektive ekvivalent vct.



Figur 32. Tendenskurvor för betong med portlandcement.



Figur 33. Tendenskurvor för betong med portlandcement och 5 % silikastoft. Angivna vct är vct_{ekv} .

6 Kommentarer

I denna rapport redovisas resultat från försök där olika bindemedelstyper hållfasthetsutveckling har studerats. Följande kommentarer kan göras:

Tryckhållfasthet:

- Resultaten från härdning enligt standard SS 13 72 10 visar att betong innehållande 5 eller 10 % silikastoft ger högre 28 dygns tryckhållfasthet än betong med enbart portlandcement. (För betong med 5 % silikastoft och $vct_{ekv} = 0,35$ har betong med portlandcement ett högre värde.) Detta indikerar att det använda silikastoftets effektivitetsfaktor med avseende på tryckhållfasthet är större än den som har antagits, d.v.s. att effektivitetsfaktorn är större än ett. Den verkliga effektivitetsfaktorn har beräknats och redovisas i bilaga E.
- När det gäller betong med tillsats av slagg är tendensen den samma som för silikastoft att betong med tillsats av slagg, 20 %, 35 % eller 65 %, ger högre 28 dygns tryckhållfasthet än betong med portlandcement. Resultaten beror på att den använda slaggens effektivitetsfaktor är större än 0,6 som har antagits i projektet. Den verkliga effektivitetsfaktorn har beräknats och redovisas i bilaga E.

Spräckhållfasthet:

- Från de enstaka resultaten som har erhållits kan man se att betong med portlandcement och 5 % silikastoft har en snabbare tillväxt av spräckhållfastheten än betong med enbart portlandcement.

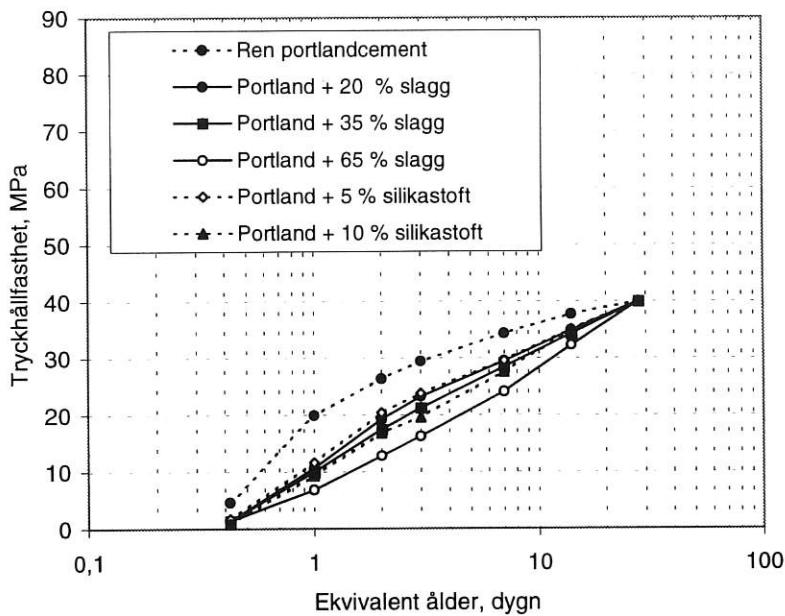
Temperaturutveckling i provkroppar:

- Under det första dygnet har provkroppar, oavsett betongtyp, en markant temperaturhöjning beroende på värmeutvecklingen från cementets reaktion med vatten. Detta är framförallt tydligt för betonger med ett lägre vct respektive vct_{ekv} .

Tendenskurvor:

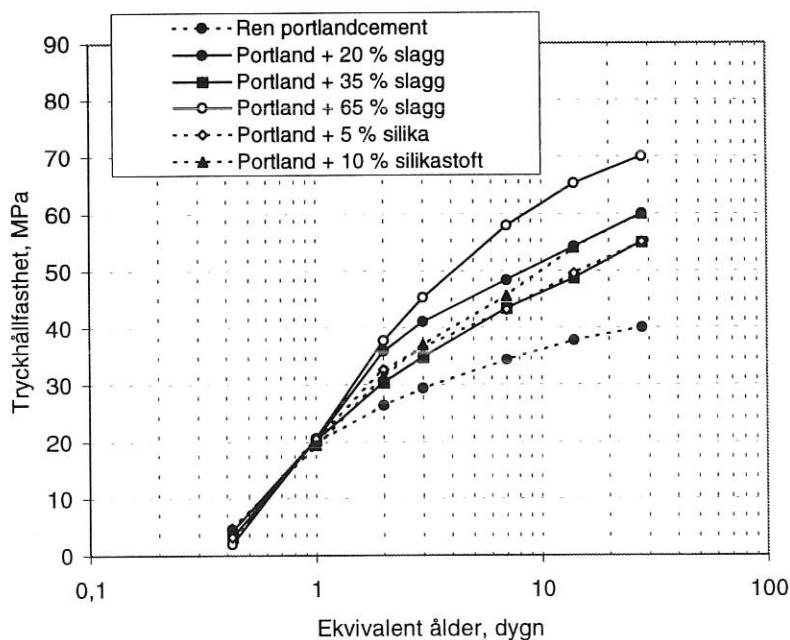
- I kapitel 5.2 redovisas erhållna tendenskurvor för de sex olika bindemedelstyperna. Som framgår av figurerna är hållfasthetsutvecklingen beroende av vilken sättning det är på bindemedlet. Ren portlandcement har en snabbare hållfasthetstillväxt under de första dygnen än portlandcement med tillsats av slagg eller silikastoft.

- I figur 34 visas tendenskurvorna för var och en de sex bindemedelstyperna när det gäller en medeltryckhållfasthet på 40 MPa vid 28 dygn. I figuren kan man se att ren portlandcement har den snabbaste hållfasthetstillväxten av de sex olika bindemedelstyperna.



Figur 34. Tendenskurvor - 40 MPa i sluthållfasthet.

- I figur 35 visas att sluthållfastheten skiljer markant mellan de olika bindemedelstyperna när man tittar på de tendenskurvor som har en hållfasthet på 20 MPa vid ett dygn.



Figur 35. Tendenskurvor - 20 MPa vid ett dygn.

Referenser

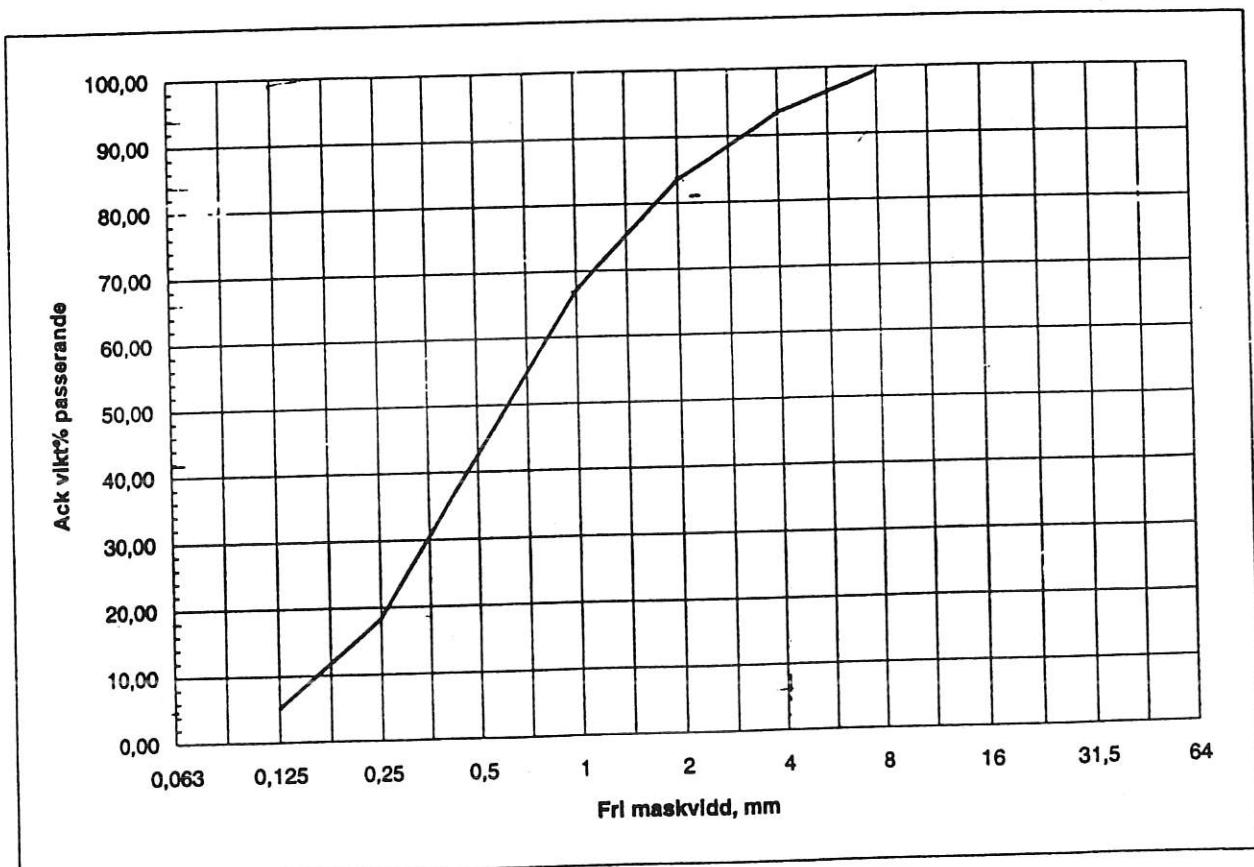
- [1] Hassanzadeh M. (1998). Säkerhet vid Betongarbete - Utveckling av bärformåga hos armerade betongkonstruktioner i tidig ålder.
- [2] Saidi K. (1998). Bestämning av tendenskurvor hos betong med olika bindemedel.
- [3] Ljungkrantz, C, Möller G, Petersons N, Betonghandbok, Material, utgåva 2, 1994.

Siktkurva för betongblandningar med portlandcement och portlandcement med 35 % slagg

Beteckning: 0-8

Kornfördelning

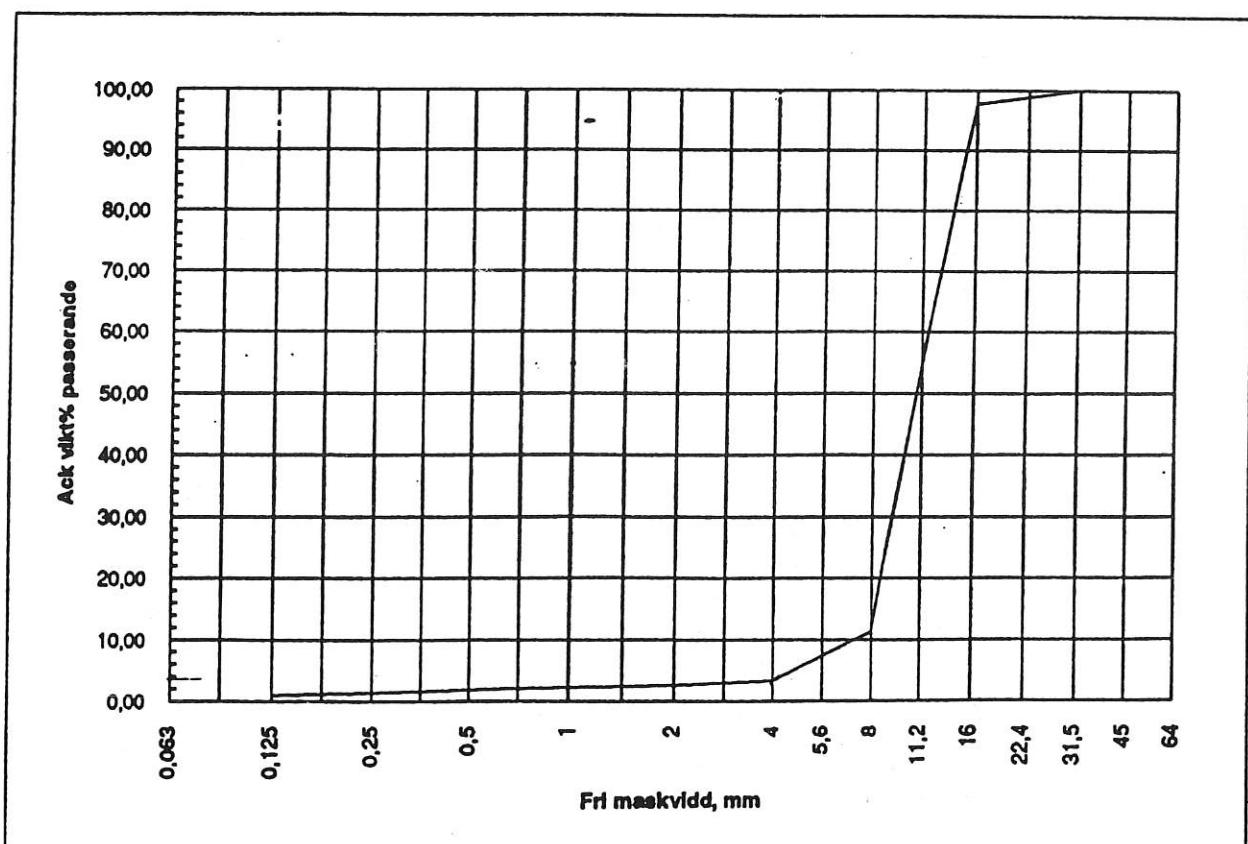
Maskvidd mm	Mängd, g		Vikt%		Ack vikt% passerande		Medelvärde
	Delprov 1	Delprov 2	Delprov 1	Delprov 2	Delprov 1	Delprov 2	
8	1,80	3,70	0,38	0,98	99,62	99,02	99,32
4	22,20	27,40	4,69	7,25	94,93	91,77	93,35
2	48,50	35,30	10,24	9,34	84,70	82,42	83,56
1	81,20	59,70	17,14	15,80	67,56	66,62	67,09
0,5	121,50	88,70	25,64	23,48	41,92	43,14	42,53
0,25	114,40	91,50	24,15	24,22	17,77	18,93	18,35
0,125	61,40	50,70	12,96	13,42	4,81	5,51	5,16
Botten	22,80	20,80	4,81	5,51	0,00	0,00	0,00
Summa:	473,80	377,80	100,00	100,00			
Invägt:	473,80	377,80					
Förlust:	0,00	0,00					



Beteckning: 8-16 RAMN

Kornfördelning

Maskvidd mm	Mängd, g		Vikt%		Ack vikt% passerande		Medelvärde
	Delprov 1	Delprov 2	Delprov 1	Delprov 2	Delprov 1	Delprov 2	
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
16	20,40	22,40	2,38	2,28	97,62	97,72	97,67
8	765,10	817,80	89,33	83,28	8,29	14,44	11,36
4	47,70	104,20	5,57	10,61	2,72	3,83	3,27
2	3,80	9,90	0,44	1,01	2,28	2,82	2,55
1	1,90	4,70	0,22	0,48	2,05	2,34	2,20
0,5	3,20	4,60	0,37	0,47	1,68	1,87	1,78
0,25	3,50	4,50	0,41	0,46	1,27	1,42	1,34
0,125	3,40	4,30	0,40	0,44	0,88	0,98	0,93
Botten	7,50	9,60	0,88	0,98	0,00	0,00	0,00
Summa:	856,50	982,00	100,00	100,00			
Invägt:							
Förlust:	-856,50	-982,00					

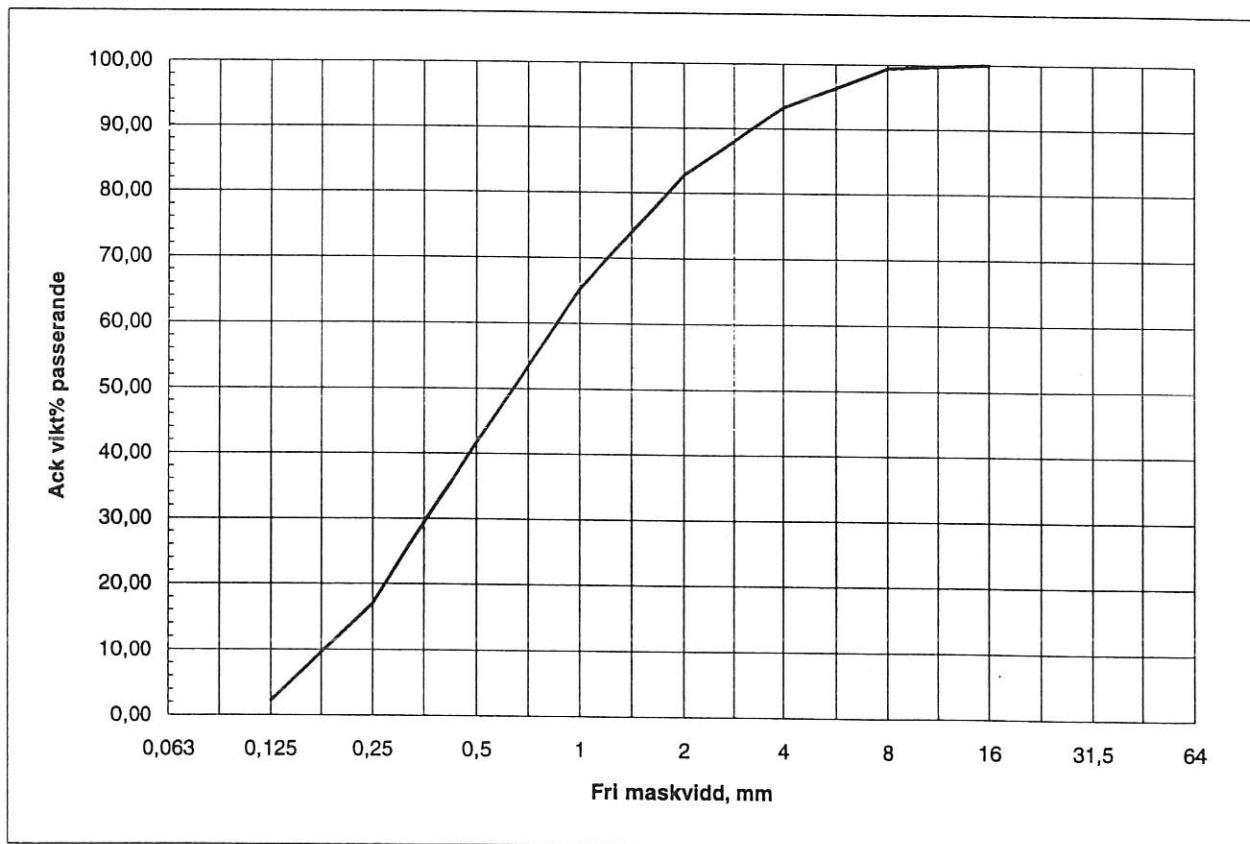


Siktkurva för portlandcement med 20 eller 65 % slagg, portlandcement med 5 eller 10 % silikastoft och ren portlandcement (spräckhållfasthet)

Beteckning: 0-8

Kornfördelning

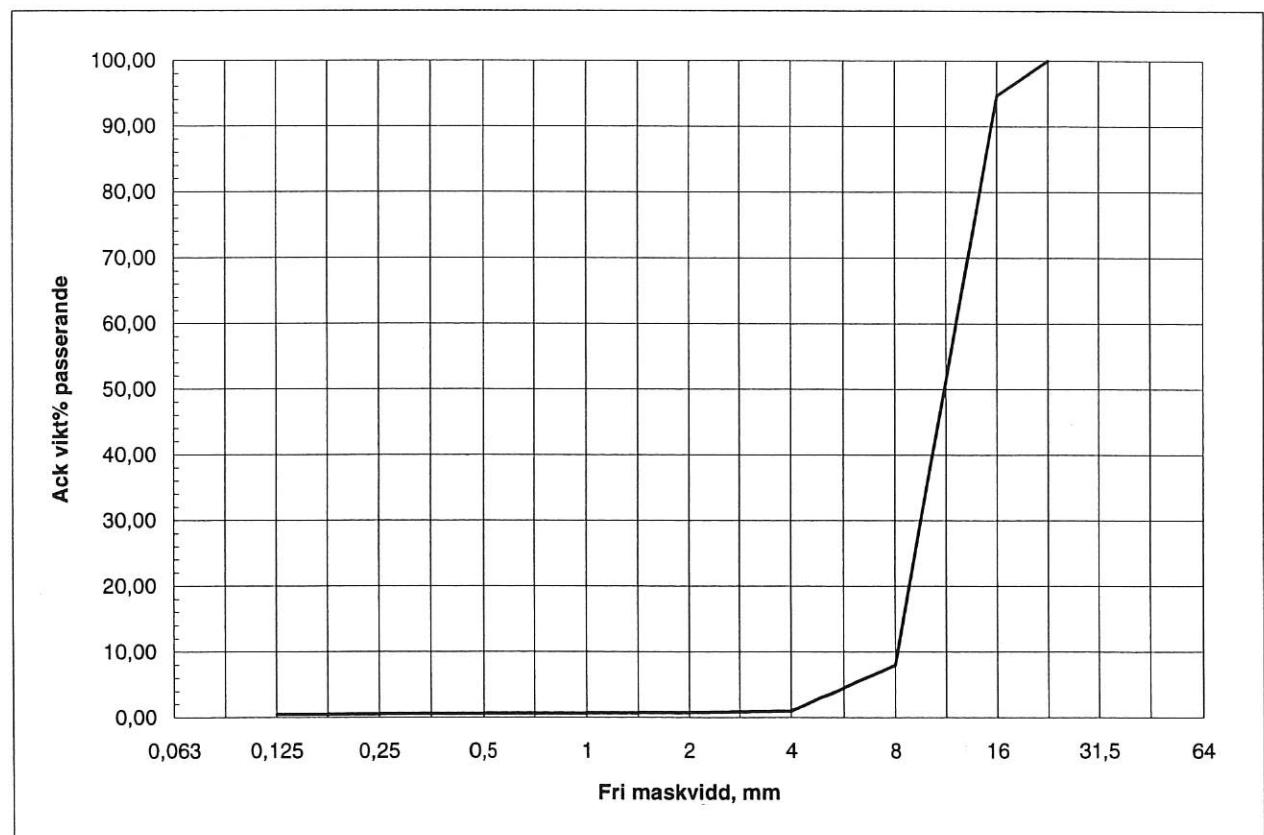
Maskvidd mm	Mängd, g		Vikt%		Ack vikt% passerande		Medelvärde
	Delprov 1	Delprov 2	Delprov 1	Delprov 2	Delprov 1	Delprov 2	
16	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
8	3,30	1,70	0,81	0,41	99,19	99,59	99,39
4	24,80	25,60	6,08	6,22	93,11	93,36	93,24
2	40,80	45,20	10,00	10,99	83,11	82,37	82,74
1	71,60	72,10	17,55	17,53	65,56	64,84	65,20
0,5	93,10	99,40	22,82	24,17	42,73	40,68	41,70
0,25	98,60	103,70	24,17	25,21	18,56	15,46	17,01
0,125	57,50	63,60	14,10	15,46	4,46	0,00	2,23
Botten	18,20		4,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Summa:	407,90	411,30	100,00	100,00			
Invägt:	407,90	411,30					
Förlust:	0,00	0,00					



Beteckning: 8-16

Kornfördelning

Maskvidd mm	Mängd, g		Vikt%		Ack vikt% passerande		Medelvärde
	Delprov 1	Delprov 2	Delprov 1	Delprov 2	Delprov 1	Delprov 2	
22,4	0,00	0	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
16	35,80	25,20	5,18	5,57	94,82	94,43	94,63
8	601,20	390,70	86,93	86,32	7,89	8,11	8,00
4	47,80	32,30	6,91	7,14	0,98	0,97	0,98
2	1,40	1,30	0,20	0,29	0,78	0,68	0,73
1	0,50	0,40	0,07	0,09	0,71	0,60	0,65
0,5	0,40	0,20	0,06	0,04	0,65	0,55	0,60
0,25	0,40	0,20	0,06	0,04	0,59	0,51	0,55
0,125	0,80	0,40	0,12	0,09	0,48	0,42	0,45
Botten	3,30	1,90	0,48	0,42	0,00	0,00	0,00
Summa:	691,60	452,60	100,00	100,00			
Invägt:							
Förlust:							



Tabell B1. Tryckhållfasthet, MPa, hos betong med portlandcement. [2]

vct		0,33 dygn	1 dygn	2 dygn	3 dygn	7 dygn	14 dygn	28 dygn	28 std* dygn
0,36	1	11,7	49,4	58,0	60,4	63,3	69,9	76,8	79,9
	2	11,6	49,1	54,4	59,7	66,2	67,1	75,9	77,1
	3	12,1	49,3	56,5	58,9	67,2	69,9	75,9	79,9
	mv	11,8	49,3	56,3	59,7	65,6	69,0	76,2	79,0
	std. av	0,3	0,2	1,8	0,8	2,0	1,6	0,5	1,6
0,40	1	10,9	39,6	46,5	49,7	53,8	59,5	63,6	65,8
	2	10,4	41,1	46,9	48,8	53,9	61,1	62,2	64,6
	3	10,4	40,2	46,6	49,0	56,0	61,0	57,5	65,4
	mv	10,6	40,3	46,7	49,2	54,6	60,5	61,1	65,3
	std. av	0,3	0,8	0,2	0,5	1,2	0,9	3,2	0,6
0,45	1	7,1	33,3	39,6	42,8	50,7	50,3	52,9	57,8
	2	7,5	33,5	39,5	41,9	48,5	51,2	52,8	57,7
	3	7,6	31,9	37,9	42,9	49,1	53,7	52,1	57,9
	mv	7,4	32,9	39,0	42,5	49,4	51,7	52,6	57,8
	std. av	0,3	0,9	0,9	0,6	1,1	1,8	0,4	0,8
0,50	1	5,5	24,8	34,2	36,4	43,7	47,6	49,0	55,9
	2	5,8	24,4	32,6	36,6	44,0	46,1	47,8	54,2
	3	6,2	24,6	33,7	38,1	41,1	47,0	50,2	56,3
	mv	5,8	24,6	33,5	37,0	42,9	46,9	49,0	55,5
	std. av	0,3	0,2	0,8	0,9	1,6	0,8	1,2	0,2
0,55	1	3,55	21,5	29,3	32,8	36,1	40,1	43,8	47,9
	2	3,46	21,4	30,0	31,8	37,8	41,3	42,3	48,5
	3	3,24	21,4	30,1	31,9	37,8	41,4	43,2	48,1
	mv	3,4	21,4	29,8	32,2	37,2	40,9	43,1	48,2
	std. av	0,6	0,2	0,4	0,6	1,0	0,7	0,8	0,3
0,65	1	2,45	14,5	21,3	26,4	29,5	34,2	36,7	38,8
	2	2,75	15,6	22,4	26,2	30,4	34,1	36,4	38,6
	3	2,50	14,6	22,5	25,8	29,9	35,4	36,5	37,8
	mv	2,6	14,9	22,1	26,1	29,9	34,6	36,5	38,4
	std. av	0,2	0,8	0,7	0,3	0,6	0,7	0,2	0,3
0,75	1	2,0	10,7	16,4	20,1	24,7	27,1	30,2	33,1
	2	2,1	10,5	16,7	19,7	25,9	27,5	30,7	32,7
	3	2,2	11,1	17,3	20,7	24,1	27,5	29,3	32,0
	mv	2,1	10,8	16,8	20,2	24,9	27,4	30,1	32,6
	std. av	0,2	0,3	0,5	0,5	0,9	0,2	0,7	0,6
0,85	1	3,8	9,7	13,4	15,0	18,8	21,5	24,5	26,3
	2	3,9	9,5	12,7	14,5	18,5	21,9	23,3	26,1
	3	3,9	9,1	12,9	15,1	19,5	21,0	23,6	26,2
	mv	3,9	9,4	13,0	14,9	18,9	21,5	23,8	26,2
	std. av	0,0	0,3	0,4	0,3	0,5	0,5	0,6	0,1

Tabell B2. Tryckhållfasthet, MPa, hos betong med portlandcement och 20 % slagg.

vbt		10 h	1 dygn	2 dygn	3 dygn	7 dygn	14 dygn	28 dygn	28 std* dygn
0,35	1	15,3	48,6	56,8	60,5	65,1	70,7	76,7	80,8
	2	15,0	50,3	56,4	60,3	65,2	69,2	74,6	81,1
	3	15,5	50,0	55,4	58,8	65,0	70,7	76	82
	mv	15,3	49,6	56,2	59,9	65,1	70,2	75,8	81,3
	std. av	0,25	0,9	0,7	0,9	0,1	0,9	1,1	0,6
0,40	1	9,2	41,3	49,7	52,7	59,1	65,0	71,6	77,0
	2	10,3	42,3	49,0	51,8	59,1	64,9	69,3	74,6
	3	10,1	41,9	48,9	51,6	58,4	65,3	70,5	74,9
	mv	9,9	41,8	49,2	52,0	58,9	65,1	70,5	75,5
	std. av	0,6	0,5	0,4	0,6	0,4	0,2	1,2	1,3
0,45	1	7,0	31,5	40,9	44,7	51,9	56,7	59,8	65,9
	2	6,9	33,7	41,5	44,4	50,2	56,0	61,0	62,5
	3	7,0	32,4	41,4	44,9	51,8	53,8	59,0	64,0
	mv	7,0	32,5	41,3	44,7	51,3	55,5	59,9	64,1
	std. av	0	1,1	0,3	0,3	1,0	1,5	1,0	1,7
0,50	1	4,8	22,2	30,8	34,2	41,3	47,1	52,3	57,1
	2	4,8	23,3	32,1	34,7	41,1	46,9	51,6	54,9
	3	5,1	22,8	32,2	35,1	41,1	48,7	51,9	57,6
	mv	4,9	22,8	31,7	34,7	41,2	47,6	51,9	56,5
	std. av	0,2	0,6	0,8	0,5	0,1	1,0	0,4	1,4
0,55	1	4,1	20,6	28,8	33,0	38,5	45,2	49,3	52,9
	2	4,5	22,0	29,0	32,5	39,1	43,8	48,1	51,4
	3	4,5	21,5	30,2	32,8	38,3	44,3	50,2	53,2
	mv	4,4	21,4	29,3	32,8	38,6	44,4	49,2	52,5
	std. av	0,2	0,7	0,8	0,3	0,4	0,7	1,1	1,0
0,65	1	2,8	14,6	20,8	23,9	30,1	34,0	39,9	42,4
	2	2,9	15,1	21,2	24,6	29,3	35,3	40,0	40,8
	3	2,8	14,9	20,1	23,7	29,5	35,5	40,5	41,9
	mv	2,8	14,9	20,7	24,1	29,6	34,9	40,1	41,7
	std. av	0	0,3	0,6	0,5	0,4	0,8	0,3	0,8
0,75	1	2,2	11,6	16,5	19,6	25,0	29,4	33,0	34,4
	2	2,3	11,4	16,2	18,9	24,2	28,6	33,0	33,8
	3	2,0	11,0	15,5	18,6	23,2	28,9	33,1	34,8
	mv	2,2	11,3	16,1	19,0	24,1	29,0	33,0	34,3
	std. av	0,2	0,3	0,5	0,5	0,9	0,4	0	0,5
0,85	1	1,4	8,3	12,8	14,8	20,6	24,0	27,5	28,7
	2	1,4	8,9	13,0	15,1	19,1	23,5	27,1	26,8
	3	1,5	8,5	12,9	14,5	19,4	22,7	26,6	28,0
	mv	1,4	8,6	12,9	14,8	19,7	23,4	27,1	27,8
	std. av	0	0,3	0,1	0,3	0,8	0,7	0,5	1,0

Tabell B3. Tryckhållfasthet, MPa, hos betong med portlandcement och 35 % slagg. [2]

vct		0,33 dygn	1 dygn	2 dygn	3 dygn	7 dygn	14 dygn	28 dygn	28 std* dygn
0,35	1	8,2	38,5	48,9	51,6	61,1	65,5	67,8	77,8
	2	8,4	38,4	47,1	52,3	62,2	66,5	70,6	75,6
	3	8,2	37,3	48,2	53,4	63,4	66,1	72,9	76,0
	mv	8,3	38,1	48,1	52,4	62,2	66,0	70,4	76,5
	std. av	0,1	0,7	0,9	0,9	1,2	0,5	2,6	0,7
0,40	1	2,2	27,4	40,0	45,7	55,5	61,2	67,3	73,7
	2	2,18	28,2	41,2	44,2	54,3	61,7	70,7	74,7
	3	2,26	27,8	39,5	44,1	55,5	61,8	69,2	75,4
	mv	2,2	27,8	40,2	44,7	55,1	61,6	69,1	74,6
	std. av	0,5	0,4	0,9	0,9	0,7	0,3	1,7	0,9
0,45	1	3,0	17,6	35,6	43,1	51,2	58,0	64,8	69,2
	2	2,8	23,8	36,4	41,6	50,9	57,5	63,5	70,3
	3	2,45	21,9	36,7	42,3	49,8	53,6	62,2	68,2
	mv	2,8	21,1	36,2	42,3	50,6	56,4	63,5	69,2
	std. av	1,2	3,2	0,6	0,8	0,7	2,4	1,3	1,1
0,50	1	3,6	17,5	30,1	35,2	45,1	48,1	57,0	62,2
	2	3,5	17,8	31,4	34,2	43,3	46,7	56,5	62,1
	3	4,3	18,0	30,4	35,3	44,3	48,7	56,6	63,4
	mv	3,8	17,8	30,6	34,9	44,2	47,8	56,7	62,6
	std. av	0,5	0,3	0,7	0,6	0,9	1,0	0,7	0,7
0,55	1	2,24	13,8	23,0	27,1	36,0	41,3	47,7	54,3
	2	2,28	13,4	23,4	27,4	35,8	41,4	49,9	51,8
	3	2,6	14,0	22,9	27,4	35,6	41,9	47,5	53,4
	mv	2,4	13,7	23,1	27,3	35,8	41,5	48,4	53,2
	std. av	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	1,3	1,3
0,65	1	2,1	11,5	19,1	22,48	31,5	36,0	42,8	44,7
	2	1,9	12,2	18,4	23,33	30,9	37,0	43,8	44,8
	3	1,7	11,9	19,4	24,04	30,1	37,3	41,7	45,9
	mv	1,9	11,9	19,0	23,3	30,8	36,8	42,8	45,1
	std. av	0,3	0,2	0,4	0,6	0,7	0,7	1,1	0,7
0,75	1	0,98	8,0	13,8	16,9	22,7	30,4	35,1	36,3
	2	0,97	7,7	13,8	17,1	23,9	30,9	34,1	37,6
	3	1,06	7,5	13,3	16,9	23,1	29,2	34,2	37,8
	mv	1,0	7,7	13,6	17,0	23,2	30,2	34,5	37,2
	std. av	0,6	0,3	0,3	0,1	0,5	0,9	0,6	0,8
0,85	1	0,55	6,5	10,6	13,6	19,1	23,9	28,2	30,2
	2	0,74	6,6	10,4	13,5	19,3	25,4	29,8	32,0
	3	0,92	6,3	10,7	13,5	20,3	25,0	29,2	28,3
	mv	0,7	6,5	10,6	13,5	19,8	24,8	29,1	30,2
	std. av	0,7	0,2	0,2	0,0	0,6	0,8	0,8	1,9

Tabell B4. Tryckhållfasthet, MPa, hos betong med portlandcement och 65 % slagg.

vbt		10 h * 12 h	1 dygn	2 dygn	3 dygn	7 dygn	14 dygn	28 dygn	28 std* dygn
0,35	1	4,3	39,5	53,8	60,2	69,3	73,9	79,1	86,2
	2	4,3	42,2	54,9	58,0	69,9	75,0	63,4	84,0
	3	4,2	39,9	52,8	61,1	68,8	73,2	77,5	88,7
	mv	4,3	40,5	53,8	59,8	69,3	74,0	73,3	86,3
	std. av	0	1,5	1,1	1,6	0,6	0,9	8,6	2,4
0,40	1	3,1	32,8	45,4	50,7	62,5	66,8	74,5	80,7
	2	3,0	35,0	45,5	49,4	62,9	66,6	73,5	80,9
	3	3,1	33,1	45,5	51,6	61,4	67,5	72,1	83,7
	mv	3,1	33,6	45,5	50,6	62,3	67,0	73,4	81,8
	std. av	0	1,2	0	1,1	0,8	0,5	1,2	1,7
0,45	1	3,6	24,8	36,9	41,9	52,6	59,8	64,1	71,5
	2	3,6	27,2	36,7	41,3	53,3	60,5	64,6	68,7
	3	3,8	26,3	37,1	40,7	52,7	60,7	67,9	70,1
	mv	3,7	26,1	36,9	41,3	52,9	60,3	65,5	70,1
	std. av	0,1	1,2	0,2	0,6	0,4	0,5	2,1	1,4
0,50	1	2,8	18,0	27,4	32,1	43,5	51,1	57,1	61,1
	2	2,8	19,1	28,8	32,6	43,1	50,2	57,0	58,7
	3	2,9	19,0	28,1	32,4	43,6	50,3	53,5	61,0
	mv	2,8	18,7	28,1	32,4	43,4	50,5	55,9	60,3
	std. av	0	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	2,1	1,4
0,55	1	3,9*	14,2	22,6	26,5	36,2	44,1	49,9	51,9
	2	4,0*	14,6	22,5	27,3	35,6	43,5	49,0	50,4
	3	4,0*	13,9	21,6	26,7	34,3	44,2	49,9	54,1
	mv	4,0*	14,2	22,2	26,8	35,4	43,9	49,6	52,1
	std. av	0	0,4	0,6	0,4	1,0	0,4	0,5	1,9
0,65	1	2,5*	9,9	15,2	19,1	26,6	35,5	41,0	41,6
	2	2,7*	10,2	15,4	18,8	27,3	35,1	40,8	42,0
	3	2,5*	9,5	15,3	19,4	26,6	35,4	41,5	41,6
	mv	2,6*	9,9	15,3	19,1	26,8	35,3	41,1	41,7
	std. av	0,1	0,4	0,1	0,3	0,4	0,2	0,4	0,2
0,75	1	1,9*	6,8	11,2	13,9	20,4	28,4	34,6	35,9
	2	1,8*	7,2	11,1	14,0	20,3	28,0	35,4	33,2
	3	1,8*	7,1	11,2	13,7	19,9	27,4	34,1	33,4
	mv	1,8*	7,0	11,2	13,9	20,2	27,9	34,7	34,2
	std. av	0,1	0,2	0	0,2	0,3	0,5	0,7	1,5
0,85	1	1,3*	5,5	9,2	11,3	18,1	25,1	32,6	32,0
	2	1,4*	5,6	9,3	11,4	18,4	25,6	32,7	31,2
	3	1,4*	5,6	9,2	11,5	17,6	25,5	31,7	31,3
	mv	1,4*	5,6	9,2	11,4	18,0	25,4	32,3	31,5
	std. av	0,1	0	0	0,1	0,4	0,3	0,6	0,4

Tabell B5. Tryckhållfasthet, MPa, hos betong med portlandcement och 5 % silikastoft.

vbt		10 h	1 dygn	2 dygn	3 dygn	7 dygn	14 dygn	28 dygn	28 std* dygn
0,35	1	18,5	46,1	52,4	55,4	60,5	68,1	72,5	79,3
	2	18,8	45,6	52,9	55,4	61,7	69,3	73,8	78,4
	3	16,8	46,2	50,4	54,4	59,8	66,1	71,8	73,0
	mv	18,0	46,0	51,9	55,1	60,7	67,8	72,7	76,9
	std. av	1,1	0,3	1,3	0,6	1,0	1,6	1,0	3,4
0,40	1	13,7	41,0	47,1	50,2	57,4	64,3	67,6	74,0
	2	13,5	40,8	46,9	49,6	57,4	62,3	64,5	71,7
	3	12,3	39,6	47,3	48,9	57,3	62,6	69,2	76,4
	mv	13,2	40,5	47,1	49,6	57,4	63,1	67,1	74,0
	std. av	0,8	0,8	0,2	0,7	0	1,1	2,4	2,4
0,45	1	8,3	31,6	38,5	41,5	49,0	54,7	59,0	62,6
	2	7,6	32,3	37,4	40,2	47,5	52,8	59,0	62,0
	3	7,5	31,7	37,9	40,5	48,0	54,6	59,9	64,2
	mv	7,8	31,9	37,9	40,7	48,2	54,0	59,3	62,9
	std. av	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	1,1	0,5	1,1
0,50	1	5,5	25,7	33,3	35,5	42,4	48,8	52,6	58,6
	2	5,7	26,8	32,5	35,6	42,8	47,6	53,4	55,3
	3	5,4	26,3	32,7	36,0	42,7	47,9	54,0	57,4
	mv	5,5	26,3	32,8	35,7	42,6	48,1	53,3	57,1
	std. av	0,1	0,6	0,4	0,3	0,2	0,6	0,7	1,7
0,55	1	5,4	22,2	29,3	31,1	38,2	41,8	47,2	51,4
	2	5,5	22,8	27,9	31,7	37,7	41,7	47,8	52,0
	3	5,9	24,5	29,5	31,4	37,4	42,4	47,9	52,4
	mv	5,6	23,2	28,9	31,4	37,8	42,0	47,6	51,9
	std. av	0,3	1,2	0,9	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5
0,65	1	2,8	14,8	21,3	23,7	29,8	35,2	37,7	42,4
	2	2,9	15,6	21,3	23,3	29,0	33,7	38,0	41,6
	3	2,8	15,0	20,8	23,1	28,2	34,6	38,8	42,0
	mv	2,8	15,1	21,1	23,4	29,0	34,5	38,2	42,0
	std. av	0,1	0,4	0,3	0,3	0,8	0,8	0,6	0,4
0,75	1	2,4	11,8	17,3	19,6	24,7	31,4	33,2	36,1
	2	2,5	11,7	16,8	19,1	24,7	29,5	33,4	36,7
	3	2,4	12,0	16,8	19,5	24,8	29,2	32,8	36,6
	mv	2,4	11,8	17,0	19,4	24,7	30,0	33,1	36,5
	std. av	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	1,2	0,3	0,3
0,85	1	1,7	9,1	13,3	16,0	20,6	25,0	28,6	30,4
	2	1,5	9,2	13,3	15,9	20,0	24,0	28,3	30,2
	3	1,7	9,5	13,5	15,5	20,0	24,1	28,3	29,6
	mv	1,6	9,3	13,4	15,8	20,2	24,4	28,4	30,1
	std. av	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,6	0,2	0,4

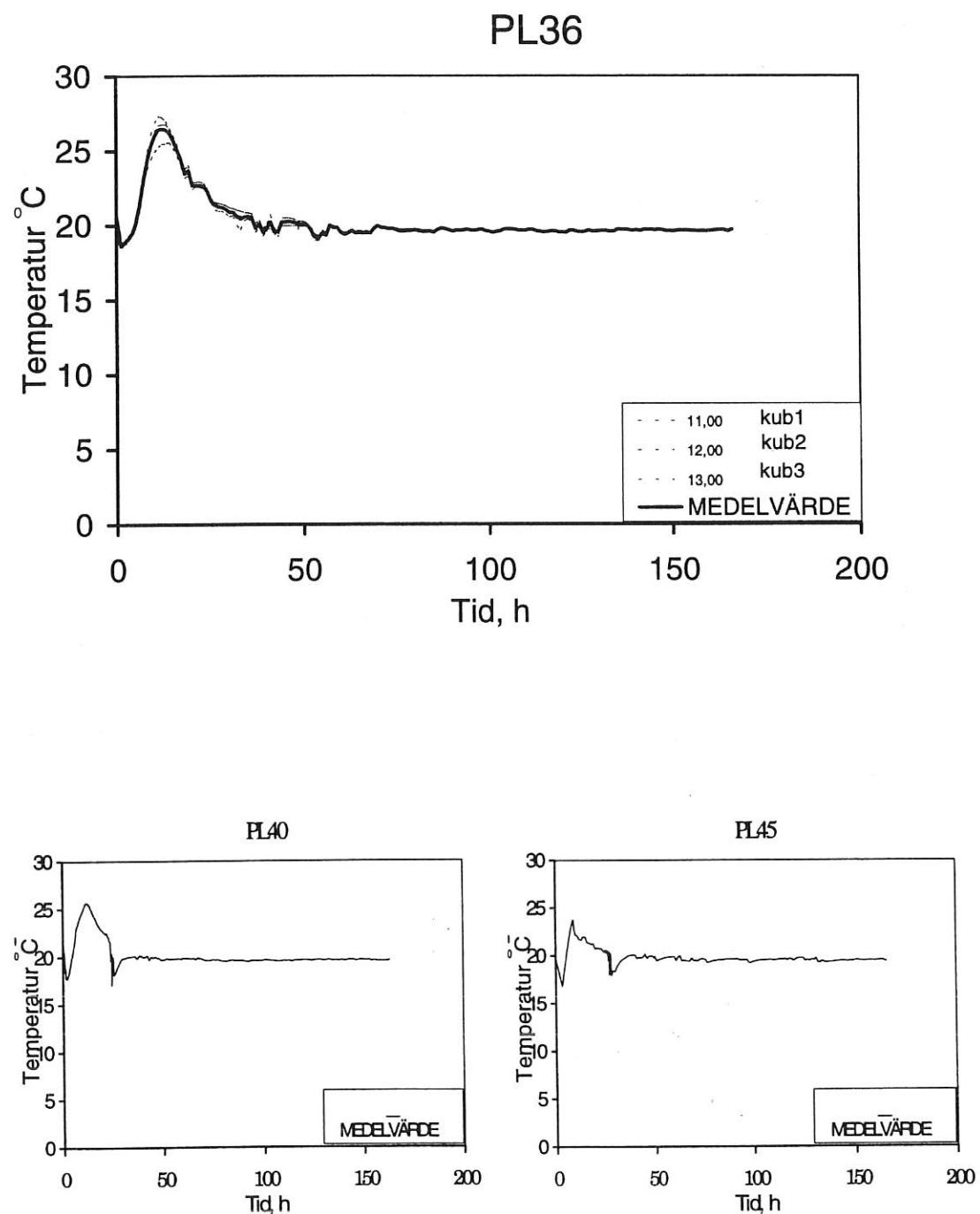
Tabell B6. Tryckhållfasthet, MPa, hos betong med portlandcement och 10 % silikastoft.

vbt		10 h	1 dygn	2 dygn	3 dygn	7 dygn	14 dygn	28 dygn	28 std* dygn
0,35	1	17,2	49,5	57,5	62,9	72,1	80,8	83,6	90,6
	2	17,2	50,5	59,4	62,9	70,8	77,9	84,5	91,2
	3	16,4	49,6	57,0	60,7	68,6	81,2	86,0	93,7
	mv	16,9	49,9	58,0	62,2	70,5	80,0	84,7	91,8
	std. av	0,5	0,6	1,3	1,3	1,8	1,8	1,2	1,6
0,40	1	12,3	40,0	48,5	53,3	62,4	70,7	75,4	79,2
	2	12,4	41,7	48,0	53,0	61,7	69,6	75,5	78,3
	3	12,4	40,8	47,4	52,8	60,7	72,4	77,0	82,2
	mv	12,4	40,8	48,0	53,0	61,6	70,9	76,0	79,9
	std. av	0,1	0,9	0,6	0,3	0,9	1,4	0,9	2,0
0,45	1	9,0	33,7	41,1	45,2	54,0	61,5	66,1	71,6
	2	9,5	35,7	41,4	44,7	53,8	58,6	66,2	69,8
	3	9,5	33,7	41,1	44,3	53,5	63,8	70,3	72,0
	mv	9,3	34,4	41,2	44,7	53,8	61,3	67,5	71,1
	std. av	0,3	1,2	0,2	0,5	0,3	2,6	2,4	1,2
0,50	1	7,1	28,3	36,1	39,9	49,0	56,2	60,9	65,1
	2	6,8	29,4	35,2	39,5	48,6	55,3	61,0	64,2
	3	7,0	28,1	36,1	40,1	48,1	57,7	62,8	67,5
	mv	7,0	28,6	35,8	39,8	48,6	56,4	61,6	65,6
	std. av	0,2	0,7	0,5	0,3	0,5	1,2	1,1	1,7
0,55	1	5,6	23,5	30,8	33,9	41,9	49,3	54,1	59,6
	2	5,7	24,3	29,6	34,5	42,6	49,5	52,8	57,9
	3	5,4	23,5	30,0	32,2	41,2	49,3	53,3	57,3
	mv	5,6	23,8	30,1	33,5	41,9	49,4	53,4	58,3
	std. av	0,2	0,5	0,6	1,2	0,7	0,1	0,7	1,2
0,65	1	3,2	15,9	22,5	24,7	32,2	40,3	43,5	47,1
	2	3,2	16,3	22,4	25,2	31,3	37,4	42,5	45,9
	3	3,1	16,2	21,7	25,4	31,5	39,4	43,5	46,3
	mv	3,2	16,1	22,2	25,1	31,7	39,0	43,2	46,4
	std. av	0,1	0,2	0,4	0,4	0,5	1,5	0,6	0,6
0,75	1	2,3	12,7	17,7	21,1	28,3	35,3	39,2	40,6
	2	2,4	13,0	18,0	20,7	28,4	34,8	38,6	40,7
	3	2,3	13,0	17,6	20,2	27,5	34,0	38,2	40,3
	mv	2,4	12,9	17,8	20,7	28,1	34,7	38,7	40,5
	std. av	0,1	0,2	0,2	0,5	0,5	0,7	0,5	0,2
0,85	1	2,1	10,5	15,4	17,8	24,3	32,3	35,3	36,4
	2	2,1	11,0	15,3	17,8	24,9	31,6	34,8	36,4
	3	2,2	11,1	15,0	17,8	24,3	31,0	35,6	37,0
	mv	2,1	10,9	15,2	17,8	24,5	31,6	35,2	36,6
	std. av	0,1	0,3	0,2	0	0,4	0,7	0,4	0,3

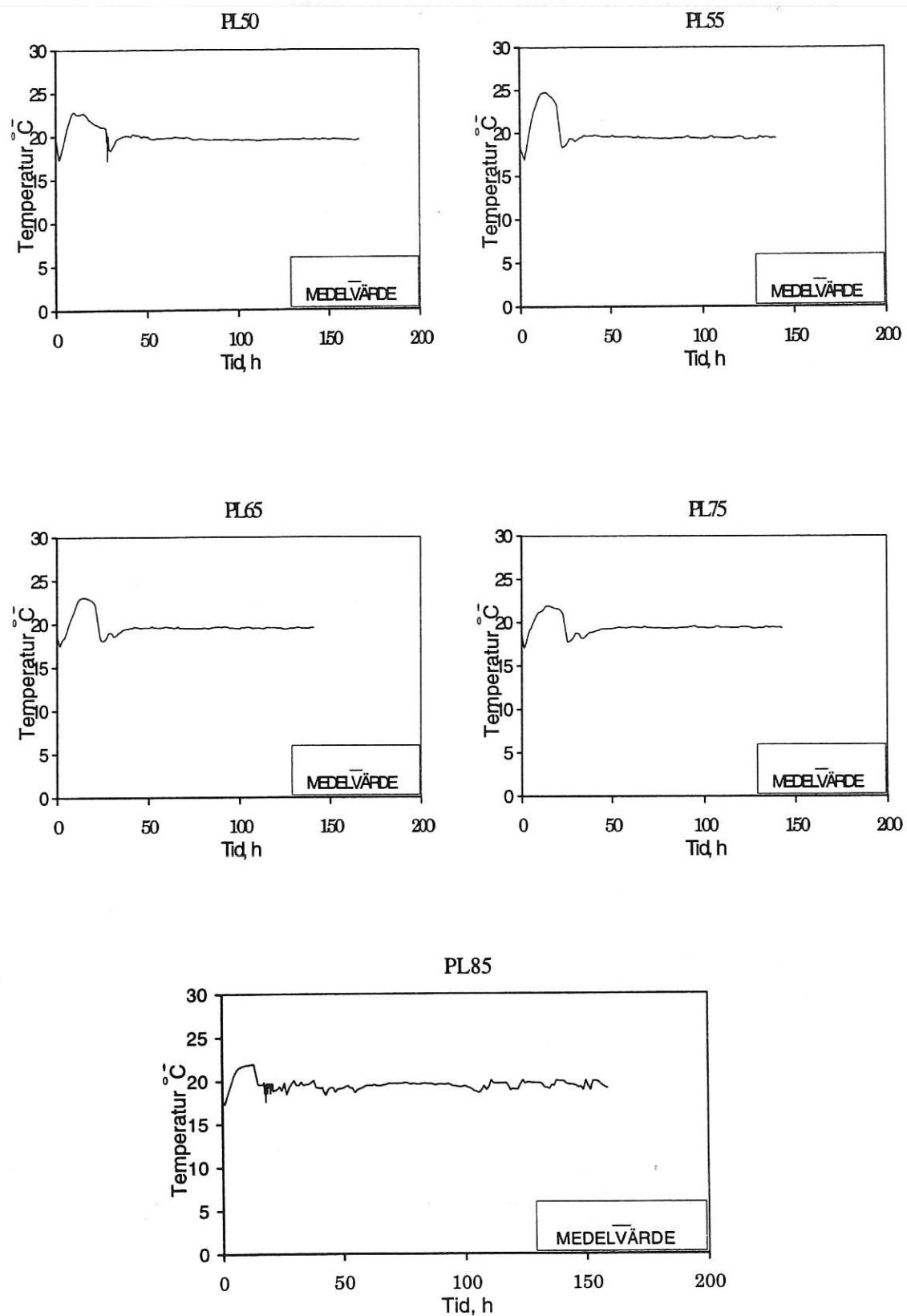
Tabell C1. Spräckhållfasthet, MPa, hos betong med portlandcement.

Tabell C2. Spräckhållfasthet, MPa, hos betong med portlandcement och 5 % silikastoft.

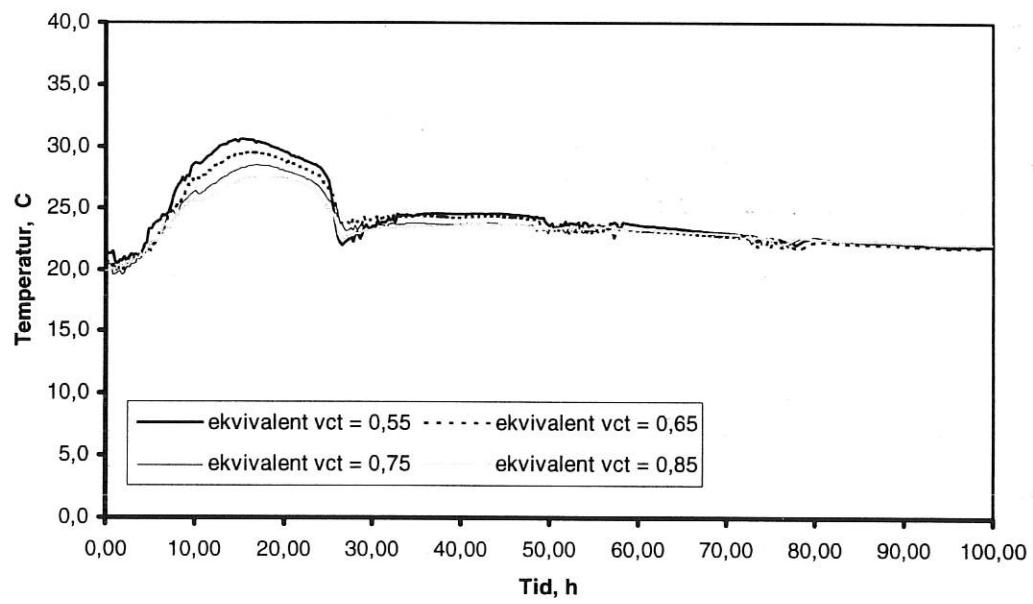
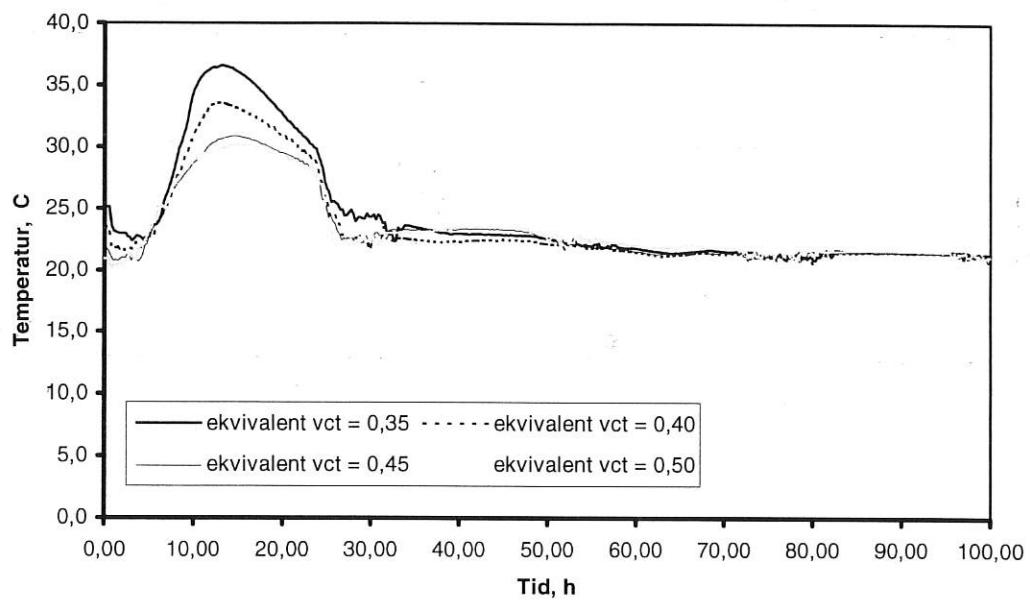
Temperaturutveckling i provkroppar



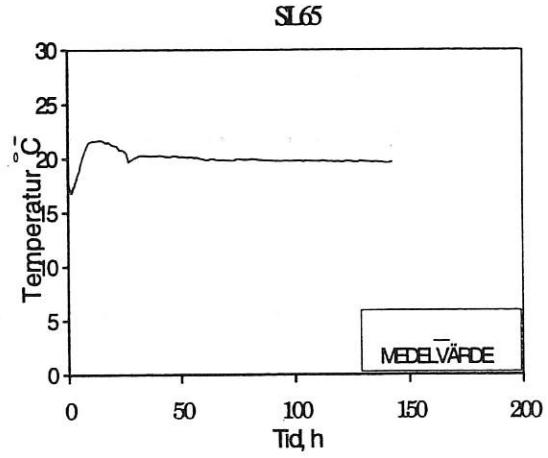
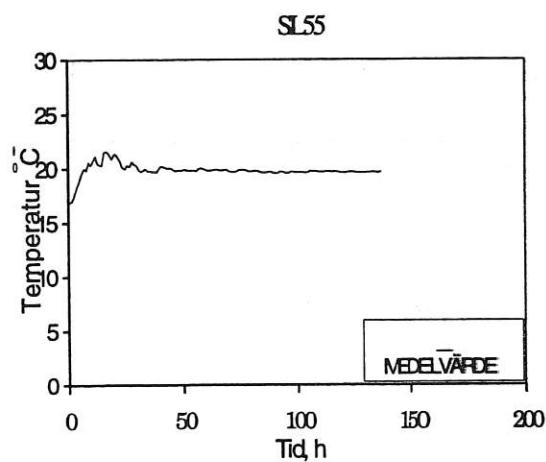
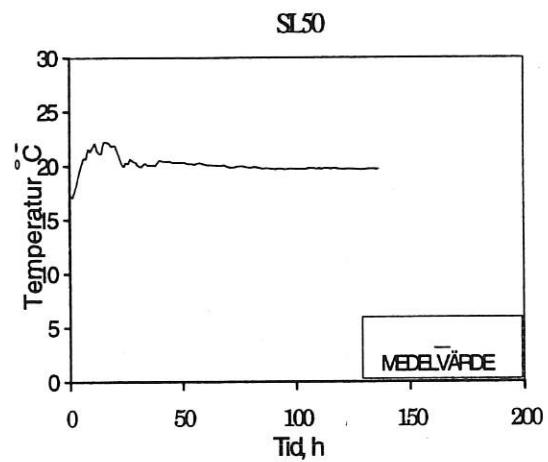
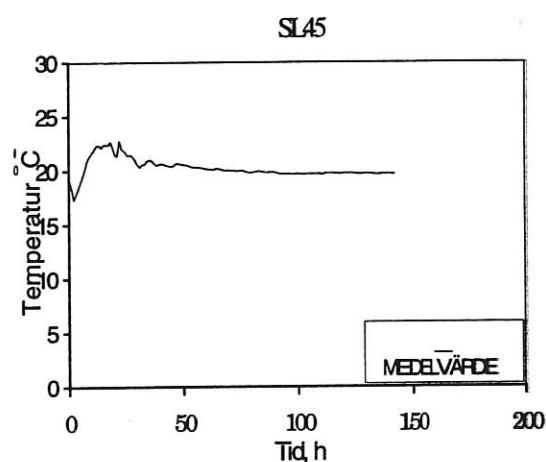
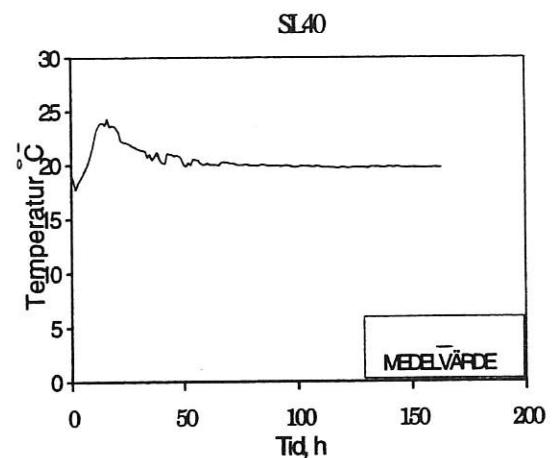
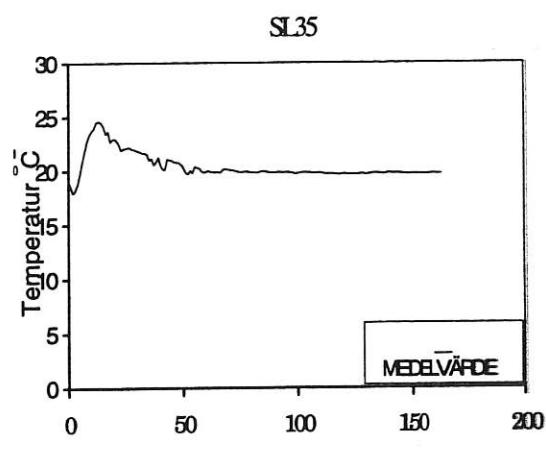
Temperaturutveckling för portlandcement, [2]. Medelvärde av tre provkroppar.



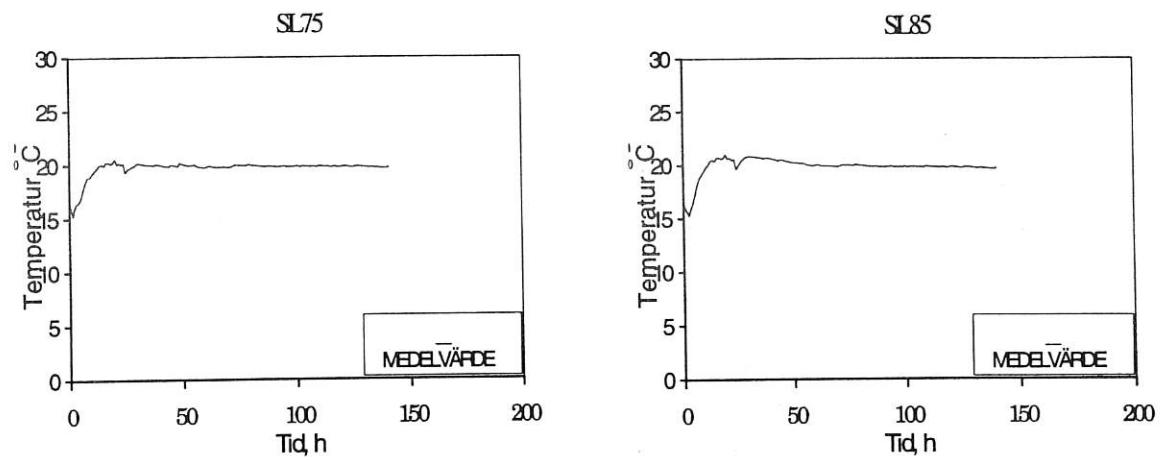
Temperaturutveckling för portlandcement, [2]. Medelvärde av tre provkroppar.



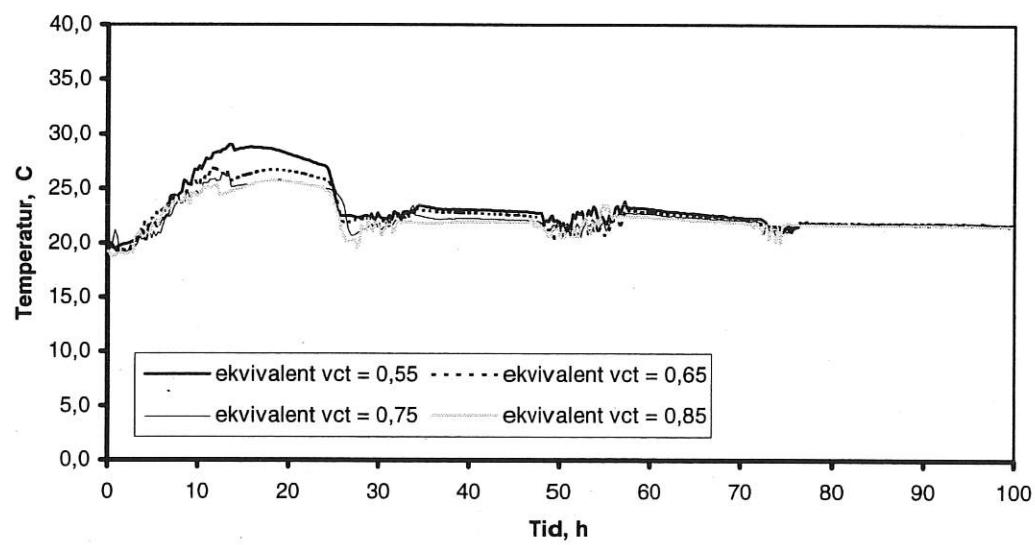
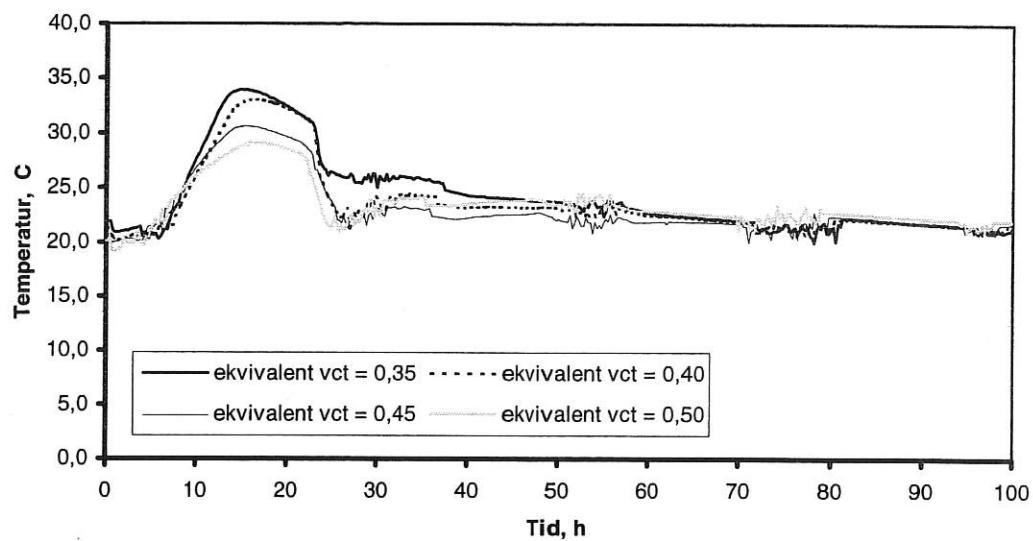
Temperaturutveckling för portlandcement med 20 % slagg. Medelvärde av tre provkroppar.



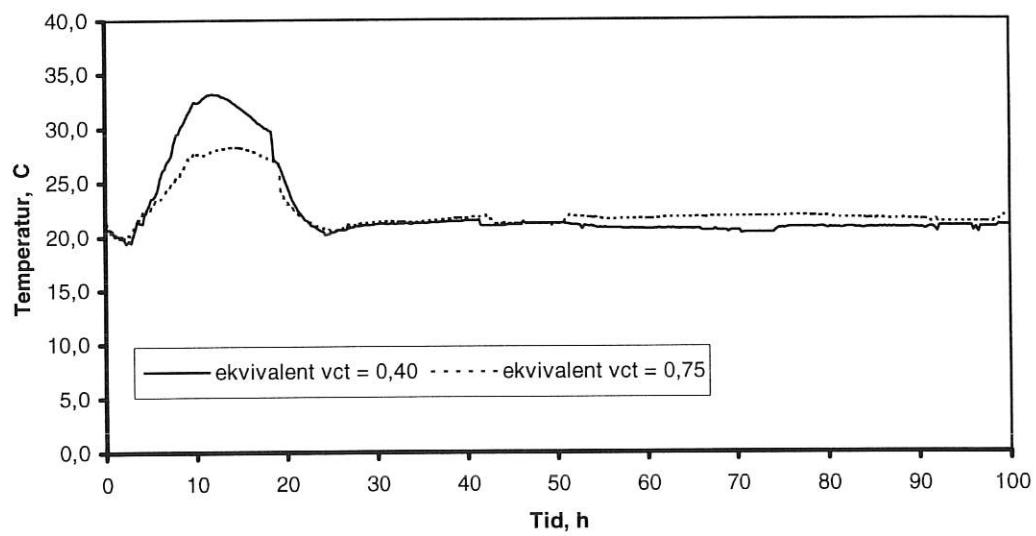
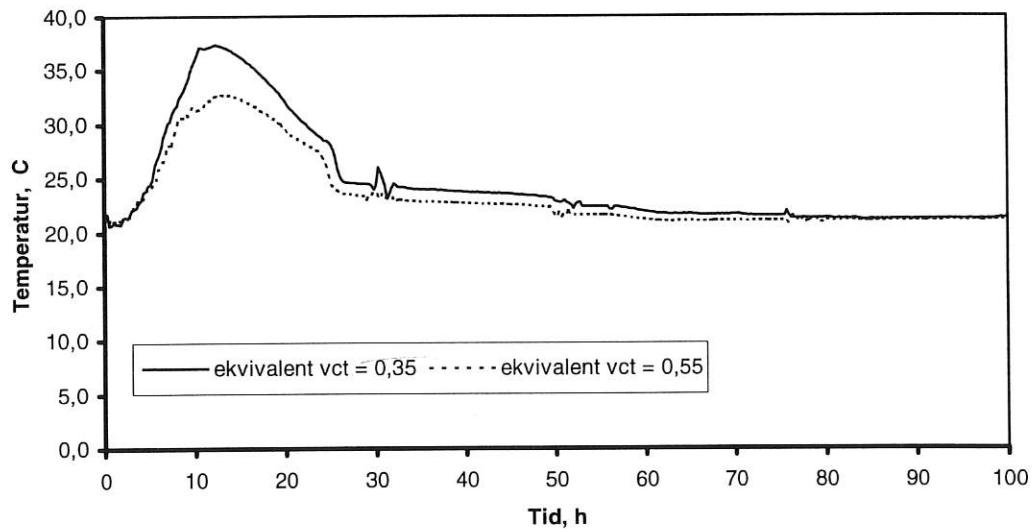
Temperaturutveckling för portlandcement med 35 % slagg, [2]. Medelvärde av tre provkroppar.



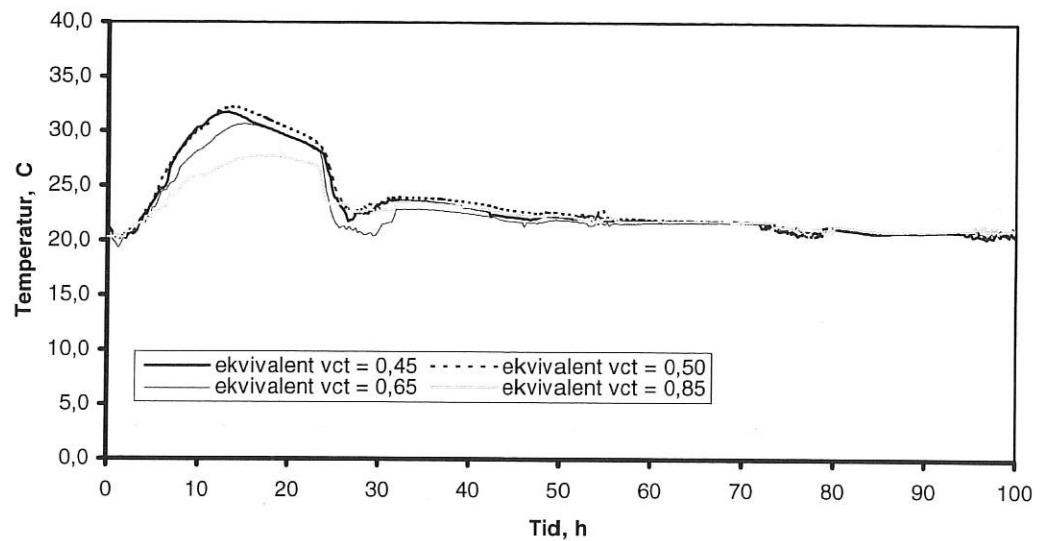
Temperaturutveckling för portlandcement med 35 % slagg, [2]. Medelvärde av tre provkroppar.



Temperaturutveckling för portlandcement med 65 % slagg. Medelvärde av tre provkroppar.



Temperaturutveckling för portlandcement med 5 % silikastoft. Medelvärde av tre provkroppar.



Temperaturutveckling för portlandcement med 5 % silikastoft. Medelvärde av tre provkroppar.

Effektivitetskoefficienter med avseende på tryckhållfasthet för granulerad masugnsslagg och silikastoft

Effektivitetskoefficienten (ϵ) med avseende på tryckhållfasthet anger den andel cement som kan ersättas med en andel tillsatsmaterial i betong utan att hållfastheten ändras. En effektivitetskoefficient på 0,5 innebär således att en andel cement måste ersättas med två andelar tillsatsmaterial för att hållfastheten inte skall minska.

Effektivitetskoefficienten används för att beräkna det ekvivalenta vattencementtalet för betong med tillsatsmaterial:

$$vct_{ekv} = W/(C+\epsilon D) \quad \text{ekv E:1a}$$

där

W = vikt vatten

C = vikt cement

D = vikt tillsatsmaterial

ϵ = effektivitetskoefficient

Ekv E8:1a kan också skrivas som:

$$\epsilon = (W/vct_{ekv} - C)/D \quad \text{ekv E:1b}$$

Det ekvivalenta vattencementtalet anger det vattencementtalet för betong utan tillsatsmaterial som ger samma hållfasthet som för en betong med tillsatsmaterial. Vct_{ekv} kan beräknas med hjälp av ekv 6 i huvudrapporten:

$$f_c = K(1/vct_{ekv} - a) \quad \text{ekv E:2a}$$

som också kan skrivas som:

$$vct_{ekv} = 1/((f_c/K) - a) \quad \text{ekv E:2b}$$

där

f_c = hållfastheten för betong med tillsatsmaterial

K och a = koefficienter för betong utan tillsatsmaterial enligt tabell E1

Genom att kombinera ekvationerna E:1b och E:2b erhålls följande samband:

$$\epsilon = (W((f_c/k) - a) - C)/D \quad \text{ekv E:3}$$

Med hjälp av ekvation E:3, värden på K och a i tabell E1, materialsammansättning i tabellerna 5-10 i huvudrapporten och hållfasthetsvärden i bilaga B kan effektivitetskoefficienter beräknas för de tillsatsmaterial som används i denna undersökning. Resultaten redovisas i tabellerna E2-E6 och sammanfattas i figurerna E1-E4.

Tabell E1. Värden på K och a för betong utan tillsatsmaterial och med portlandcement (Slite std) som bindemedel). Värdena gäller för våtlagrade provkroppar (från huvudrapporten).

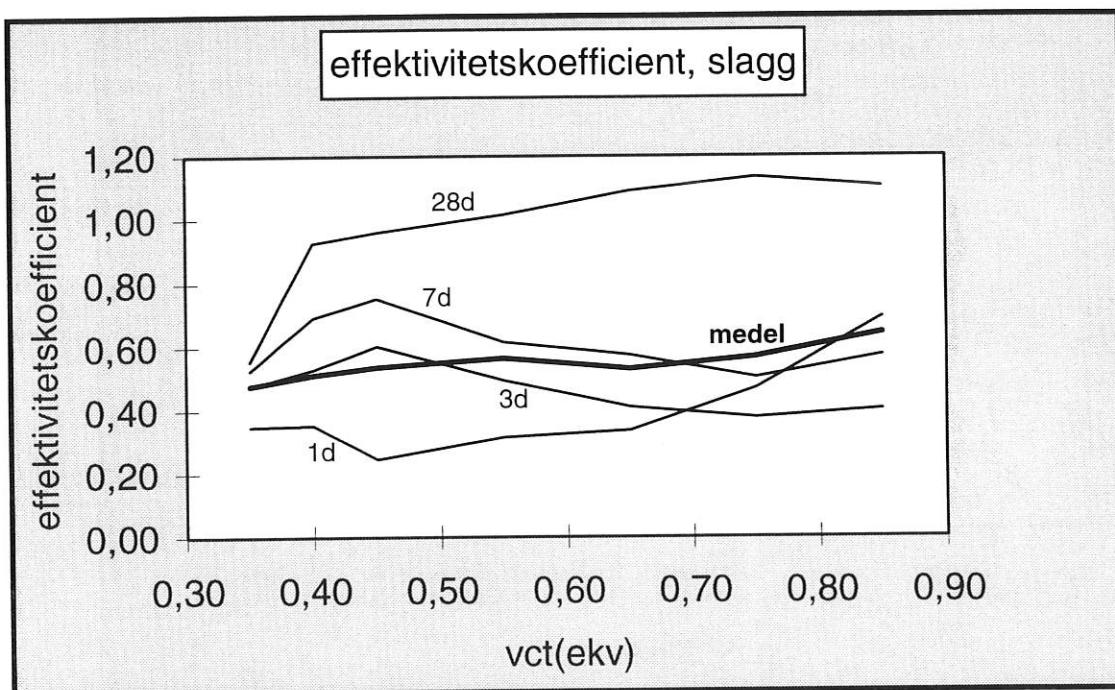
Ålder (dygn)	K (MPa)	a
0,4	6,065	0,941
1	25,275	0,914
2	26,382	0,703
3	26,613	0,598
7	27,940	0,474
14	28,891	0,397
28	29,986	0,368

I huvudrapporten har effektivitetskoefficienten 0,6 använts för slagg och 1,0 för silikastoft vid proportioneringen. Dessa värden anges också i BBK. Vid tryckprovningen visade det sig att hållfastheten för olika betongkvaliteter ibland skiljde sig kraftigt åt, trots att vct_{ekv} var lika. Förklaringen till detta är att den effektivitetskoefficient som använts vid proportioneringen skiljer sig från materialets verkliga effektivitetskoefficient.

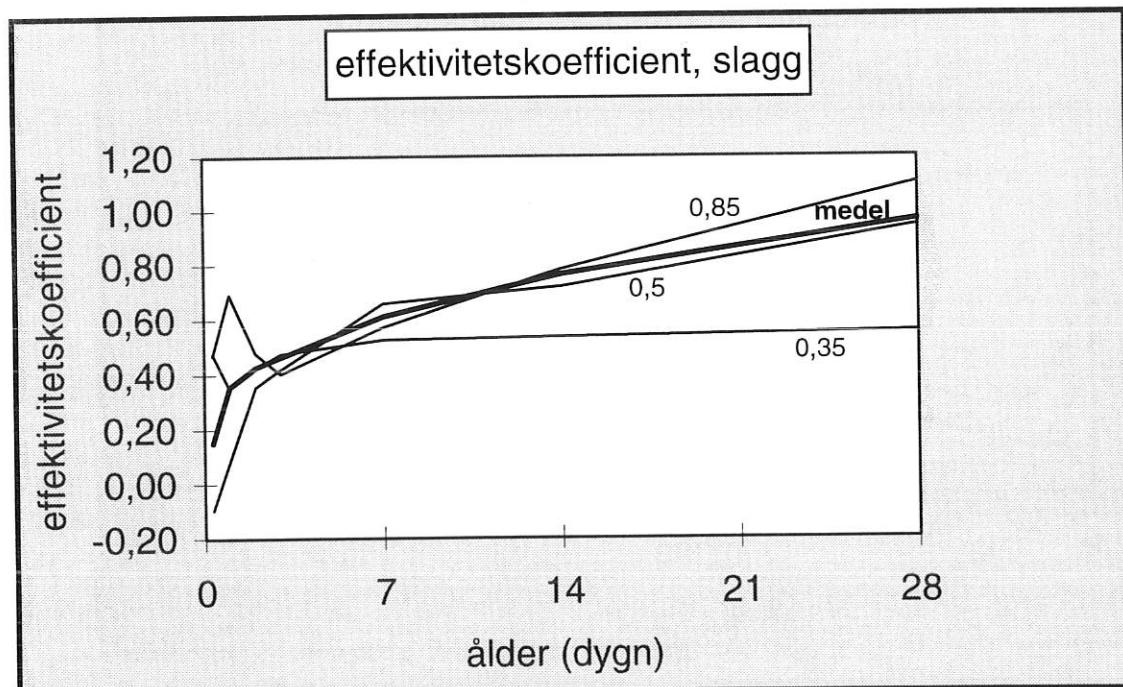
Ofta används 28-dygnsvärdet för att klassificera betong. Enligt figur E1 är effektivitetskoefficienten vid 28 dygn klart högre än 0,6 men för lägre ålder är värdena betydligt lägre. Vid 3-7 dygn är värdet 0,4-0,7 och vid 1 dygn ofta lägre än 0,4. Detta åldersberoende framgår mycket tydligt i figur E2.

Formrivning sker oftast inom ett par dygn efter gjutning och då tycks värdet 0,6 vara i högsta laget för den slaggkvalitet som använts i denna undersökning. Ett värde på den säkra sidan på 0,2-0,3 verkar rimligare, inte minst med tanke på de allvarliga konsekvenser ett ras i samband med formrivning kan medföra.

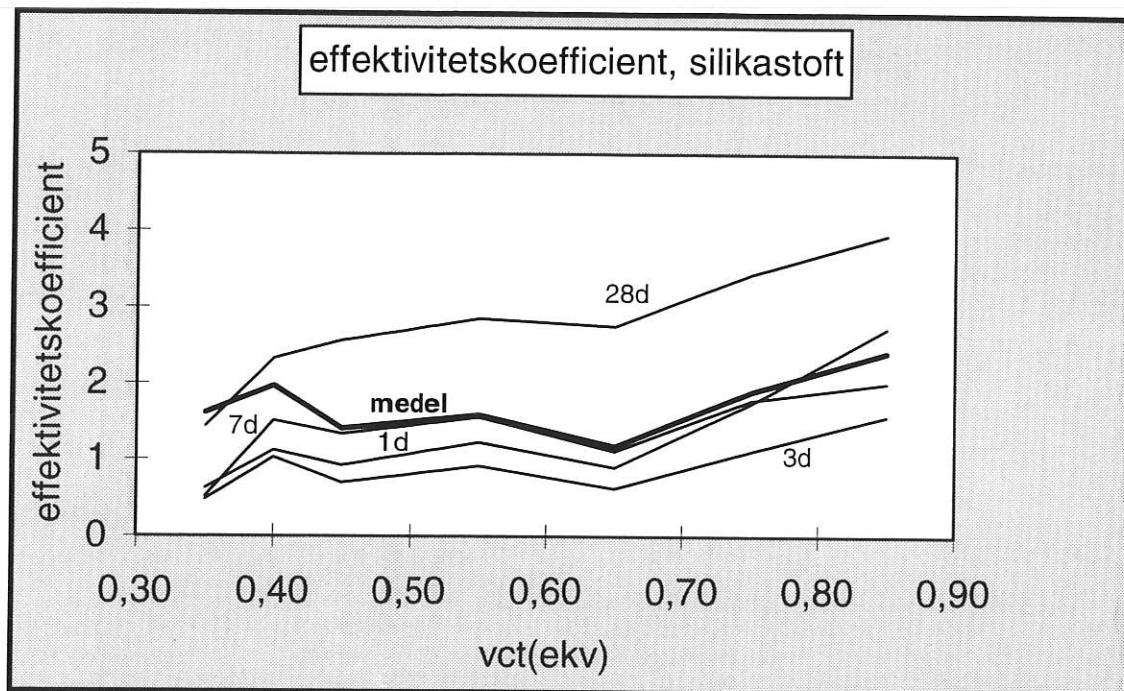
I figur E3 och E4 visas motsvarande resultat för silikastoft. Också här är effektivitetskoefficienten hög vid 28 dygns ålder men betydligt lägre vid lägre ålder. En effektivitetskoefficient på 1,0 vid tidig ålder verkar alltför hög för den använda silikastoftskvaliteten. Ett värde på den säkra sidan på 0,7-0,8 verkar mer relevant ur säkerhetssynpunkt. För låga vct_{ekv} (0,35 och läger) indikerar denna undersökning att det är motiverat med ännu lägre värden på effektivitetskoefficienten.



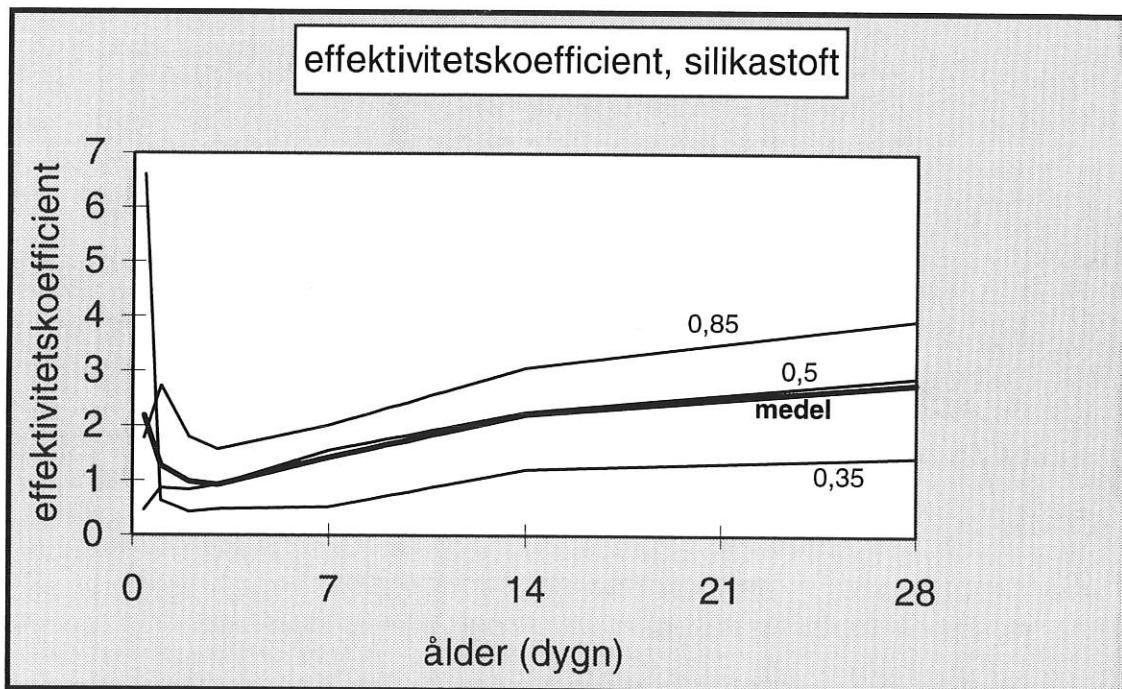
Figur E1. Effektivitetskoefficienten för slagg som funktion av vct_{ekv} för olika åldrar. Kurvorna utgör ett genomsnitt för resultaten från olika slagginblandning. Medelkurvan utgör medelresultatet för 7 olika åldrar.



Figur E2. Effektivitetskoefficienten för slagg som funktion av ålder för olika vct_{ekv} . Kurvorna utgör ett genomsnitt för resultaten från olika slagginblandning. Medelkurvan utgör medelresultatet för 8 olika vct_{ekv} .



Figur E3. Effektivitetskoefficienten för silikastoft som funktion av vct_{ekv} för olika åldrar. Kurvorna utgör ett genomsnitt för resultaten från olika inblandning av silikastoft. Medelkurvan utgör medelresultatet för 7 olika åldrar.



Figur E4. Effektivitetskoefficienten för silikastoft som funktion av ålder för olika vct_{ekv} . Kurvorna utgör ett genomsnitt för resultaten från olika inblandning av silikastoft. Medelkurvan utgör medelresultatet för 8 olika vct_{ekv} .

Tabell E2. Effektivitetskoefficienter för granulerad masugnsslugg för betong med en slagginblandning på 20 % av cementinnehållet.

vct _{pkv}	Effektivitetskoefficient							
	Ålder (dygn)							
0,4	1	2	3	7	14	28	medel	
0,35	1,8	0,64	0,56	0,59	0,50	0,55	0,68	0,76
0,4	0,76	0,75	0,75	0,71	0,78	0,93	1,08	0,82
0,45	0,28	0,55	0,72	0,74	0,83	0,85	0,97	0,71
0,5	-0,11	0,07	0,32	0,31	0,44	0,71	0,86	0,37
0,55	0,14	0,43	0,59	0,64	0,72	0,96	1,19	0,67
0,65	0,11	0,48	0,42	0,48	0,58	0,84	1,21	0,59
0,75	0,49	0,72	0,52	0,52	0,59	0,89	1,17	0,70
0,85	0,59	0,99	0,69	0,51	0,63	0,76	1,07	0,75
medel	0,51	0,58	0,57	0,56	0,63	0,81	1,03	0,67

Tabell E3. Effektivitetskoefficienter för granulerad masugnsslugg för betong med en slagginblandning på 35 % av cementinnehållet.

vct _{pkv}	Effektivitetskoefficient							
	Ålder (dygn)							
0,4	1	2	3	7	14	28	medel	
0,35	-0,06	0,07	0,20	0,25	0,41	0,39	0,43	0,25
0,4	-1,06	-0,07	0,22	0,29	0,53	0,64	0,84	0,35
0,45	-0,68	-0,14	0,36	0,54	0,69	0,79	1,00	0,46
0,5	-0,15	-0,06	0,36	0,44	0,70	0,69	1,05	0,45
0,55	-0,32	-0,1	0,13	0,22	0,47	0,62	0,90	0,32
0,65	-0,03	0,26	0,35	0,46	0,69	0,90	1,18	0,55
0,75	0,01	0,31	0,31	0,35	0,53	0,89	1,32	0,53
0,85	0,23	0,57	0,38	0,38	0,60	0,81	1,16	0,56
medel	-0,26	0,11	0,29	0,37	0,58	0,72	0,99	0,43

Tabell E4. Effektivitetskoefficienter för granulerad masugnsslugg för betong med en slagginblandning på 65 % av cementinnehållet.

vct _{pkv}	Effektivitetskoefficient							
	Ålder (dygn)							
0,4	1	2	3	7	14	28	medel	
0,35	-0,31	0,34	0,51	0,59	0,67	0,67	0,56	0,43
0,4	-0,30	0,38	0,53	0,59	0,77	0,78	0,86	0,52
0,45	-0,05	0,33	0,48	0,53	0,74	0,85	0,91	0,54
0,5	-0,04	0,23	0,35	0,40	0,62	0,75	0,84	0,45
0,55	0,34	0,20	0,28	0,35	0,51	0,72	0,84	0,46
0,65	0,36	0,27	0,24	0,29	0,45	0,71	0,88	0,46
0,75	0,45	0,38	0,27	0,26	0,39	0,65	0,91	0,47
0,85	0,59	0,52	0,37	0,32	0,49	0,78	1,08	0,59
medel	0,13	0,33	0,38	0,42	0,58	0,74	0,86	0,49

Tabell E5. Effektivitetskoefficienter för silikastoft för betong med en silikastoftsinblandning på 5 % av cementinnehållet.

vct _{pkv}	Effektivitetskoefficient							
	Ålder (dysgn)							
	0,4	1	2	3	7	14	28	medel
0,35	8,82	0,11	-0,36	-0,38	-0,54	0,18	0,54	1,2
0,4	6,25	1,11	0,88	0,65	1,22	1,67	1,88	1,95
0,45	1,09	0,61	0,26	0,15	0,82	1,45	2,20	0,94
0,5	-0,61	0,48	0,40	0,33	0,93	1,58	2,44	0,79
0,55	1,6	1,22	0,83	0,59	1,16	1,44	2,66	1,36
0,65	-0,83	0,70	0,57	0,22	0,70	1,82	2,53	0,82
0,75	1,05	1,77	1,23	0,09	1,40	2,66	3,25	1,75
0,85	1,48	2,83	1,59	1,26	1,35	2,12	3,40	2,00
medel	2,36	1,10	0,68	0,47	0,88	1,62	2,36	1,35

Tabell E6. Effektivitetskoefficienter för silikastoft för betong med en silikastoftsinblandning på 10 % av cementinnehållet.

vct _{ekv}	Effektivitetskoefficient							
	Ålder (dygn)							
	0,4	1	2	3	7	14	28	medel
0,35	4,4	1,15	1,21	1,34	1,58	2,23	2,33	2,03
0,4	3,14	1,14	1,11	1,41	1,80	2,55	2,78	1,99
0,45	2,22	1,24	1,19	1,25	1,85	2,44	2,93	1,87
0,5	1,53	1,25	1,27	1,52	2,18	2,94	3,34	2,00
0,55	1,29	1,24	1,17	1,25	1,96	2,78	3,04	1,82
0,65	0,51	1,11	1,06	1,04	1,53	2,53	2,98	1,54
0,75	1,01	1,72	1,34	1,33	2,17	3,13	3,62	2,05
0,85	2,08	2,63	2,00	1,89	2,68	4,00	4,49	2,82
medel	2,02	1,44	1,29	1,38	1,97	2,83	3,19	2,02