

LUNDS UNIVERSITET
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
Byggnadsmaterial

LUND UNIVERSITY
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Division of Building Materials



Hållfasthet och värmeutveckling hos betong med Portlandkalkstencement

Niklas Johansson

LUNDS UNIVERSITET
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
Byggnadsmaterial

LUND UNIVERSITY
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Division of Building Materials



Hållfasthet och värmeutveckling hos betong med Portlandkalkstencement

-

Strength and Heat Release in Concrete based on Portland Limestone Cement

Niklas Johansson

ISRN: LUTVDG/TVBM--99/5037--SE(1-47)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

Tel: 046-222 74 15
Fax: 046-222 44 27

221 00 LUND

Förord

Denna rapport är resultatet av ett examensarbete utfört på Avdelning Byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola i samarbete med Cementa AB under 1998/99. Handledare för arbetet har varit professor Göran Fagerlund, LTH, samt Sven Erik Johansson, Cementa AB. Dessa båda vill jag rikta ett stort tack till för det stöd de givit mig under arbetets gång.

Jag vill även passa på att tacka personalen på avdelningen Byggnadsmaterial. Framförallt Lars Wadsö för all hjälp med kalorimeterförsöken, Bo Johansson, Ingmar Larsson och Stefan Backe som varit till stor hjälp under det praktiska arbetet, samt Britt Andersson för hjälp med det administrativa.

Slutligen vill jag också tacka Mats Öberg på Cementa AB, samt personal på Scancem Research AB för värdefull information som gjort denna rapport möjlig.

Lund, mars 1999

Niklas Johansson

Sammanfattning

Det svenska EU-medlemskapet har inneburit en ny klassificering av cement i Sverige. Nya cementsammansättningar som tidigare varit förbjudna får nu användas. Cementklassen CEM II A-L kallad Portlandkalkstencement (PK-cement) är en av dessa nya cementklasser.

PK-cement är huvudsakligen sammansatt av cementklinker och kalksten. Kalkstenshalter på upp till 20 % av cementets huvudbeståndsdelar är tillåtna. Detta kan jämföras med Standard Portlandcementet (Std P-cementet) som har en kalkstenshalt på 5 %. Vid tillverkning av PK-cement minskar därmed klinkerbehovet, vilket i sin tur leder till att koldioxidutsläpp och andra miljöpåverkande utsläpp från cementtillverkningen minskar. Även energiförbrukningen i form av fossila bränslen och restbränslen minskar. Elförbrukningen förblir dock oförändrad eftersom malningsenergin till cementkvarnen ökar då PK-cementet har en större specifik yta än Std P-cementet. Ökningen av ytan är nödvändig om PK-cementet skall bli lika reaktivt som vanligt Portlandcement.

Detta examensarbete syftar till att jämföra vissa produktionstekniska egenskaper hos ett PK-cement med vanligt Std P-cement. Det bör dock poängteras att detta PK-cement inte har samma kalkstensinnehåll och specifik yta som det cement som Cementa AB eventuellt kommer att lansera. Det i detta arbete undersökta cementet är ett led i utvecklingsarbetet för att hitta den optimala sammansättningen.

Ytterligare ett syfte av mera vetenskaplig karaktär har varit att undersöka samband mellan hållfasthetstillväxt och värmeutveckling.

Resterande delen av denna sammanfattning ägnas åt att beskriva erhållna resultat. Avslutningsvis görs en jämförelse av PK-cementet med det vanliga Std P-cementet.

Materialdata för cementen

De cement som jämförts har följande grundläggande egenskaper.

	PK	Std P
Kalkstensinnehåll	13 %	5 %
Tillverkningsort	Skövde	Skövde
Tillverkningsdatum	980206	980121

Kemiska och fysikaliska analyser av de båda cementen har utförts av Scancem Research AB och givit följande resultat:

- 1: Glödförlusten är högre hos PK-cementet beroende på den högre kalkstenshalten. Kalksten avger koldioxid vid upphettning till 950°C.

2: PK-cementet har en större specifik yta, jämfört med det vanliga Std P-cementet, på grund av en finare malning. Denna finare malning är nödvändig för att kompensera för den större andelen icke reaktiv kalksten.

I övrigt finns inga större skillnader mellan de båda cementen.

Hållfasthetsutveckling

Hållfasthetstillväxten hos betong baserad på PK-cement och Std P-cement har undersökts genom mätning av kubtryckhållfastheten vid varierande vattencementtal, vct och varierande lagringstemperaturer. Temperaturutvecklingen i betongen har mätts med hjälp av termoelement. Med hjälp av denna temperatur har tidsaxeln i hållfasthetskurvorna skalats om genom användning av mognadsgradsbegreppet för att man skall få jämförbara kurvor.

Resultaten visar att det ej föreligger någon större skillnad mellan de båda cementen ur hållfasthetssynpunkt. Vad man däremot kan konstatera är att de gjutningar som utförts då PK-cementet åldrats ca 9 månader, har en lägre hållfasthet än de som gjutits då cementet var färskt. Vad detta beror på har inte kunnat klarläggas inom examensarbetets ram.

Relativ reaktionshastighet beräknad ur hållfasthetsutveckling

Genom lagring av kuberna vid olika temperaturer har den relativa reaktionshastigheten (jämfört med +20°C) kunnat beräknas. Resultatet av dessa beräkningar visar att reaktionshastigheten under det första dygnet är något högre för PK-cementet, både vid låga och höga temperaturer.

Värmeutveckling

Värmeutvecklingen har mätts på cementbruk baserat på de båda cementen. Såväl vct som lagringstemperatur har varierats. En isothermisk kalorimeter har använts. Denna går under arbetsnamnet Studentkalorimetern S6 och är utvecklad av Lars Wadsö, LTH, /10/. Kalorimetern har varit mycket enkel att använda och givit trovärdiga resultat, baserat på jämförelse med Cementas produktblad.

Resultaten visar att värmeutvecklingen hos de båda cementen är likvärdig under det första dygnet, men att värmeutvecklingen därefter är lite högre hos Std P-cementet. Genom användning av flyttillsatsmedel i cementbruket förskjuter man värmeutvecklingskurvan framåt med ca 7 timmar för båda cementen.

Relativ reaktionshastighet beräknad ur värmeutveckling

Genom att mäta värmeutvecklingen vid olika temperaturnivåer kan den relativa reaktionshastigheten bestämmas även ur värmeutvecklingen. Resultaten visar att de värden som erhållits överensstämmer väl med de som erhöles ur hållfasthetsutvecklingen.

Samband mellan hållfasthetsutveckling och värmeutveckling

Tidigare undersökningar, /4/ och /13/, har visat att det föreligger ett tämligen rätlinjigt samband mellan hållfasthetsutveckling och värmeutveckling. Resultaten från denna undersökning bekräftar en tendens till rätlinjighet. Osäkerheten i mätningarna är dock för stora för att en exakt relation mellan hållfasthet och värmeutveckling skall kunna fastställas.

Miljöeffekter

De miljömässiga konsekvenserna av att använda PK-cement istället för Std P-cement har undersökts. Beräkningarna visar att miljöbelastningen, ur yttre miljösynpunkt skulle minska med mellan 5 och 16 procent beroende på vilken kalkstenshalt PK-cementet innehåller.

Koldioxidutsläppen skulle minska betydligt eftersom Cements AB producerar ca 1,2 miljoner ton Std P-cement årligen för användning i Sverige. Varje producerat ton cement avger ca 850 kg koldioxid.

Slutsats

Undersökningen visar att PK-cement kan vara ett mycket bra cement, framförallt ur miljösynpunkt. Betongtekniska egenskaper såsom hållfasthetstillväxt och värmeutveckling är i stort sett detsamma för PK-cement som hos vanligt Std P-cement. Detta visar att en ökning av cementhalten i betongen inte är nödvändig för att erhålla samma resultat som vid dagens gjutningar med Std P-cement.

Ytterligare provningar bör dock utföras för att få statistiskt säkerställda resultat samt för att kartlägga andra egenskaper, främst då beständighetsegenskaper.

Summary

The Swedish membership in the Common Market has implied that a new cement classification is used in Sweden. New cement compositions which were previously forbidden are now allowed to be used.

The cement class CEM II A-L called Portland Limestone Cement (PL cement) is one of these new cement classes.

The PL cement is mainly composed of cement clinker and ground limestone. The maximum allowed content of ground limestone is 20 % of the cement weight for PL-cement and 5 % for Ordinary Portland Cement (OPC). Producing PL-cement instead of OPC will decrease the use of clinker, which means less emission of carbon dioxide and other environmental pollutions from cement production. Also the use of fossil fuels and residual fuels will decrease.

The consumption of electricity, however, remains the same because of the increased grinding energy, which is needed to give the PL-cement a larger specific surface, than that used for the OPC. The increased surface is necessary if the PL-cement will be as reactive as the OPC.

This Master Thesis aims at comparing some properties of PL-cement with these of OPC. It should be noted that the PL-cement which is used in this work does not have the same content of limestone or the same specific surface as the PL-cement that Cementa AB possibly will introduce. The cement which is tested in this Master Thesis is just a part of the development work to find the optimal composition.

Another aim has been to study the relation between the strength development and the heat release.

The remaining part of this summary will describe the results of the work. Finally there will be a comparison between the PL-cement and the OPC produced today by Cementa AB.

Material properties of the cements

The compared cements have the following main qualities.

	PL	OPC
Content of limestone	13 %	5 %
Place of manufacturing	Skövde, Sweden	Skövde, Sweden
Date of manufacturing	980206	980121

Chemical and physical analyses of the two cements are made by Scancem Research AB. The analyses have given the following results.

- 1: The loss on ignition of the PL-cement is higher than that of OPC because of the higher amount of limestone. Limestone emits carbon dioxide at heating to 950°C.
- 2: PL-cement has a larger specific surface, than that of OPC. The higher specific surface is necessary to compensate for the greater amount of non reactive components in PL-cement.

Besides those two properties there are no big differences between the two cements.

Strength development

The strength development of concrete based on PL-cement and OPC has been studied by measuring the cube strength of concrete made with varying water cement ratio and varying storage temperature. The temperature development in the concrete has been measured by thermocouples.

The results show that there are no big differences in strength development between the two cements. An interesting observation is that the castings made when the PL-cement was about 9 months old gave lower strength than the ones made with young cement. The reason for this has not been clarified in this Master Thesis.

The relative reaction rate calculated from the strength development

The relative reaction rate compared with the reaction rate at +20°C has been calculated from cubes stored at different temperature. The result of these calculations shows that the reaction rate during the first 24 hours is somewhat higher for the PL-cement, both at low and high temperatures.

Heat release

The heat release of the two cement types has been measured on cement mortars. The water cement ratio and the storage temperatures have been varied. An isothermic calorimeter has been used. It is called The Student Calorimeter S6 and was developed by Lars Wadsö, Lund Institute of Technology./10/.

The results show that the heat release for both cements are similar during the first 24 hours. After that the heat release is somewhat higher for OPC. The use of super plasticizer (Glenium 51) causes a retardation of the cement mortar by about 7 hours. The same retardation occurs for both cement types.

The relative reaction rate calculated from the heat release

By measuring the heat release at different temperatures, the relative reaction rate can be determined. The results shows that the values obtained are very similar to the ones obtained from the strength development.

The relation between the strength development and the heat release

Previous studies, /4/ and /13/, have shown that there is a fairly linear relation between the strength development and the heat release. The results from this study confirms this linearity. The uncertainty in the measurements, however, are somewhat too big to give an exact relation between the strength and the heat release.

Environmental effects

The environmental consequences of using PL-cement instead of OPC have been analyzed. The calculations show that the environmental stress would decrease by about 5-16 procent depending on the limestone content of the PL-cement

The carbon dioxide emission during cement production would decrease considerably since each ton of produced cement emits about 850 kg of carbon dioxide. This means that if all OPC produced by Cementa AB per year for use in Sweden (1,2 millions of tons) should be replaced by PL-cement the reduction in carbon dioxide emission should be considerable.

Conclusion

The study shows that the PL-cement studied could replace the OPC used in Sweden today, without any great problems. Concrete technology qualities such as strength development and heat release are practically the same for the two cements. An increase in the cement content of the concrete is not required when OPC is replaced by the PL-cement studied.

Further testings ought to be done in order to statistically verify the results and in order to study other qualities, above all durability.

Innehållsförteckning

Förord	
Sammanfattning	
Summary	
	Sid
1. Bakgrund	1
2. Syfte	3
3. Portlandkalkstencement	5
3.1 Allmänt	5
3.2 Tillverkning	6
3.3 Materialdata jämförda med Std P-cement	6
3.4 Slutsats	9
4. Hållfasthetsutveckling	11
4.1 Mognadsgradsbegreppet	11
4.2 Hållfasthetsprovningar, allmänt	14
4.3 Gjutning och provning	15
4.4 Korrigering av erhållna hållfasthetskurvor	18
4.5 Resultat	19
4.5.1 Färsk betong	19
4.5.2 Hållfasthetsutveckling	19
4.5.3 Relativ reaktionshastighet beräknad ur hållfasthetsutveckling	23
4.6 Slutsatser av hållfasthetsmätningar	26
5. Värmeutveckling	27
5.1 Allmänt	27
5.2 Studentkalorimetern S6	28
5.3 Recept	28
5.4 Arbetsutförande	29
5.5 Beräkningsgång	30
5.6 Resultat	31
5.6.1 Värmeutveckling	31
5.6.2 Relativ reaktionshastighet beräknad ur värmeutveckling	35
5.7 Slutsatser av värmeutvecklingsmätningar	37
6. Samband mellan hållfasthetsutveckling och värmeutveckling	39
6.1 Allmänt	39
6.2 Metodbeskrivning	40
6.3 Resultat	40
6.4 Slutsats	42

7. Miljöeffekter	45
7.1 Allmänt	45
7.2 Resultat	45
7.2.1 Minskning av klinkerinnehåll	45
7.2.2 Sammanställning av miljöpåverkande faktorer	46
7.3 Slutsats	46
8. Referenser	47

Bilagor

- 1. Recept och den färska betongens egenskaper**
- 2. Hållfasthetskurvor och betongtemperaturkurvor**
- 3. Värmeutveckling**
- 4. Byggvarudeklaration, yttre miljö-Cement**

1. Bakgrund

Tillverkning av cementklinker innebär stora koldioxidutsläpp, främst orsakade av kalcineringen av den kalksten som ingår i Portlandcement. Dagens befintliga standardcement innehåller ca 95 % cementklinker och 5 % mald kalksten. I och med Sveriges medlemskap i EU har de svenska cementnormerna ändrats och anpassats efter Europas. Detta har gjort det möjligt att använda nya sammansättningar av cement, som tidigare var förbjudna i Sverige.

Portlandkalkstencement(PK-cement) är ett numera tillåtet cement, i vilket man får använda upp till 20 % mald kalksten. Detta innebär att cementklinkerhalten minskar och det leder i sin tur till att koldioxidutsläppen minskar. Cementa AB har i och med detta börjat utveckla ett PK-cement som är anpassat till svenska förhållande och som i framtiden skall kunna ersätta en viss andel av dagens befintliga standardcement.

Innan en lansering av ett svensktillverkat PK-cement är aktuell, sker ett stort utvecklingsarbete där olika sammansättningar och deras egenskaper provas. Detta examensarbete utgör en liten del av detta utvecklingsarbete.

Då det är tänkt att PK-cementet på längre sikt skall kunna ersätta Std P-cementet för vissa produkter, är det lämpligt att göra en direkt jämförelse mellan de två cementen med avseende på olika egenskaper. Intressanta egenskaper att studera är hållfasthetsutveckling, värmeutveckling samt färska betongens reologi.

Det skall dock poängteras att det PK-cement som använts i detta examensarbete, inte är den slutprodukt som kommer att lanseras på marknaden. Examensarbetet utgör dock ett steg i arbetet med att hitta den rätta cementsammansättningen.

2. Syfte

Syftet med detta examensarbete är att jämföra ett Portlandkalkstencement med ett befintligt Std P-cement, med avseende på följande egenskaper.

1. Den färska betongens egenskaper

I samband med gjutningen av betongkuber mäts sättmått, lufthalt och vattenseparation.

2. Hållfasthetsutveckling

Genom att mäta hållfastheten och värmeutvecklingen hos betongkuber, erhålls tendenskurvor för betonger med olika vct.

3. Relativ reaktionshastighet bestämd ur hållfasthetsutveckling

Genom att lagra betongkuberna vid olika temperaturer erhåller man den relativa reaktionshastigheten.

4. Värmeutveckling

Undersökning av värmeproduktionen hos cementbruksprover med varierande vct med kalorimeter, ger värmeutvecklingen hos de båda cementen.

5. Relativ reaktionshastighet bestämd ur värmeutveckling

Genom att undersöka värmeutvecklingen vid olika konstanta temperaturer erhålls den relativa reaktionshastigheten.

6. Miljöaspekter

En kartläggning görs för de miljömässiga aspekterna.

Ytterligare ett syfte av mera vetenskaplig karaktär, har varit att undersöka sambandet mellan hållfasthetsutveckling och värmeutveckling.

3. Portlandkalkstencement

3.1 Allmänt

Portlandkalkstencement (PK-cement) innehåller som namnet antyder en stor andel kalksten jämfört med ett Standard Portlandcement (Std P-cement). Kalkstenshalter på upp till 20 procent av cementets huvudbeståndsdelar är tillåtna.

PK-cement är dock ingen nytvecklade produkt utan det har funnits och brukats sedan lång tid tillbaka i vissa delar av Europa, främst i Frankrike. I Sverige har det dock inte varit tillåtet att använda denna typ av cement, enligt de bestämmelser som gällt. Följande tre cementklasser fanns enligt de gamla bestämmelserna, B 1 /9/.

Portlandcement (P)

Modifierad portlandcement (M)

Blandcement (B)

I modifierad portlandcement och blandcement ingår mineraliska tillsatsmaterial, men dessa måste vara antingen hydrauliska eller puzzolanska, t ex flygaska eller granulerad masugnsslagg. I och med att kalksten inte uppfyller något av dessa krav, var det förbjudet att använda Portlandkalkstencement.

I och med att de svenska normerna under senare år har anpassats till de europeiska, är det nu tillåtet att använda sig av PK-cement även i Sverige. Följande tabell visar dagens svenska standard för cementsammansättning, (SS 13 42 01):

Tabell 3.1 Cementklassificering enligt SS 13 42 01. Viktprocent ¹⁾; /5/.

Cementtyp	Benämning	Beteckning	Huvudbeståndsdelar				Mindre beståndsdelar ²⁾
			Klinker K	Slagg S	Kalksten L	Flygaska V	
I	Portlandcement	CEM I	95-100	-	-	-	0-5
II	Portland slaggcement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	0-5
	Portland flygaskacement	CEM II/A-V	80-94	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	21-35	0-5
	Portland kalkstencement	CEM II/A-L	80-94	-	6-20	-	0-5
Portland kalkstenslagg cement	CEM II/A-LS	80-94	6-20		-	0-5	
III	Slaggcement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	0-5

1) I relation till summan av huvudbeståndsdelar och mindre beståndsdelar.

2) Mindre beståndsdelar får vara filler eller en eller flera av huvudbeståndsdelarna såvida dessa inte ingår som huvudbeståndsdelar i cementet.

Det finns dock enligt SS 13 42 01 kap 7, vissa restriktioner när det gäller användandet av PK-cement. Det är enbart tillåtet att användas i följande miljöklasser.

A1 Obetydligt armeringsaggressiv miljö

A2 Måttligt armeringsaggressiv miljö

B1 Obetydligt betongaggressiv miljö

B2 Måttligt betongaggressiv miljö

Vid användning i miljöklass B2 bör dessutom förundersökning utföras innan PK-cement får användas..

3.2 Tillverkning

Tillverkningen av Portlandkalkstencement är i stort sett likadan som av Standardportlandcement. Det som skiljer dem åt är proportionerna av bränd klinker och inmalad kalksten, där PK-cementet får innehålla en mindre mängd klinker och en större mängd kalksten, se tabell 3.1.

Även malningen skiljer. PK-cement mals till en större specifik yta. Detta krävs för att cementet skall bli lika reaktivt som ett Std P-cement.

3.3 Materialdata jämförda med Std P-cement

Allmänna data

Två olika cement har använts till samtliga försök i detta examensarbete. Följande tabell ger grundläggande fakta om dessa båda cement. Uppgifterna har lämnats av tillverkaren Cementa AB

	PK	Std P
Beteckning	CEM II/A-L	CEM I
Hållfasthetsklass	42,5 R ¹⁾	42,5 R ¹⁾
Kalkstensinnehåll	13 %	5 %
Tillverkningsort	Skövde	Skövde
Tillverkningsdatum	980206	980121
Förpackning	Plåtfat	Säck

1) Beträffande kraven på hållfasthet, se sid 6.

Samtliga materialdata som redovisas nedan i detta kapitel är resultat erhållna vid provning vid Scancem Research AB, Slite. Resultaten avser de aktuella cement som använts i detta arbete.

Kemisk sammansättning

Cementets kemiska sammansättning i de båda cementen bestäms med hjälp av röntgenspektrometri och anges i viktprocent.

	PK	Std P
CaO	61,7 %	62,9 %
SiO₂	18,2 %	19,0 %
Al₂O₃	5,05 %	5,06 %
Fe₂O₃	2,74 %	2,84 %
MgO	1,14 %	1,18 %

Sulfathalt

Sulfathalten anges i form av viktprocent SO₃ och indikerar i huvudsak hur stor mängd gips som tillsats vid tillverkningen Enligt SS 13 42 01 får inte sulfathalten överstiga 4,0 % för de aktuella cementtyperna.

	PK	Std P
SO₃	3,43 %	3,76 %

Glödförlust

Glödförlusten bestäms genom upphettning av cementen till 950°C. Den procentuella viktminskning som då erhålls utgör glödförlusten. Denna består av fuktavgång samt koldioxidavgång från inmalad kalksten. Enligt SS 13 42 01 får glödförlusten ej överstiga 5,0 % för Std P-cementet. För PK-cementet finns inga krav. Nedan redovisas glödförlust och koldioxidavgång för de aktuella cementen. Provtagningen är utförd då cementen har lagrats 10 - 12 månader i avd. byggnadsmaterials laboratorium. PK-cementet har lagrats i plåtfat och Std P-cementet i säck.

	PK	Std P
Glödförlust	5,34 %	3,05 %
CO₂-avgång	4,80 %	2,04 %

Glödförlusten indikerar om ett cementet är fuktskadat och/eller om det innehåller kalksten.

Bindetid

Bindetiden avser den tid det tar för en blandning av cement och vatten att uppnå en viss grad av tillstyvnad. Den mäts med det så kallade Vicatprovet vilket visar inträngningen av en vicatnål i cementpastan. Enligt SS 13 42 01 måste bindetiden överstiga 45 minuter.

	PK	Std P
Bindetid	160 min	140 min

Volymbeständighet

Volymbeständighet undersöks med Le Chatelier-provet, där svällningen hos cementpastan mäts efter kokning i vatten. Mätningen visar om cementet innehåller en skadlig mängd fri kalk eller magnesiumoxid. Svällningen mäts som ett utslag hos två metallnålar som fästs vid provet. Den får ej överstiga 10 mm.

	PK	Std P
Volymbeständighet	0,0 mm	0,5 mm

Specifik yta

Den specifika ytan är ett mått på cementets finhet och uttrycks i enheten m^2/kg . Den bestäms med Blaine-metoden som grundar sig på att det finns ett samband mellan luftmotståndet i en materialbädd och den totala ytan av de korn som bildar bädden. Ju större den specifika ytan är desto finare är cementkornen.

	PK	Std P
Specifik yta	440 m^2/kg	365 m^2/kg

Tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten hos cementet bestäms på provkroppar av cementbruk. Detta cementbruk består av en viktandel cement och tre viktandelar standardsand, och har vct = 0,5. Tryckhållfastheten beräknas som medelvärdet av sex prover. Proverna består av prismor med dimensionerna 40 x 40 x 160 mm, vilka belastas vinkelrätt mot längdriktningen med tryckplattor som är 40 x 40 mm. Provningen sker vid fyra olika tidpunkter 1, 2, 7 samt 28 dygn efter gjutning. Kraven för hållfasthetsklass 42,5 R är följande

2 dygn	$f_c \geq 20,0 \text{ MPa}$
28 dygn	$42,5 \leq f_c \leq 62,5 \text{ MPa}$

Följande tabell visar de aktuella cementens medeltryckhållfasthet.

	PK	Std P
1 dygn	22,2 MPa	19,3 MPa
2 dygn	34,3 MPa	31,4 MPa
7 dygn	45,0 MPa	45,5 MPa
28 dygn	54,4 MPa	56,2 MPa

3.4 Slutsats

Det som skiljer de båda cementtyperna åt, förutom kalkstensinnehållet, är specifika ytan och glödförlusten. På grund av längre malningstid får PK-cementet en större specifik yta, vilket erfordras för att det skall bli lika reaktivt som standardcementet. Den större glödförlusten hos PK-cementet förklaras av det högre kalkstensinnehållet, vilket medför att mera koldioxid avges vid upphettning till 950 °C.

PK-cementet har en något snabbare hållfasthetsutveckling under de två första dyggen. Std P-cementet har dock en högre 28-dygns hållfasthet, vilket torde bero på att det innehåller mera cementklinker och därmed genererar mera cementgel.

4. Hållfasthetsutveckling

4.1 Mognadsgradsbegreppet

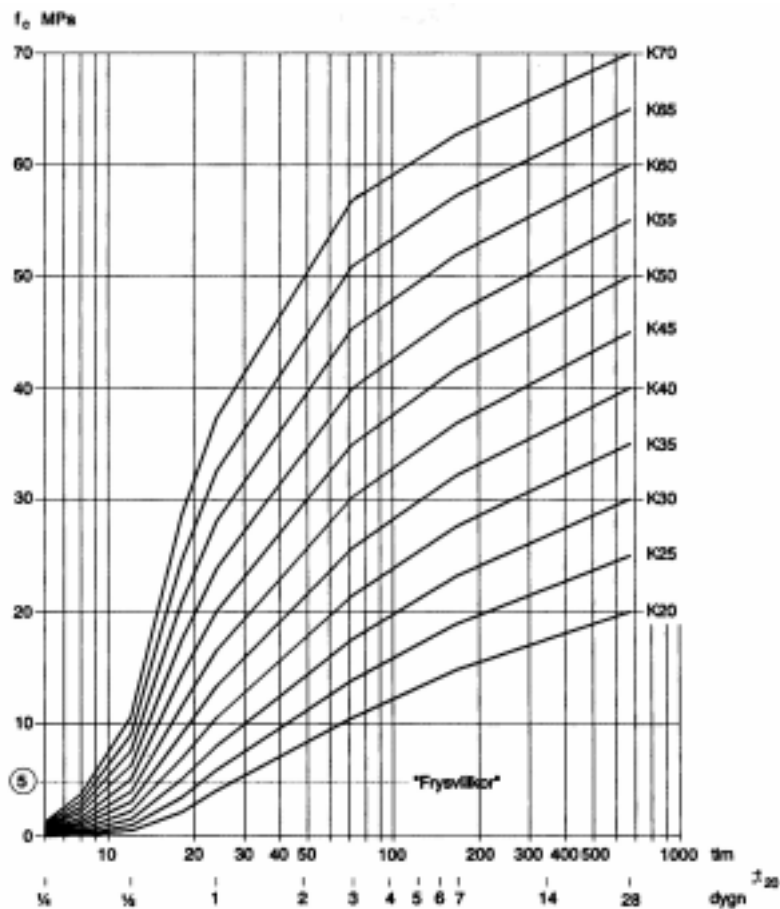
Hållfastheten hos en nygjuten konstruktion ute i fält bedöms genom mätning av temperaturutvecklingen i betongen. Det finns nämligen ett klart samband mellan temperaturutveckling och hållfasthetstillväxt i betong. Sambandet beror på betongkvaliteten och cementsorten.

Hållfasthetstillväxt vid konstant referenstemperatur +20°C

Hållfasthetskurvan som erhålls vid en konstant referenstemperatur av +20°C kallas för betongens *tendenskurva*. Betongåldern i en tendenskurva kallas *mognadsålder* och betecknas t_{20} . En betong som nått en viss hållfasthet anses ha nått en viss *mognadsgrad*. Ju högre mognadsålder, desto högre mognadsgrad.

Tendenskurvor för betonger med de vanligaste svenska cementtyperna har upprättats av Cements AB. Kurvorna är framtagna enligt normenlig provning, där lagringstemperaturen är +20°C och proven är vattenlagrade de 5 första dygna.

Följande figur visar tendenskurvan för ett Std P-cement.



Figur 4.1 Tendenskurva för betong med svenskt Std P-cement, de första 28 dygna; /2/.

Hållfasthetstillväxt vid andra konstanta temperaturer än +20°C

Eftersom cementreaktionen är temperaturberoende, kommer hållfastheten att växa snabbare än tendenskurvan när temperaturen är högre än +20°C och långsammare när temperaturen är lägre än +20°C. Detta temperaturberoende beskrivs med följande formel.

$$k_{\theta} = v_{\theta}/v_{20}$$

k_{θ} = Relativa reaktionshastigheten vid $\theta^{\circ}\text{C}$

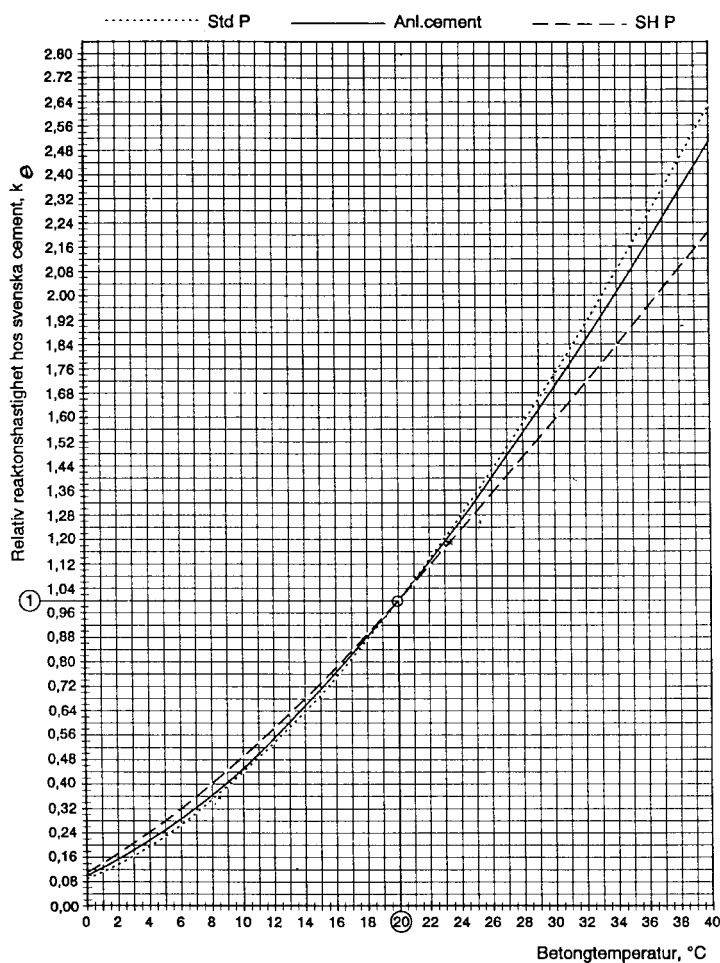
v_{θ} = Reaktionshastigheten vid $\theta^{\circ}\text{C}$

v_{20} = Reaktionshastigheten vid 20°C

För vanligt portlandcement kan den relativa reaktionshastigheten beräknas med följande förenklade empiriska formel, /1/.

$$k_{\theta} = [(\theta + 10) / 30]^2$$

där k_{θ} är den relativa reaktionshastigheten vid temperaturen $\theta^{\circ}\text{C}$. Följande figur visar k_{θ} för svensktillverkade cement.



Figur 4.2 Relativa reaktionshastigheten hos svenska cement; /6/.

Man kan ställa sig frågande till varför SH P-cement enligt figuren har en lägre relativ reaktionshastighet vid höga temperaturer än Std P-cement, när det har samma kemiska sammansättning som standardcementet. Kurvorna i figur 4.2 har baserats på mätningar genomförda vid LTU. Nyare undersökningar tyder på att Std P och SH P har ungefär samma temperaturberoende.

Genom användning av den beräknade relativa reaktionshastigheten k_θ kan man justera skalan på tidsaxeln, samtidigt som man bibehåller hållfasthetsaxeln konstant. Justeringen av tidsskalan görs med hjälp av följande samband.

$$t_\theta/t_{20} = 1/k_\theta$$

där

t_θ = Betongåldern vid $\theta^\circ\text{C}$

t_{20} = Betongåldern vid 20°C

Tiden t_{20} kallas för den *ekvivalenta tiden*, d v s den tid som erfordras för att nå samma hållfasthet om temperaturen hela tiden varit $+20^\circ\text{C}$ som den hållfasthet som erhållits vid temperaturen $\theta^\circ\text{C}$ efter tiden t_θ . Detta gör att t_{20} ofta betecknas t_e eller t_{ekv} .

Hållfasthetstillväxt vid variabel temperatur

I praktiken varierar betongtemperaturen med tiden. Man delar därför upp tid-temperaturkurvan i n stycken tidsintervall Δt inom vilket medeltemperaturen antas vara konstant $\theta^\circ\text{C}$. Varje tidsintervall ger då ett bidrag till den ekvivalenta tiden som är $\Delta t_{20} = k_\theta \cdot \Delta t$. Den totala ekvivalenta tiden erhålls sedan med hjälp av följande formel.

$$t_{20} = \sum_1^n k_\theta \cdot \Delta t$$

Om den matematiska funktionen för tid-temperaturkurvan är känd används istället följande formel.

$$t_{20} = \int_1^n k_\theta(t) \cdot dt$$

För beräkning av den ekvivalenta tiden t_{20} används lämpligen en tabell med följande kolumner.

Tidsintervall	Medeltemperatur	relativ reaktionshastighet	Ekvivalent tid
Δt	θ	k_θ	$\Delta t_{20} = k_\theta \cdot \Delta t$

Den totala ekvivalenta tiden fås genom att summera Δt_{20} kolumnen.

4.2 Hållfasthetsprovningar, allmänt

Delstudien syftade till att jämföra hållfasthetsutvecklingen hos PK-cementet med det befintliga standardcementet. De cement som användes är desamma som beskrevs i kapitel 3. De övriga delmaterial som användes är följande.

Grus, Åstorp	0- 8 mm
Kvartsit, Hardeberga	8-12 mm
Kvartsit, Hardeberga	12-16 mm

De recept som provades bygger på att vattenhalten hålls relativt konstant medan cementhalten ändrades för att variera vct. Cementhalten varierade från 200 kg/m³ till 350 kg/m³.

Hållfastheten mättes i form av kubtryckhållfasthet enligt SS 13 72 10 där kubens sidor är 150 mm.

Kuberna lagrades vid olika temperaturer för att man skulle kunna få fram den relativa reaktionshastigheten k_0 . De lagringstemperaturer som användes är +5°C, +20°C och +30°C. Dessa omgivningstemperaturer har åstadkommit med hjälp av klimatkammare och värmeskåp. Följande tabell visar schematiskt de gjutningar som utförts. Siffrorna i temperaturkolumnerna visar antalet kuber.

Tabell 4.1 Betongtyper och lagringstemperaturer.

Cement	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	vct	+ 5°C	+20°C	+30°C
PKC	200	170	0,85	10	20	10
PKC	230	185	0,80		10	
PKC	260	195	0,75		20	
PKC	290	195	0,67		10	
PKC	320	195	0,61		10	
PKC	350	200	0,57	10	20	10
Std P	200	170	0,85		20	
Std P	260	195	0,75	10	20	10
Std P	350	200	0,57		20	

Vid lagringen av proverna mättes betongtemperaturen under de tre första dyggen. Detta gjordes med hjälp av termoelement som kopplades till en mät dator. Under hela lagringstiden var provkuberna klädda med plast, för att förhindra ett fuktutbyte med den omgivande luften.

Två kuber trycktes åt gången för att erhålla ett statistiskt medelvärde. De första trycktes så fort de uppnått en hållfasthet på ca 2-3 MPa. Därefter trycktes de med vissa tidsintervall. Kort tid passerade mellan tryckningarna under de första timmarna och längre tid vid högre ålder. De två sista provtryckningarna skedde vid 7 respektive 28 dygn.

4.3 Gjutning och provning

Betongrecept framgår av bilaga 1.

Dagen före gjutning hälldes gruset upp i en skottkärra som täcktes med plastfolie för att förhindra uttorkning. Fuktkvoten i gruset bestämdes genom att två skålar med ca 300 gram grus i varje vägdes upp, m_{20} . Därefter torkades de i ugn vid +105°C och slutligen vägdes det torra gruset, m_{105} . Fuktkvoten erhöles genom följande formel:

$$fuktkvot, u = \frac{\text{vikt. vatten}}{\text{vikt. torrt. material}} = \frac{m_{20} - m_{105}}{m_{105}}$$

Den vattenmängd som gruset innehöll räknades sedan bort från den totala vattenhalt enligt receptet innan vattnet tillsattes i blandaren.

Vid gjutningen vägdes de olika delmaterialen upp i enlighet med beräknade recept. Därefter placerades de torra materialen i en 150 liters tvångsblandare av fabrikat Sandby, se figur 4.3, och blandades ca 1 minut. Slutligen tillsattes vattnet och blandningen fortsatte ytterligare 3 minuter. Då blandningen avslutades gjordes följande mätningar på den färska betongen.



Figur 4.3 Sandbyblandaren (150 liter).

Lufthalt, se figur 4.4, mättes enligt SS 13 71 24 direkt efter avslutad blandning.



Figur 4.4 Lufthaltsmätare.

Sättmått, se figur 4.5, mäts enligt SS 13 71 21 direkt efter blandning samt efter 1 timme.



Figur 4.5 Mätning av sättmått.

Vattenseparation, se figur 4.6, mäts enligt SS 13 71 27 och avslutades ca 2 timmar efter blandning.



Figur 4.6 Mätning av vattenseparation.

Utöver dessa mätningar av den färska betongens egenskaper, göts de kuber som gav hållfasthetsutvecklingen. Kubformar med en sidolängd på 150 mm användes, se figur 4.7. Då kubformen var fylld med betong och vibrerad, jämnades ytan av och formen täcktes in med plast. De kuber som man mätte temperaturutvecklingen i försågs med termoelement. Dessa stacks ner i betongen så att de mätte temperaturen mitt i kuben.



Figur 4.7 Kubform 150 mm.

När gjutningen var klar och samtliga kuber försetts med plast, placerades de i det klimat som föreskrivits. För att uppnå en konstant omgivande temperatur på +5 grader användes klimatrum, +30 grader erhöles genom användning av värmeskåp. +20 grader erhöles genom placering i normal rumstemperatur.

Termoelementen kopplades till en mätdator, som lagrade temperaturen var tionde minut under de tre första dygnen. Ett termoelement mätte också den omgivande temperaturen.

Bestämning av hållfastheten gjordes enligt SS 13 71 10. Efter avformningen mättes kuberna med hjälp av skjutmått. De vägdes också i samband med tryckningen för att erhålla betongens densitet. Tryckningen utfördes i en kubpress, se figur 4.8, där man erhöles brottlasten i kN.

Hållfastheten erhöles sedan med följande formel:

$$\text{tryckhållfasthet. } f_c = \frac{\text{brotlast}}{\text{tvärsnittsarea}} = \frac{F_u}{A}$$

där enheten för tryckhållfasthet är MPa.



Figur 4.8 Kubpress.

4.4 Korrigering av erhållna hållfasthetskurvor

För att erhålla jämförbara mätvärden korrigerades den verkliga tiden så att man erhöi diagram över hållfastheten som funktion av tiden vid given temperatur, t ex +5, +20 och +30°C. Detta gjordes för att eliminera inverkan av att betongtemperaturen inte varit exakt +5, +20 resp. +30°C under härdningsförloppet.

Tidskorrigeringen erhöiis genom att tiden under de tre första dyggen delades upp i intervall om 2 timmar. Därefter bestämdes medeltemperaturen i betongen under dessa intervall. Temperaturer erhöiis ur termoelementen.

Följande formler användes för korrigeringen:

1. Önskad konstant temperatur +5°C

$$t_5 = \sum k'_\theta \cdot \Delta t \quad k'_\theta = \frac{((\theta + 10)/30)^2}{((5 + 10)/30)^2} = \left(\frac{\theta + 10}{15}\right)^2$$

2. Önskad konstant temperatur +20°C

$$t_{20} = \sum k_\theta \cdot \Delta t \quad k_\theta = [(\theta + 10) / 30]^2$$

3. Önskad konstant temperatur +30°C

$$t_{30} = \sum k''_\theta \cdot \Delta t \quad k''_\theta = \frac{((\theta + 10)/30)^2}{((30 + 10)/30)^2} = \left(\frac{\theta + 10}{40}\right)^2$$

4.5 Resultat

4.5.1 Färsk betong

Resultat av mätningar på färsk betong redovisas i bilaga 1.

De mått som tagits på den färska betongens egenskaper är sättmått, lufthalt samt vattenseparation. För beskrivning av arbetsutförandet hänvisas till kapitel 4.3. Följande tabell visar en sammanställning av de resultat som erhållits:

Tabell 4.2 Färska betongens egenskaper.

Cement	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	vct	Sättmått	Sättmått	Lufthalt (%)	Vattensep.
				(mm) 0 min	(mm) 60 min		(%) 120 min
PKC	200	170	0,85	30	10	1,70	0,17
PKC	230	185	0,80	55	30	2,10	0,47
PKC	260	195	0,75	60	30	1,50	0,37
PKC	290	195	0,67	70	25	1,70	0,44
PKC	320	195	0,61	60	40	1,40	0,18
PKC	350	200	0,57	60	25	0,70	0,17
Std P	200	170	0,85	60	0	1,50	0,15
Std P	260	195	0,75	60	60	1,50	0,80
Std P	350	200	0,57	60	40	1,80	0,31

Resultaten visar att PK-cementet ej behöver högre vattenhalt för att erhålla samma egenskaper hos den färska betongen som Std P-cementet. Detta innebär således att cementhalten inte behöver ökas vid gjutning med PK-cement. Åtminstone inte med tanke på den färska betongens egenskaper.

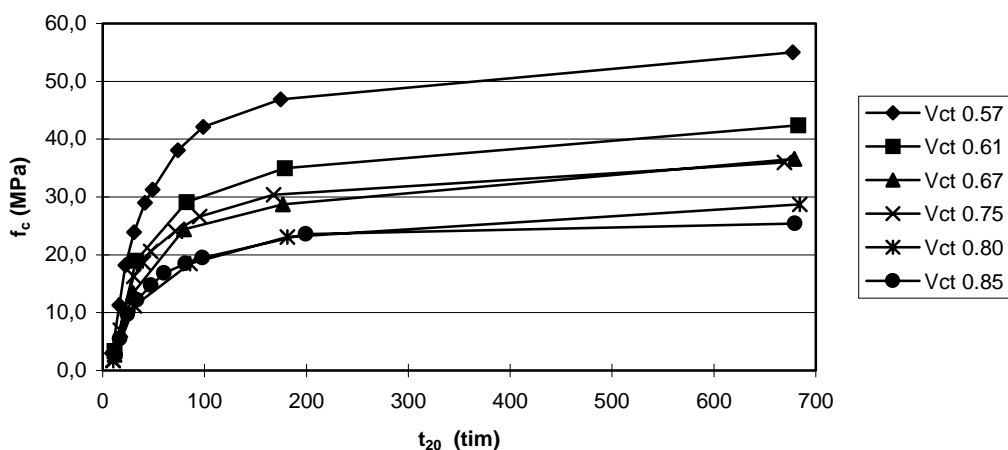
4.5.2 Hållfasthetsutveckling

Detta avsnitt redovisar de undersökningar av hållfasthetstillväxt som utförts. Samtliga resultat är korrigerade enligt avsnitt 4.4 med avseende på temperaturutvecklingen i betongen. Detta för att erhålla jämförbara resultat.

En utförligare beskrivning av hållfasthetsutvecklingen hos de enskilda blandningarna återfinns i bilaga 2.

PK-cement, lagring vid +20°C

Följande figur visar hållfasthetstillväxten hos betongen med PK-cement vid lagring i exakt +20°C.



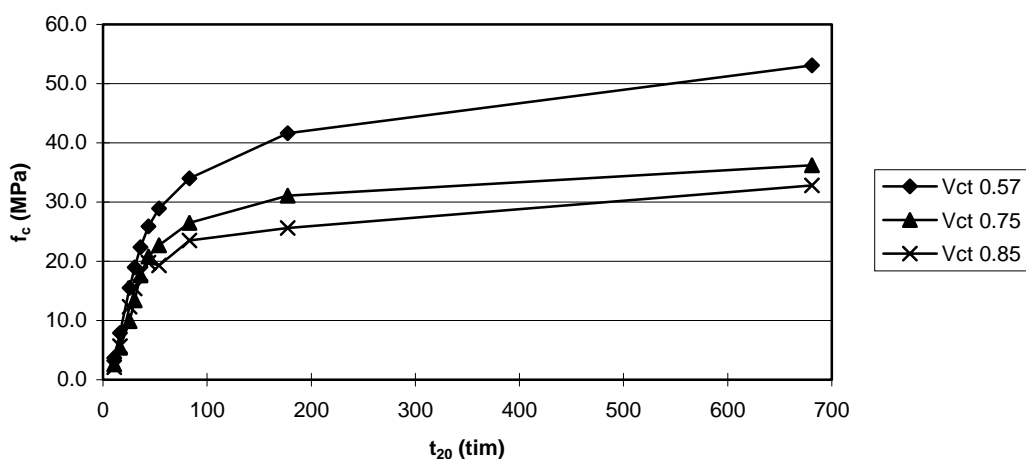
Figur 4.9 Hållfasthetsutveckling PK-cement +20°C.

Betongerna med vct 0,61, 0,67 samt 0,80 göts då PK-cementet var ca 9 månader gammalt, medan de övriga göts då cementet var ungt. Figur 4.9 visar att samtliga betonger som göts med det gamla cementet har ca 5 MPa lägre hållfasthet än vad de borde ha haft med tanke på de mätningar som gjordes 6 månader tidigare. Eftersom tillvägagångssättet vid mätningar och lagring inte skiljer sig mellan de olika gjuttillfällena, kan man anta att det hänt något med cementet när det åldrats.

Någon direkt förklaring till vad skillnaden i hållfasthet skulle kunna bero på har dock inte varit möjligt att undersöka inom ramen för detta examensarbete.

Std P-cement, lagring vid +20°C

Följande figur visar hållfasthetstillväxten hos betongen med Std P-cement vid exakt +20°C.

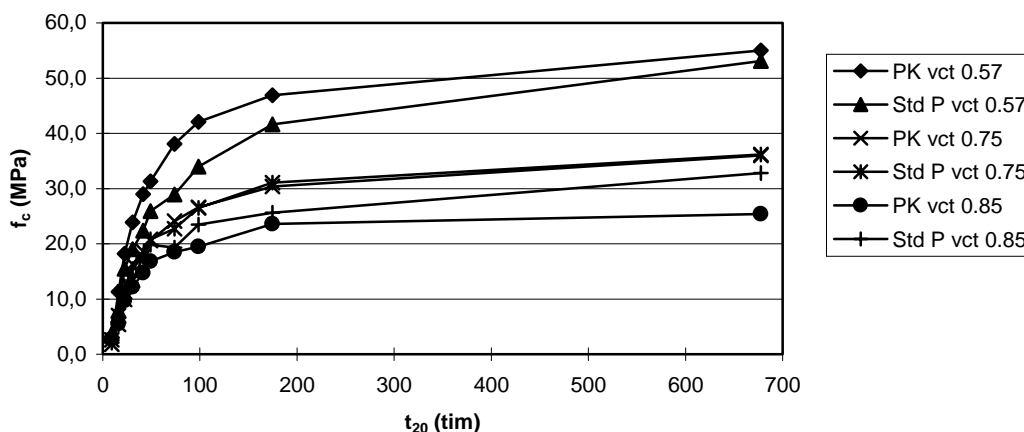


Figur 4.10 Hållfasthetsutveckling Std P-cement +20°C.

Samtliga betonger i figur 4.10 göts då cementet var ungt. Kurvorna överensstämmer väl med normala tendenskurvor för Std P-cement.

Jämförelse mellan PK-cement och Std P-cement, lagring +20°C

I figur 4.11 jämförs hållfasthetsutvecklingen hos PK-cementet med Std P-cementet vid +20°C. Samma betongrecept har använts till de båda cementen.

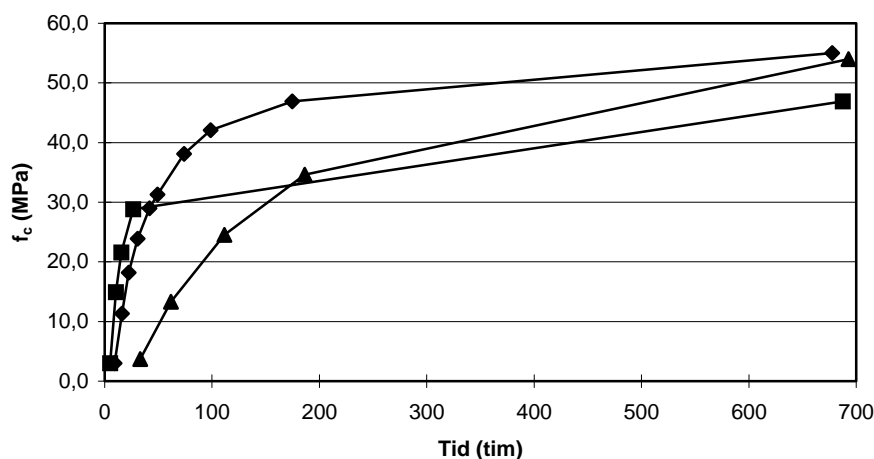


Figur 4.11 Hållfasthetsutveckling PK-cement vs Std P-cement +20°C.

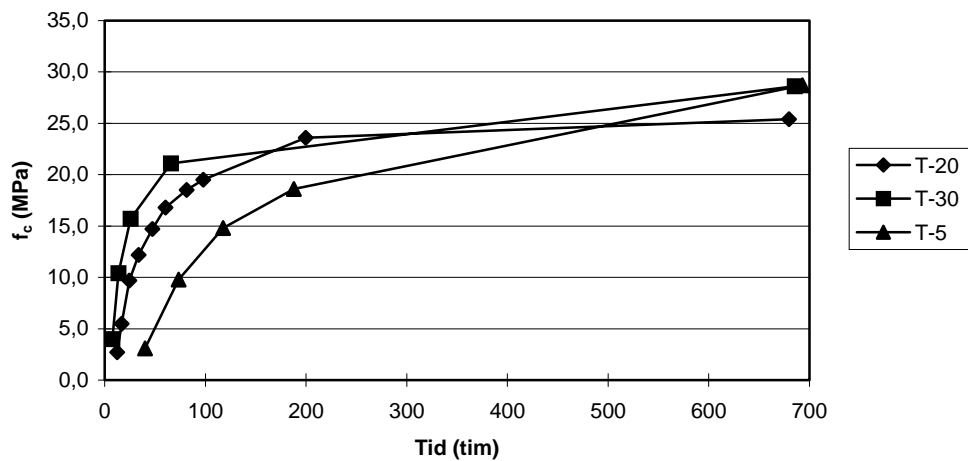
Figur 4.11 visar att PK-cementet ger ungefär samma hållfasthetsutveckling som standardcementet vid samma vct. Mätningarna visar dock att PK-cementet vid låga vct (hög cementhalt) ger något högre hållfasthet än Std P-cementet vid konstant tid. Motsatt förhållande gäller vid höga vct (låg cementhalt). Om detta är ett generellt beteende eller om det slumpmässigt blivit så, är omöjligt att säga eftersom försöksmaterialet är tämligen begränsat.

PK-cement vct 0,57 och vct 0,85, olika lagringstemperatur

I figurerna 4.12 och 4.13 visas hållfasthetsutvecklingen hos två betonger, med vct 0,57 och vct 0,85, tillverkade med PK-cement. Betongerna lagrades vid tre olika temperaturer: +5°C, +20°C samt +30°C.



Figur 4.12 Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0,57. +5°C, +20°C, +30°C.

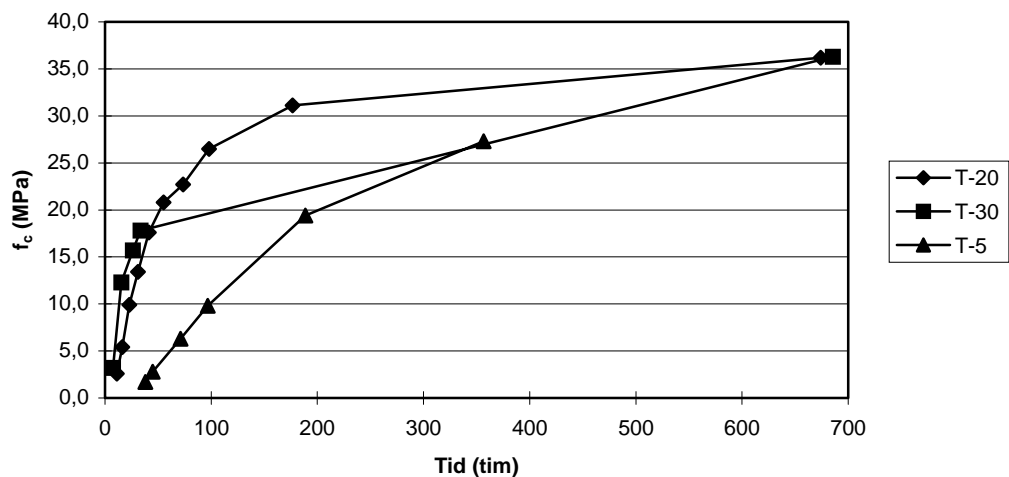


Figur 4.13 Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0,85. +5°C, +20°C, +30°C.

Figurerna visar som väntat (se figur 4.2) att hållfasthetsutvecklingen sker snabbare vid +30°C, och långsammare vid +5°C, än vid +20°C. Dessutom visar figur 4.12 att 28 dygnshållfastheten vid lagring i +30°C är lägre än vid lagring i +20°C.

Std P-cement vct 0,75, olika lagringstemperatur

I figur 4.14 visas hållfasthetsutvecklingen hos en betong med vct 0,75, tillverkat med Std P-cement. Betongen lagrades vid tre olika temperaturer: +5°C, +20°C samt +30°C.



Figur 4.14 Hållfasthetsutveckling Std P-cement vct 0,75. +5°C, +20°C, +30°C.

28-dygnshållfastheten saknas för +5°C eftersom kuberna förbrukades redan under de första dagarna. Hållfasthetsvärdena är dock tillräckligt många för att man skall kunna räkna ut den relativa reaktionshastigheten k_0 .

4.5.3 Relativ reaktionshastighet beräknad ur hållfasthetsutveckling

För beräkning av den relativa reaktionshastigheten k_{θ} , används hållfasthetsutvecklingen vid olika lagringstemperatur. Genom att avläsa mognadsåldern vid en given godtycklig hållfasthetsnivå kan man räkna ut k_5 och k_{30} för de olika cementen. Detta görs genom användning av följande formler.

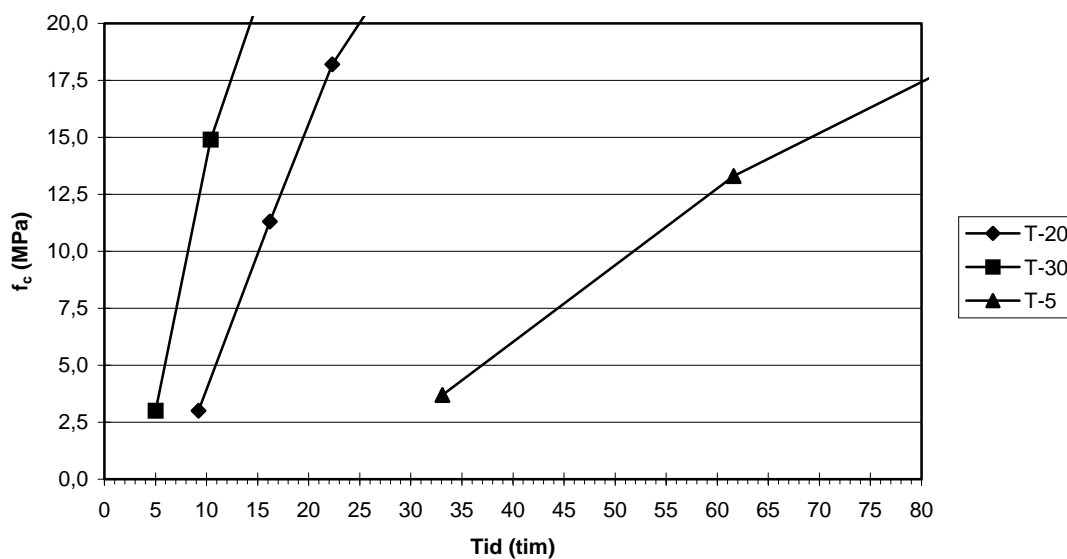
$$k_5 = \frac{t_{20}}{t_5}$$

$$k_{30} = \frac{t_{20}}{t_{30}}$$

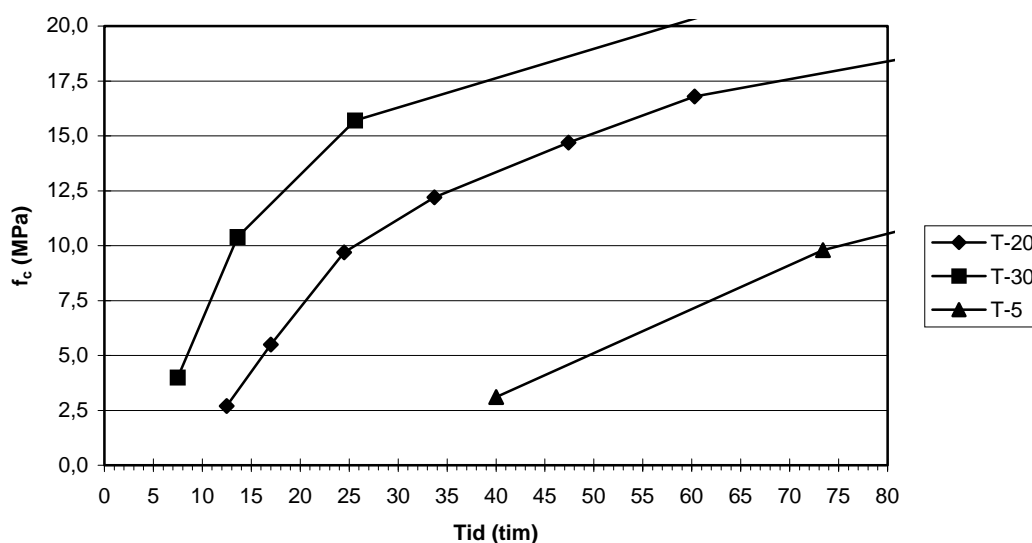
där t_5 , t_{20} och t_{30} är de tider (tim) som erfordras för att nå en given godtycklig hållfasthet.

PK-cement

I figurerna 4.15 och 4.16 visas hållfasthetsutvecklingen under de första 60 timmarna för betongerna i figurerna 4.12 och 4.13.



Figur 4.15 Hållfasthetsutveckling 0-80 tim, PK-cement vct 0,57.



Figur 4.16 Hållfasthetsutveckling 0-80 tim, PK-cement vct 0,85.

Följande tabell visar de relativa reaktionshastigheterna för PK-cementet. Värdena på mognadsåldern är direkt avlästa grafiskt ur figurerna 4.15 och 4.16 för hållfasthetsnivåerna 5,0, 7,5 och 10,0 MPa. .

Tabell 4.3 Relativa reaktionshastigheter hos PK-cement.

vct	Hållf. nivå	t ₃₀ tim	t ₂₀ tim	t ₅ tim	k ₃₀	k ₅
0,57	5,0 MPa	6,0	11,0	37,0	1,83	0,30
	7,5 MPa	7,0	13,0	44,5	1,86	0,29
	10,0 MPa	8,5	15,5	52,0	1,82	0,30
				Medel	1,84^{1)±0,02²⁾}	0,30±0,01
0,85	5,0 MPa	8,5	16,5	49,5	1,94	0,33
	7,5 MPa	11,0	20,5	62,0	1,86	0,33
	10,0 MPa	13,0	25,5	75,0	1,96	0,34
				Medel	1,92±0,05	0,33±0,01

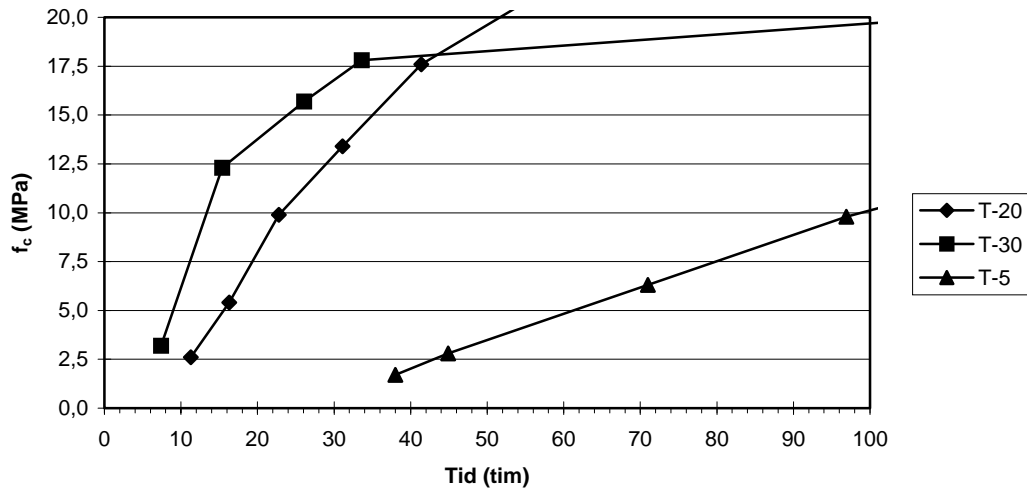
1) Medelvärde

2) Standardavvikelse

Tabell 4.3 visar att den relativa reaktionshastigheten är oberoende av vct

Std P-cement

Följande figur visar hållfasthetsutvecklingen under de första 100 timmarna för betongen i figur 4.14.



Figur 4.17 Hållfasthetsutveckling 0-100 tim, Std P-cement vct 0,75.

Följande tabell visar de relativa reaktionshastigheterna för Std P-cementet. Värdena på mognadsåldern är direkt avlästa grafiskt ur figur 4.17 för hållfasthetsnivåerna 5,0, 7,5 och 10,0 MPa. .

Tabell 4.4 Relativa reaktionshastigheter hos Std P-cement.

vct	Hållf. nivå	t ₃₀ tim	t ₂₀ tim	t ₅ tim	k ₃₀	k ₅
0,75	5,0 MPa	9,0	15,5	61,0	1,72	0,25
	7,5 MPa	11,0	19,0	79,5	1,73	0,24
	10,0 MPa	13,5	23,0	98,5	1,70	0,23
Medel					1,72¹⁾±0,02²⁾	0,24±0,01

1) Medelvärde

2) Standardavvikelse

Dessa värden stämmer väl överens med de relativa reaktionshastigheter för standardcement som fås enligt figur 4.2.

Tabell 4.5 Relativa reaktionshastigheter hos Std P-cement enligt figur 4.2.

k ₃₀	k ₅
1,74	0,24

4.6 Slutsatser av hållfasthetsmätningar

Ur hållfasthetssynpunkt märks ingen större skillnad mellan de båda cementen. Det är svårt att säga om de små skillnader som erhöles är generella eller om de är slumpmässiga. Vidare provningar bör därför utföras.

En vidare undersökning av hur hållfastheten påverkas av PK-cementets ålder skulle vara intressant, eftersom samtliga gjutningar som gjorts ett halvt år efter de första ger lägre hållfasthet än de första gjutningarna.

Den relativa reaktionshastigheten, k_0 tycks vara något högre hos PK-cement än hos standardcement. Även i detta fall har alltför få försök utförts för att man skall kunna säkerställa denna observation. Vad som är väsentligt är dock att reaktionshastigheten ej tycks vara lägre än hos standardcementet.

Vad det gäller den färskas betongens egenskaper så visar de få provningar som utförts i detta arbete att skillnaderna mellan de båda cementen är marginella. Det skall dock tilläggas att det ej skett någon optimering av betongsammansättningen ur reologisk synpunkt. Därför bör man göra ytterligare provningar av PK-cementets påverkan på den färskas betongens egenskaper, och dess samverkan med olika tillsatsmedel.

Sammanfattningsvis kan man alltså konstatera att en övergång från standardcement till PK-cement, inte skulle innebära en försämring vad det gäller de egenskaper som studerats i detta kapitel.

5. Värmeutveckling

5.1 Allmänt

När cement reagerar med vatten utvecklas värme. Denna frigjorda värme är av stor betydelse när det gäller hållfasthetsutvecklingen i betongen. Hög värmeutveckling är ett tecken på en snabbare hållfasthetstillväxt.

I examensarbetet jämfördes värmeutvecklingen hos PK-cementet med Std P-cementet. Dessutom bestämdes den relativa reaktionshastigheten med utgångspunkt från värmeutvecklingshastigheten. Denna relativa reaktionshastighet kan sedan jämföras med den som erhöles ur hållfasthetsutvecklingen.

Det finns många olika metoder att mäta värmeutveckling. I detta fall användes en isoterm värmeledningskalorimeter, S6, som beskrivs i kapitel 5.2. Mätningen av värmeutveckling bygger på isoterm kalorimetri där värme leds bort ifrån provkroppen till en värmesänka (heat sink), i vilken temperaturen är i stort sett konstant. Även betongtemperaturen är således i stort sett konstant under försöket.

Mätningen baseras på temperaturskillnaden mellan provkropp och värmesänka. Genom att multiplicera denna temperaturskillnad, som registreras som en spänning, U (V), med en kalibreringskoefficient, ϵ (W/V) erhålls den av cementet avgivna värmeeffekten, P (W). Kalibreringskoefficienten ϵ anger sambandet mellan värmefflöde och temperaturdifferens.

Då provkropparnas storlek begränsas av kalorimeterns utformning användes cementbruk i stället för betong. Som ballastmaterial användes grus 0-8 mm.

För att erhålla den relativa reaktionshastigheten k_0 placerades kalorimetern i två olika klimatrum med temperaturerna $+8^\circ\text{C}$ och $+23^\circ\text{C}$.

Flyttillsats, Glenium 51, användes i 2 blandningar för att se vilken inverkan den har på värmeutvecklingen. Följande tabell visar schematiskt de blandningar som gjorts för att mäta värmeutvecklingen. Fullständiga recept redovisas i kapitel 5.3.

Tabell 5.1 Variabler i värmeutvecklingsförsök.

Cement	vct	C (kg/m ³)	+ 8°C	+23°C
PKC	0.50	502	X	X
PKC	0,60	437		X
PKC	0,70	387		X
PKC + flvt	0,50	500		X
Std P	0,50	502	X	X
Std P	0,60	437		X
Std P	0,70	387		X
Std P + flyt	0.50	500		X

5.2 Studentkalorimetern S6

Studentkalorimetern är utvecklad av Lars Wadsö, Byggnadsmaterial LTH, /10/. Den består av sex aluminiumkoppor som är placerade kring en referenskopp på en värmesänka av aluminium fylld med vatten, se figur 5.1. Mellan varje kopp och värmesänkan sitter tre termoelementplattor som registrerar värmeflödet. Även termoelement för att mäta temperaturen i värmesänkan och i omgivande luft finns. Under mätningen isoleras kalorimetern med ett skal av 50 mm tjock cellplast som skyddar mot variationer i den omgivande luftens temperatur.



Figur 5.1 Studentkalorimetern S6.

För datainsamling används en åttakanalig termoelementlogger TC-08 från Pico Technology Ltd, och en PC med programmet PicoLog for Windows. Genom programmet kan man ställa in mätningens tidsintervall och antalet mätkanaler. Dessutom redovisas aktuella mätvärden grafiskt direkt på bildskärmen. Resultatet kan sedan tas ut i form av Excel-filer för vidare redigering.

Nackdelen med studentkalorimetern är att den ej har någon termostat som håller en exakt konstant temperatur på värmesänkan. Detta gör att temperaturen i värmesänkan stiger något då värme utvecklas i kopporna. Under de aktuella mätningarna har temperaturen i värmesänkan ökat max 0,8°C under en mätning. Temperaturökningen är dock så liten att försöket kan antas vara isotermt.

5.3 Recept

I detta avsnitt presenteras de cementbruksrecept som användes i värmeutvecklingsförsöket. Tre olika recept användes, där vct varierades från 0,50 till 0,70. Ytterligare ett recept med inblandning av flyttillsats användes. I samtliga recept antogs att lufthalten var 2,0 %. Ingen vattenreduktion pga fukt i gruset gjordes eftersom gruset torkades i 105°C innan det användes. Följande tabell ger de exakta proportionerna för cementbruksrecepten.

Tabell 5.2 Cementbruksrecept. Samma recept användes för båda cementtyperna.

vct	Cement (kg)	Vatten (kg)	grus 0-8 (kg)	Flyttillsats 1% (kg)	Cementhalt (kg/m ³)
0,50	1,000	0,500	3,000	-	502
0,60	0,800	0,480	2,800	-	437
0,70	0,643	0,450	2,571	-	387
0,50 flyt	1,000	0,500	3,000	0,010	500

De recept som redovisats användes både för PK-cementet och Std P-cementet.

5.4 Arbetsutförande

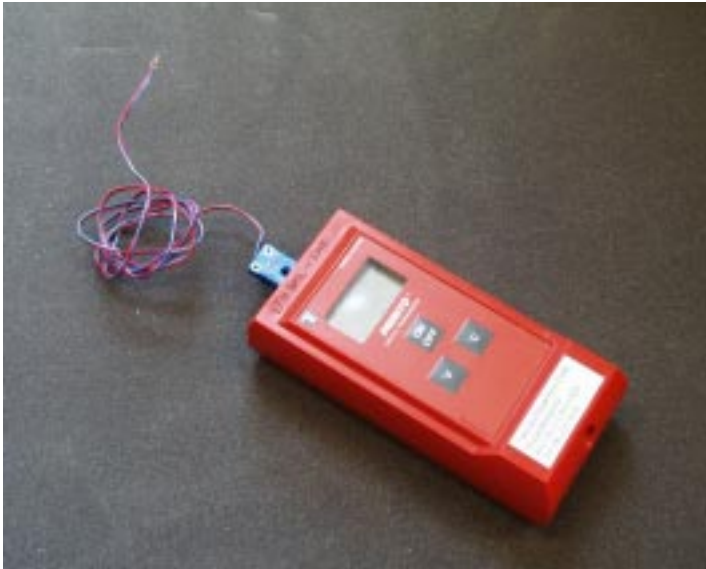
Kalorimetern placerades i det aktuella klimatet ca 1 dygn före mätningen så att värmesänkan erhöll samma temperatur som den omgivande luften. Även delmaterialen placerades i detta klimat för att cementbruksblandningens temperatur skulle överensstämma med värmesänkans.

Blandningen skedde i en cementbruksblandare, se figur 5.2. Det torra materialet vägdes upp i blandningskärlet och blandades i ca 1 minut. Därefter tillsattes vattnet och blandningen fortsatte i ytterligare 3 minuter. I de fall flyttillsatsmedel användes tillsattes detta efter ca 1 minut av 3-minuters blandningen.



Figur 5.2 Cementbruksblandare.

Efter avslutad blandning mättes cementbrukets temperatur med en digitaltermometer, se figur 5.3. Denna uppmätta temperatur skulle då ligga i närheten av kalorimeterns. Det färdigblandade cementbruket vägdes sedan upp i plastpåsar med $300 \pm 0,5$ gram i varje. Tre provkroppar vägdes upp till varje mätning. Dessa försågs med ytterligare en plastpåse för att minska risken för avdunstning eller läckage av blandningsvatten, och placerades därefter i kalorimetern



Figur 5.3 Digitaltermometer

Kalorimetern startades ca 30 minuter före blandningen för att erhålla spänningsutslaget från de tomma kopporna. Denna bakgrundsspänning subtraherades sedan från de uppmätta värdena. Mätningen pågick under ca 2 dygn.

5.5 Beräkningsgång

Mätdata erhöles i form av excel-filer som innehåller följande parametrar:

- Tid (s)
- Spänning Prov 1 (mV)
- Spänning Prov 2 (mV)
- Spänning Prov 3 (mV)
- Kalorimetertemperatur (°C)
- Rumstemperatur (°C)

För att få jämförbara och rättvisande resultat användes de mätvärden som ligger inom tidsintervallet 1-41 timmar räknat från det proven blandades och placerades i kalorimetern. Detta gör att redovisade resultat gäller från ca 1 timma efter blandning. Därmed undviks alla störningar som förekommer i början. Detta innebär emellertid också att de allra första cementreaktionerna inte kommer med

De tre provens spänningsvärden reducerades med den bakgrundsspänning som de tomma kopporna gav. Därefter beräknades en medelspänning för de tre proven. Denna multiplicerades med kalibreringskoefficienten ϵ (W/V).

Kalibreringskoefficienten hade i dessa försök värdet $19,4 \pm 0,9$ W/V, och var framtagen av Lars Wadsö genom särskilda kalibreringsförsök med prov som avgav känd effekt.

Den erhållna effektkurvan integrerades sedan med avseende på tiden, varvid värmeutvecklingen erhöles i kJ. Genom att dividera med viktandelen cement i blandningen erhöles värmeutvecklingen i kJ per kg cement, vilken kan användas för en jämförelse mellan de båda cementen.

5.6 Resultat

De resultat som redovisas i detta avsnitt baseras på recepten i avsnitt 5.3. De mätningar av värmeutvecklingen som gjorts finns redovisade i tabell 5.1.

OBS. Mätningarna gjordes då cementen var 9 månader gamla, d v s cementen kan ha haft en viss negativ åldring, se avsnitt 4.5.2.

5.6.1 Värmeutveckling

Effekt- och värmeutvecklingen hos de enskilda blandningarna finns redovisade i bilaga 3. Detta avsnitt redovisar sammanställningar och jämförelser för de olika blandningarna.

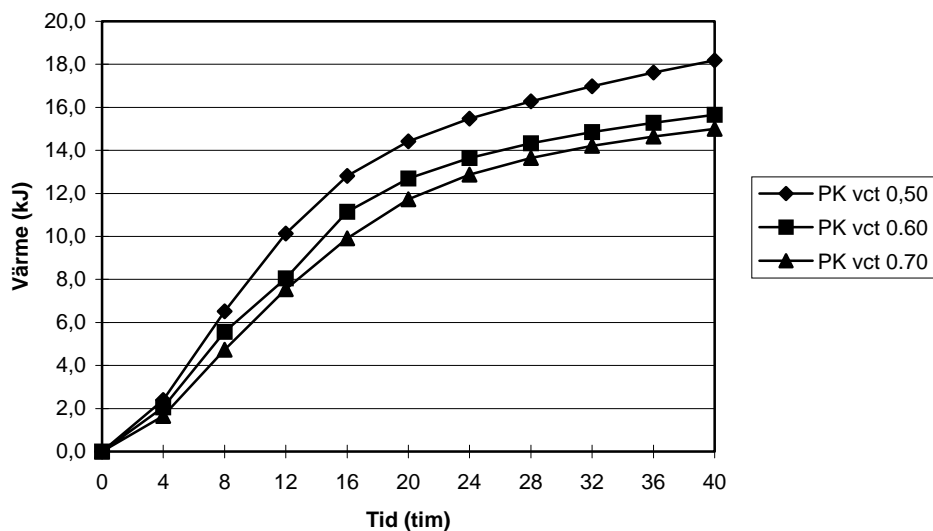
Följande tabell redovisar cementbrukets temperatur direkt efter blandning, uppmätt med en digitaltermometer. Som synes avviker verklig temperatur något från önskvärd.

Tabell 5.3 Blandningstemperaturer.

Prov	Temp (°C)	Prov	Temp (°C)
PK vct 0,50 +23°C	24,1	Std P vct 0,50 +23°C	23,4
PK vct 0,60 +23°C	23,0	Std P vct 0,60 +23°C	23,1
PK vct 0,70 +23°C	22,9	Std P vct 0,70 +23°C	23,1
PK vct 0,50flyt +23°C	23,1	Std P vct 0,50flyt +23°C	23,6
PK vct 0,50 +8°C	11,3	Std P vct 0,50 +8°C	11,1

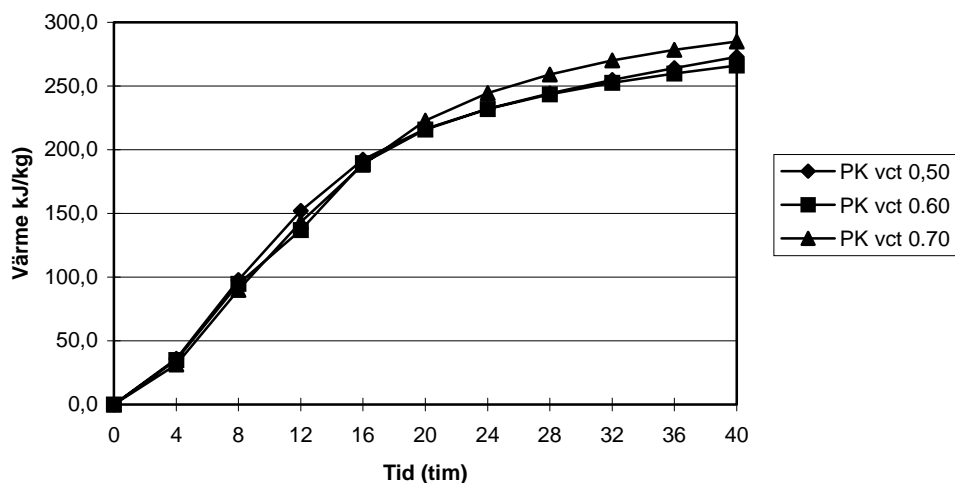
PK-cement

I figur 5.5 visas totala värmeutvecklingen i kJ hos de cementbruk med PK-cement som provats vid ca +23°C.



Figur 5.5 Värmeutvecklingen hos cementbruk baserat på PK-cement vid ca 23°C.

Figuren visar att värmeutvecklingen uttryckt i kJ ökar när vct sänks, vilket är rimligt eftersom cementhalten ökar. I figur 5.6 visas värmeutvecklingen i kJ per kg cement för samma blandningar.

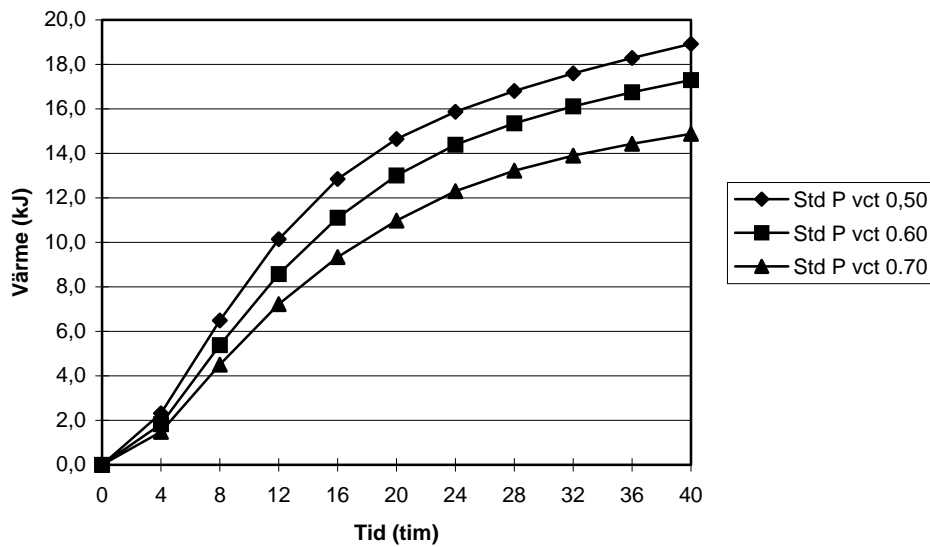


Figur 5.6 Värmeutvecklingen per kg cement hos PK-cement vid ca 23°C.

Figuren visar att värmeutvecklingen är ungefär densamma när de uttrycks i kJ per kg cement. Det är intressant att notera att vct inte har någon betydelse för värmeutvecklingen, vilket troligen beror på att provet är isotermt.

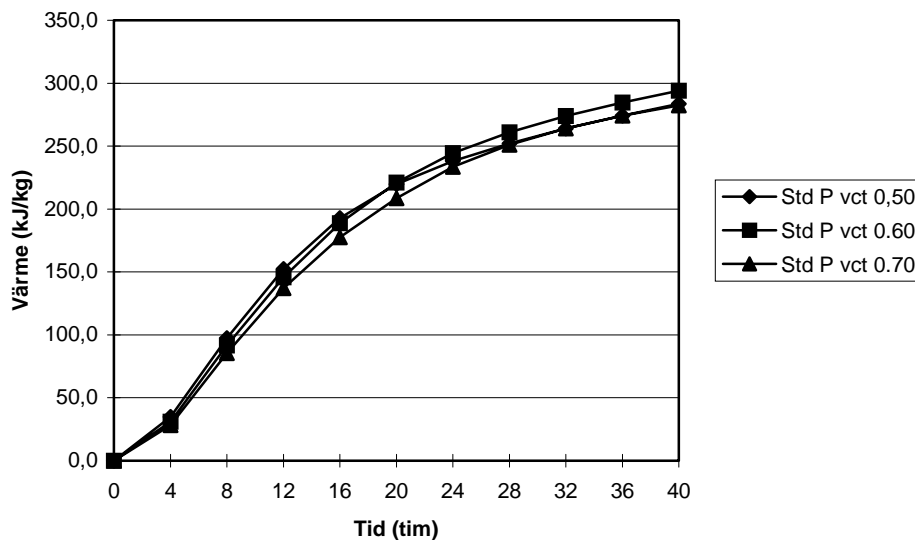
Std P-cement

I figur 5.7 visas värmeutvecklingen för standardcementet vid ca 23°C.



Figur 5.7 Värmeutvecklingen hos cementbruk baserat på Std P-cement vid ca 23°C.

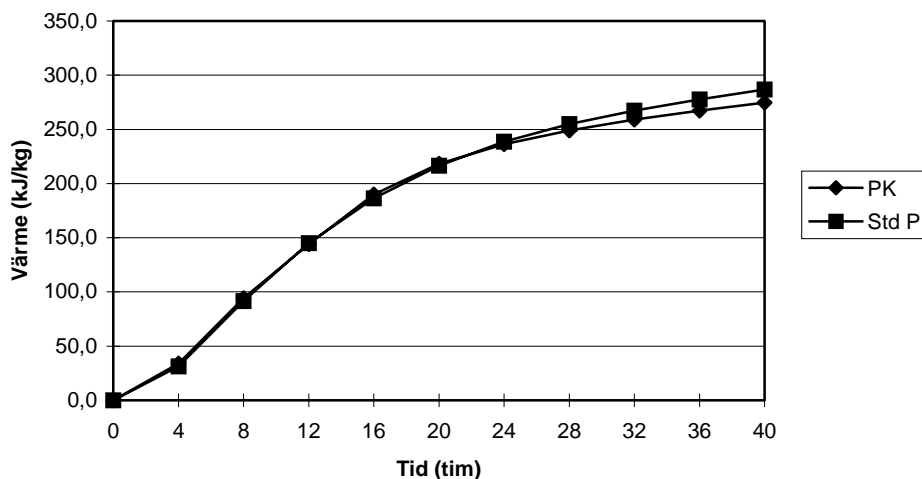
Även när det gäller detta cement så ökar värmeutvecklingen med ökad cementhalt, vilket kan förväntas. I figur 5.8 visas att även standardcementet har nästan samma värmeutveckling uttryckt i kJ per kg cement oberoende av cementhalten.



Figur 5.8 Värmeutvecklingen per kg cement hos Std P-cement vid ca 23°C.

Jämförelse mellan PK-cement och Std P-cement

Jämförelsen av de båda cementen baseras på resultaten i figur 5.6 och 5.8. Ett medelvärde av de tre kurvorna har beräknats för vardera cementet. Följande figur visar jämförelsen mellan dessa två medelkurvor.



Figur 5.9 Värmeutvecklingen per kg cement hos PK- och Std P-cement vid ca 23°C.

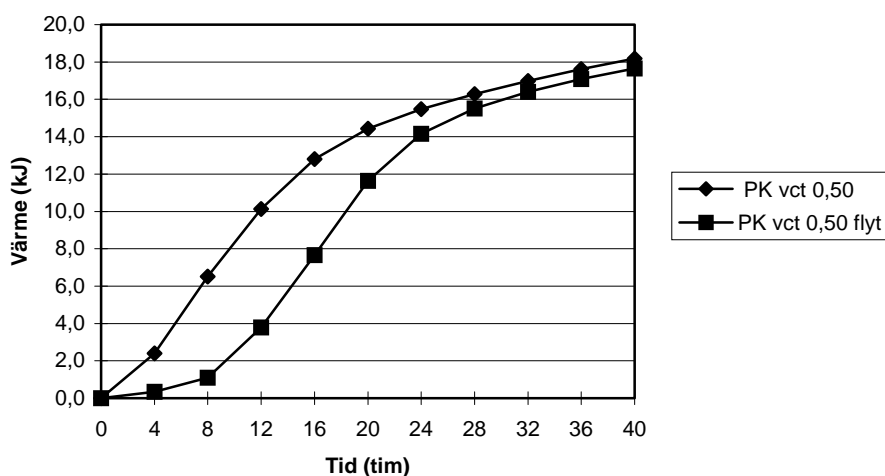
Cementens värmeutveckling följs åt upp till ca 24 timmar, därefter ökar värmeutvecklingen hos standardcementet något snabbare än hos PK-cementet.

Flyttillsatsmedels inverkan på värmeutvecklingen

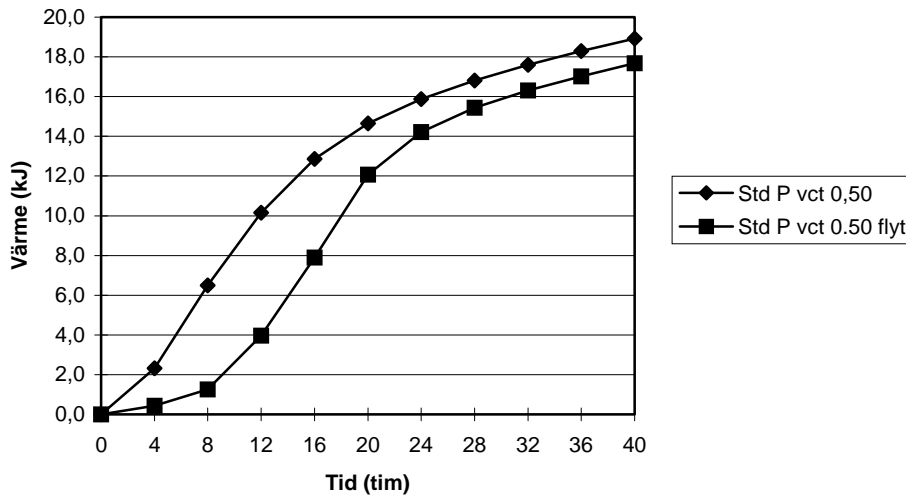
Vid inblandning av flyttillsatsmedel i betong, utan att vattenhalten minskas, erhåller man en ökad arbetbarhet samt en retarderande effekt på tillstyvnandet.

Kalorimeterprovingen syftade till att undersöka om denna retardation även förekommer när det gäller värmeutveckling, och om så var fallet, hur stor den var.

Följande två figurer visar resultaten av mätningarna vid ca 23°C för PK- respektive Std P-cementet.



Figur 5.10 Flyttillsatsmedels inverkan på värmeutvecklingen för PK-cement.



Figur 5.11 Flyttillsatsmedels inverkan på värmeutvecklingen för Std P-cement.

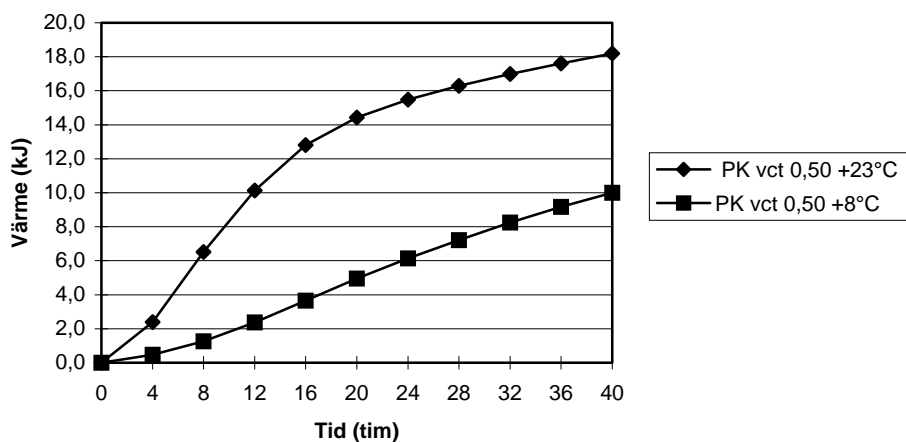
I båda fallen kan man konstatera att värmeutvecklingen förskjuts med ca 7 timmar. Efter ca 24 timmar är värmeutvecklingen i stort sett densamma som hos blandningen utan flyttillsats. Den har dock ett något lägre totalvärde vid 24 timmar och även vid 40 timmar, vilket visar att flyttillsatsens retarderande effekt finns kvar efter lång tid. Orsaken till detta har inte behandlats inom examensarbetets ram.

5.6.2 Relativ reaktionshastighet beräknad ur värmeutveckling

Liksom för hållfasthetsutvecklingen kan man för värmeutvecklingen beräkna den relativa reaktionshastigheten genom att även bestämma värmeutvecklingen vid en annan temperatur, i detta fall $+8^{\circ}\text{C}$.

PK-cement

I figur 5.12 visas värmeutvecklingen för PK-cementet vid $+8^{\circ}\text{C}$ samt $+23^{\circ}\text{C}$.



Figur 5.12 Värmeutveckling för PK-cement vid $+8^{\circ}\text{C}$ och $+23^{\circ}\text{C}$.

På samma sätt som i kapitlet om hållfasthetsutveckling läser man av tiderna vid en viss nivå på utvecklad värme. I detta fall läses värdena t_8 och t_{23} av grafiskt vid värmeutvecklingen 2,0, 4,0 och 6,0 kJ. Man erhåller då följande resultat.

Tabell 5.4 Tidsrelationen t_{23}/t_8 hos PK-cement.

vct	Värmeutv. nivå	t_{23} tim	t_8 tim	t_{23}/t_8
0,50	2,0 kJ	3,5	11,0	0,32
	4,0 kJ	5,5	17,0	0,32
	6,0 kJ	7,5	23,5	0,32
Medel				$0,32^{1)} \pm 0,00^{2)}$

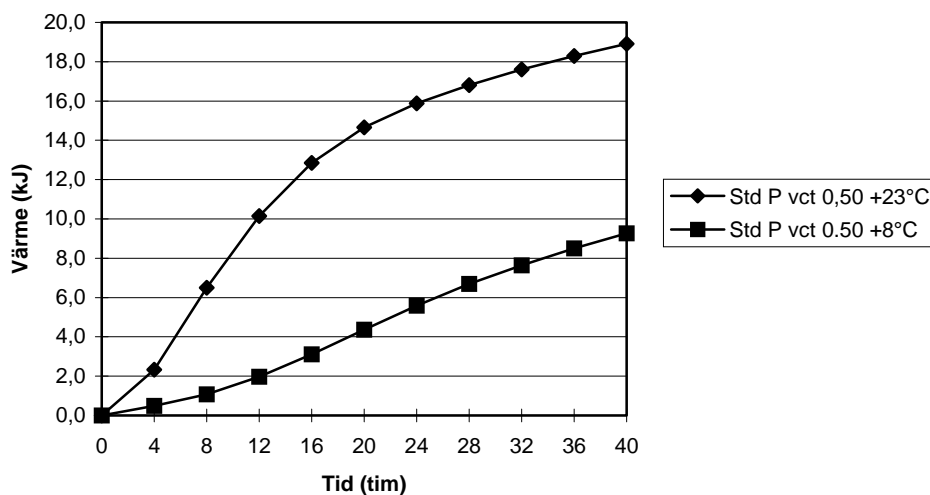
1) Medelvärde

2) Standardavvikelse

Värdet 0,32 för PK-cement, enligt tabell 5.4, motsvarar för Std P-cement enligt figur 4.2 ur hållfasthetssynpunkt värdet $\frac{0,34}{1,22} = 0,28$

Std P-cement

I figur 5.13 visas värmeutvecklingen för Std P-cementet vid +8°C samt +23°C.



Figur 5.13 Värmeutveckling för Std P-cement vid +8°C och +23°C.

Samma beräkningsgång som för PK-cementet används. Tabell 5.5 visar resultatet av beräkningen.

Tabell 5.5 Tidsrelationen t_{23}/t_8 hos Std P-cement.

vct	Värmeutv. nivå	t_{23} tim	t_8 tim	t_{23}/t_8
0,50	2,0 kJ	3,5	12,5	0,28
	4,0 kJ	5,5	19,0	0,29
	6,0 kJ	7,5	25,5	0,29
Medel				0,29±0,01

Som visats tidigare ger figur 4.2 för Std P-cement ur hållfasthetssynpunkt värdet 0,28, dvs i stort sett samma värde.

5.7 Slutsatser av värmeutvecklingsmätningar

Studentkalorimetern S6 är en lättanvänd kalorimeter som snabbt och lätt ger värmeutvecklingen hos den provkropp man testar. De provningar som utförts i samband med detta examensarbete har givit rimliga resultat, om man jämför med följande värmeutvecklingsvärden som Cementa anger i sin produktkatalog.

Tabell 5.6 Värmeutveckling enligt Cementas datablad och enligt denna undersökning.

Cementtyp	Värmeutveckling (kJ/kg)	
	1 Dygn (24 tim)	3 Dygn (72 tim)
Std P ¹⁾	230 kJ/kg	320 kJ/kg
Std P ²⁾	240 kJ/kg	Ej mätt
PK ²⁾	235 kJ/kg	Ej mätt

1) Enligt Cementas datablad ($C = x \text{ kg/m}^3$)

2) Enligt föreliggande undersökning

Man kan inte konstatera någon större skillnad mellan PK- och Std P-cement under det första dygnet. Därefter har standardcementet något högre värmeutveckling, vilket kan förklaras med att den eventuellt gynnsamma inverkan av kalkstenen i början av hydratationen avtar med tiden.

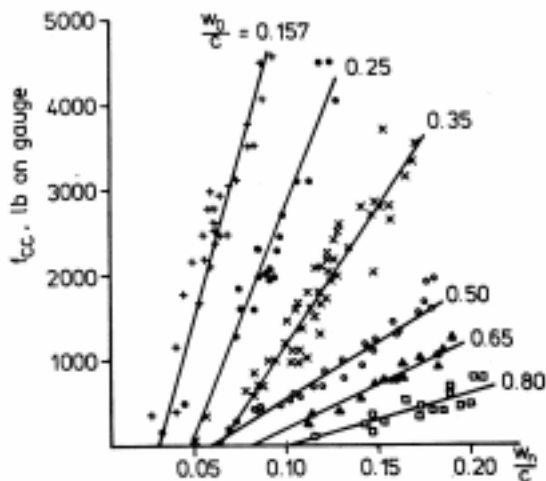
Användning av flyttillsatsmedel av typ Glenium, förorsakar en fördröjning av värmeutvecklingen med ca 7 timmar under de första 20 timmarna. Detta kan ha stor praktisk betydelse om man t ex eftersträvar snabb formrivning eller i samband med vinterbyggnation.

Den relativa reaktionshastigheten med avseende på värmeutveckling ger värden som är tämligen lika de värden som baserades på hållfasthetstillväxten. Detta tyder på ett klart samband mellan hållfasthetstillväxt och värmeutveckling. Ytterligare diskussion av detta samband görs i följande kapitel.

6. Samband mellan hållfasthetsutveckling och värmeutveckling.

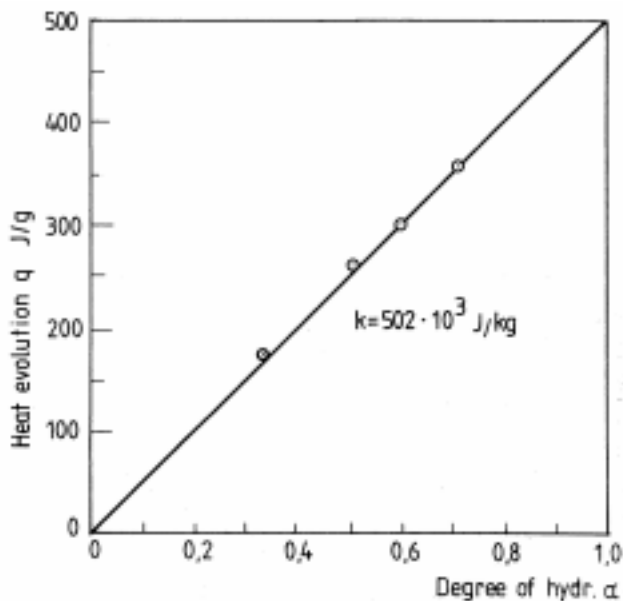
6.1 Allmänt

Detta kapitel är baserat på resultaten i kapitel 4 och 5. Avsikten är att undersöka om det finns något samband mellan hållfasthetsutvecklingen och värmeutvecklingen. Tidigare undersökningar som utförts, /13/, visar att det föreligger ett linjärt samband mellan hållfasthet och hydratationsgrad, se figur 6.1.



Figur 6.1 Samband mellan hållfasthet och kemiskt bunden vattenmängd W_b/C ;/13/.

Andra undersökningar som utförts, /4/, visar att det finns ett rätlinjigt samband mellan värmeutveckling och hydratationsgrad, se figur 6.2..



Figur 6.2 Samband mellan värmeutveckling och hydratationsgrad; /4/.

Detta innebär följaktligen att det bör finnas ett linjärt samband mellan värmeutveckling och hållfasthetsutveckling. Genom att plotta hållfasthetsstillväxten mot värmeutvecklingen vid givna tidsintervall, kan man se om denna proportionalitet förekommer även i de försök som gjorts i detta arbete.

6.2 Metodbeskrivning

Undersökningen bygger på att den genomsnittliga värmeutvecklingen vid +23°C, som visas i figur 5.9, plottas mot hållfasthetsutvecklingen vid konstant temperatur +20°C hos betongerna med vattencementtalen 0,57, 0,75 samt 0,85. Detta görs för båda cementtyperna. Data plottas för var 4:e timma med start 12 timmar efter gjutning och avslutning efter 40 timmar. Hållfasthetsvärdena har tagits fram genom grafisk avläsning av tendenskurvorna i bilaga 2.

6.3 Resultat

Det bör observeras att hållfasthetsutvecklingen baseras på en betongtemperatur som konstant är +20°C, medan kalorimetertemperaturen är +23°C. Man hade kunnat göra en justering av kalorimeterns data till +20°C. Detta erfordras dock inte i detta fall eftersom vi bara är intresserade av att se om det finns linjära samband.

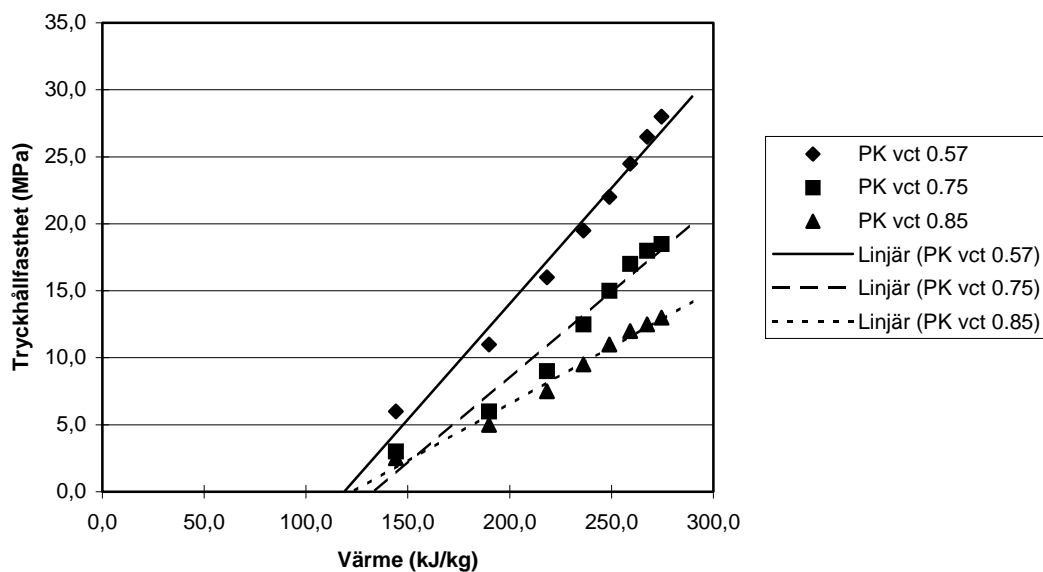
PK-cement

Använda data listas i tabell 6.1.

Tabell 6.1 Hållfasthetsutveckling och värmeutveckling hos PK-cement.

Tid tim	Värme kJ/kg	PK vct 0.57 MPa	PK vct 0.75 MPa	PK vct 0.85 MPa
12	144.1	6.0	3.0	2.5
16	189.9	11.0	6.0	5.0
20	218.3	16.0	9.0	7.5
24	236.2	19.5	12.5	9.5
28	249.0	22.0	15.0	11.0
32	259.1	24.5	17.0	12.0
36	267.4	26.5	18.0	12.5
40	274.6	28.0	18.5	13.0

I figur 6.3 visas hållfasthetsstillväxten hos PK-cementet som funktion av värmeutvecklingen.



Figur 6.3 Samband mellan hållfasthetsutveckling och värmeutveckling för PK-cement.

De räta linjerna i figur 6.1 är framtagna med hjälp av minsta-kvadratmetoden.

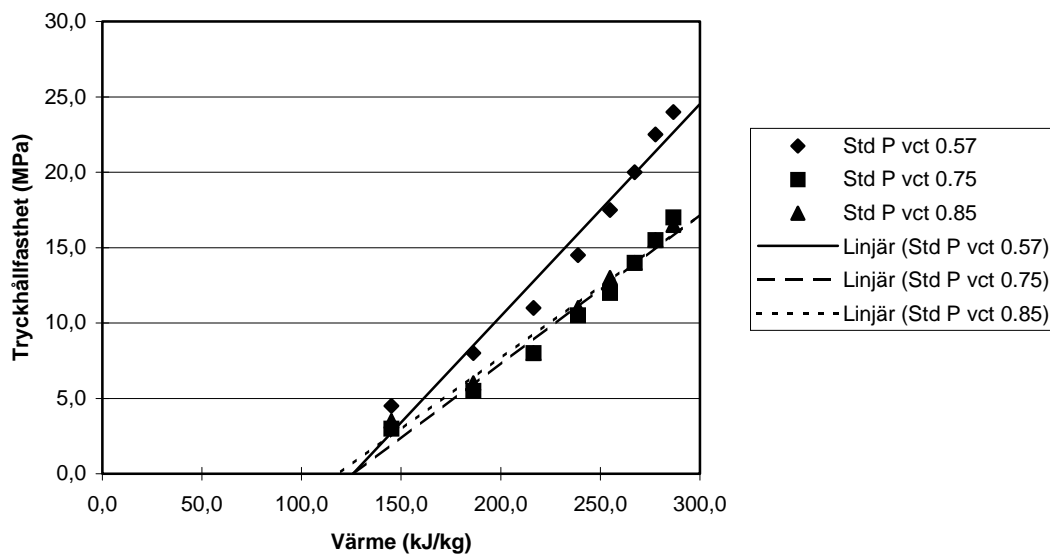
Std P-cement

Använda data listas i tabell 6.2.

Tabell 6.2 Hållfasthetsutveckling och värmeutveckling hos Std P-cement.

Tid tim	Värme kJ/kg	Std P vct 0.57 MPa	Std P vct 0.75 MPa	Std P vct 0.85 MPa
12	145.1	4.5	3.0	3.5
16	186.3	8.0	5.5	6.0
20	216.5	11.0	8.0	8.0
24	238.7	14.5	10.5	11.0
28	254.8	17.5	12.0	13.0
32	267.3	20.0	14.0	14.0
36	277.7	22.5	15.5	15.5
40	286.7	24.0	17.0	16.5

I figur 6.4 visas hållfasthetstillväxten hos Std P-cementet som funktion av värmeutvecklingen.



Figur 6.4 Samband mellan hållfasthetsutveckling och värmeutveckling för StdP-cement.

Även i detta fall har minsta-kvadratmetoden använts för att skapa de räta linjerna.

6.4 Slutsats

Sambanden mellan hållfasthet och värmeutveckling är tämligen linjära. Skärningen med x-axeln uttrycker den värmeutveckling man måste ha för att få hållfasthet. Denna är ca 125 kJ/kg för båda cementsorterna. Det förefaller dock som om mindre värme behövs utvecklas i PK-cement för att man skall få en viss hållfasthet. Detta visas av tabell 6.3.

Tabell 6.3 Erforderlig värmeutveckling för att nå en viss hållfasthet.

Cementtyp	vct	Erforderlig värmeutveckling (kJ/kg)		
		$f_c = 10 \text{ MPa}$	$f_c = 15 \text{ MPa}$	$f_c = 20 \text{ MPa}$
PK	0,57	180	215	240
	0,75	220	250	Ej mätt
	0,85	240	Ej mätt	Ej mätt
Std P	0,57	210	245	265
	0,75	235	275	Ej mätt
	0,85	235	275	Ej mätt

Den goda lineariteten mellan hållfasthet och värmeutveckling gör att man med enkla isoterma kalorimeterförsök approximativt kan bestämma hållfasthetstillväxten hos betong.

Det bör observeras att värmeutvecklingen har mätts på 9 månader gammalt cement och hållfasthetstillväxten på ungt cement. Detta bör inte påverka lineariteten men kanske linjernas lutning.

7. Miljöeffekter

7.1 Allmänt

Uppgifterna i detta kapitel är baserade på en byggvarudeklaration, se bilaga 4, för nu tillverkat Std P-cement, utgiven av Cementa AB 1998.

Kapitlets syfte är att utvärdera miljömässiga skillnader mellan nu tillverkat standardcement vid Cementas fabriker i Skövde och Slite och PK-cement. Cementen i analysen innehåller följande mängd kalksten.

Tabell 7.1 Kalkstenshalter i % av cementmängd exkl. gips.

Kalkstenshalt	
Std P	5 %
PK:1	10 %
PK:2	15 %
PK:3	20 %

7.2 Resultat

Resultaten i detta avsnitt innebär en jämförelse mellan befintligt standardcement och PK-cement. Därför har ingen konsekvensstudie av effekter av betongtillverkning eller brukarfas gjorts, eftersom de anses vara likvärdiga för de båda cementen.

7.2.1 Minskning av klinkerinhåll

I PK-cement ersätts en del av klinkern med kalksten. I den här analysen antas att minskningen av klinkerinhållet är direkt proportionell mot minskningen av de miljöpåverkande faktorer som påverkar den yttre miljön. Följande tabell redovisar minskningen av klinkerinhållet för de olika PK-cementen jämfört med standardcementet.

Tabell 7.2 Minskning av klinkerbehov.

	Std P	PK:1	PK:2	PK:3
Klinkerhalt	95 %	90 %	85 %	80 %
Kalkstenshalt	5%	10 %	15 %	20 %
Klinkerminskning	-	5,3 %	10,5 %	15,8 %

7.2.2 Sammanställning av miljöpåverkande faktorer

I tabell 7.3 visas de viktigaste miljöfaktorerna. De redovisade värdena är per ton producerat cement och är viktade medelvärden som tar hänsyn till hela kedjan från transport till depå. Tabellen baseras på en byggvarudeklaration för Std P-cement utgiven av Cementa AB 1998, se bilaga 4.

Tabell 7.3 Luftutsläpp och energiåtgång per producerat ton cement.

	Luftutsläpp			Energiåtgång		
	NO _x	SO ₂	CO ₂	El	Fossil	Rest
	kg	kg	kg	MJ	MJ	MJ
Std P	1,05	1,85	850	415	3480	720
PK:1	0,99	1,75	805	415	3295	680
PK:2	0,94	1,66	760	415	3115	645
PK:3	0,88	1,56	715	415	2930	605

Anledningen till att elanvändningen inte förbättras är att malenergin till cementkvarnen ökar vid tillverkning av PK-cement. Detta uppväger då den positiva effekten av minskad andel klinker när det gäller elanvändning.

De fossila bränslet vid klinkerproduktion antas bestå av 80 % kol och 20 % olja. Restbränslet består av återvinningsprodukter såsom kasserade bildäck.

7.3 Slutsats

Cementa AB producerar ca 1,2 miljoner ton standardcement per år för den svenska marknaden. Om all denna cement skulle ersättas med PK-cement skulle detta innebära att Cementas koldioxidutsläpp skulle minska enligt tabell 7.5.

Tabell 7.4 Minskning av koldioxidutsläpp.

	CO ₂ minskning per år
PK:1	54 000 ton
PK:2	108 000 ton
PK:3	162 000 ton

Även utsläppen av svaveldioxid och kväveoxider kommer att minska. Hur stor denna minskning blir är däremot svårt att uppskatta eftersom Cementa fram till 1999 utför ett omfattande miljöförbättringsprogram vid sin Slitefabrik. Detta program förväntas minska svaveldioxidutsläppen med 90 %, och kväveoxidutsläppen med 80 %.

8. Referenser

- /1/ Fagerlund, G, Kap.18. Kompendium i byggnadsmaterial FK, Pärm 2; LTH, 1997.
- /2/ Fagerlund, G, Vinterbetong - en översikt, Cementa AB, 1992.
- /3/ Fagerlund, G, Influence of slag cement on the frost resistance of the green concrete, CBI, Research Fo 3.83, 1983.
- /4/ Byfors, J, Plain concrete at early ages, CBI, 1980.
- /5/ Svensk Standard, SS 13 42 01, utgåva 1.
- /6/ Jonasson, J-E, Utvärdering av experimentella data genomförd vid Luleå Tekniska Högskola, 1992
- /7/ Czernin, W, Cementkemi för byggare, Svensk upplaga, Svenska Cementföreningen, 1969.
- /8/ Borgholm, H-E, Herfort, D, Rasmussen, S, Anew blended cement based on mineralised clinker, Ur World Cement, utgåva 8, 1995.
- /9/ B1 Statliga cementbestämmelser, utgåva 2, 1982.
- /10/ Wadsö, L, Design and performance of the S6 calorimeter, avdelningen byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-7129, 1998.
- /11/ Wadsö, L, The S1-calorimeter; eight student experiments with a simple isothermal calorimeter, Avdelningen byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-7123, 1998.
- /12/ Betonghandbok, Material, AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, 1994.
- /13/ Taplin, J M, A method for following the hydration reaction in Portland cement paste, 1959

Bilaga 1

Recept och den färska betongens egenskaper

Bilaga 1

Provnr:	PKC 350 T20	Cementtyp:	PK-cement
Vct:	0.57	Lagringstemp.:	+20°C
Gjutdatum:	980302	Tid:	KI 21.25

Recept	
	kg/m3
Cement	350.0
Vatten	200.0
Sten 12-16	450.2
Sten 8-12	450.2
Grus 0-8	900.4

Bakgrundsfakta recept	
Densitet	kg/m3
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	120 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2433	kg/m3
Lufthalt	0.70	%
Vattensep. (120 min)	0.17	%
Sättnått		
0 min	60	mm
60 min	25	mm

Bilaga 1

Provnr:	PKC 350 T5+30	Cementtyp:	PK-cement
Vct:	0.57	Lagringstemp.:	+5, +30°C
Gjutdatum:	980305	Tid:	KI 10.20

Recept	
	kg/m3
Cement	350.0
Vatten	200.0
Sten 12-16	450.2
Sten 8-12	450.2
Grus 0-8	900.4

Bakgrundsfakta recept	
	kg/m3
Densitet	
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	120 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2380	kg/m3
Lufthalt	1.4	%
Vattensep. (120 min)	0.18	%
Sättnått		
0 min	60	mm
60 min	20	mm

Bilaga 1

Provnr:	PKC 320 T20	Cementtyp:	PK-cement
Vct:	0.61	Lagringstemp.:	+20°C
Gjutdatum:	981110	Tid:	KI 10.55

Recept	
	kg/m3
Cement	320.0
Vatten	195.0
Sten 12-16	460.0
Sten 8-12	460.0
Grus 0-8	920.0

Bakgrundsfakta recept	
	kg/m3
Densitet	
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	80 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2357	kg/m3
Lufthalt	1.40	%
Vattensep. (120 min)	0.18	%
Sättnått		
0 min	60	mm
60 min	40	mm

Bilaga 1

Provnr:	PKC 290 T20	Cementtyp:	PK-cement
Vct:	0.67	Lagringstemp.:	+20°C
Gjutdatum:	981103	Tid:	KI 10.30

Recept	
	kg/m3
Cement	290.0
Vatten	195.0
Sten 12-16	466.4
Sten 8-12	466.4
Grus 0-8	932.8

Bakgrundsfakta recept	
Densitet	kg/m3
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	80 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2337	kg/m3
Lufthalt	1.70	%
Vattensep. (120 min)	0.44	%
Sättnått		
0 min	70	mm
60 min	25	mm

Bilaga 1

Provnr:	PKC 260 T20	Cementtyp:	PK-cement
Vct:	0.75	Lagringstemp.:	+20°C
Gjutdatum:	980216	Tid:	KI 21.00

Recept	
	kg/m3
Cement	260.0
Vatten	195.0
Sten 12-16	472.8
Sten 8-12	472.8
Grus 0-8	945.6

Bakgrundsfakta recept	
Densitet	kg/m3
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	120 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2382	kg/m3
Lufthalt	1.50	%
Vattensep. (120 min)	0.37	%
Sättnått		
0 min	60	mm
60 min	30	mm

Bilaga 1

Provrnr:	PKC 230 T20	Cementtyp:	PK-cement
Vct:	0.80	Lagringstemp.:	+20°C
Gjutdatum:	981027	Tid:	KI 10.45

Recept	
	kg/m3
Cement	230.0
Vatten	185.0
Sten 12-16	485.8
Sten 8-12	485.8
Grus 0-8	971.6

Bakgrundsfakta recept	
	kg/m3
Densitet	
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	80 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2316	kg/m3
Lufthalt	2.10	%
Vattensep. (120 min)	0.47	%
Sättnått		
0 min	55	mm
60 min	30	mm

Bilaga 1

Provnr:	PKC 200 T20	Cementtyp:	PK-cement
Vct:	0,85	Lagringstemp.:	+20°C
Gjutdatum:	980323	Tid:	KI 10.45

Recept	
	kg/m3
Cement	200.0
Vatten	170.0
Sten 12-16	502.2
Sten 8-12	502.2
Grus 0-8	1004.4

Bakgrundsfakta recept	
	kg/m3
Densitet	
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	120 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2374	kg/m3
Lufthalt	1.70	%
Vattensep. (120 min)	0.17	%
Sättnått		
0 min	30	mm
60 min	10	mm

Bilaga 1

Provnr:	PKC 200 T5+30	Cementtyp:	PK-cement
Vct:	0,85	Lagringstemp.:	+5, +30°C
Gjutdatum:	980326	Tid:	KI 10.55

Recept	
	kg/m3
Cement	200.0
Vatten	170.0
Sten 12-16	502.2
Sten 8-12	502.2
Grus 0-8	1004.4

Bakgrundsfakta recept	
	kg/m3
Densitet	
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	120 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2395	kg/m3
Lufthalt	1.75	%
Vattensep. (120 min)	0.24	%
Sättnått		
0 min	15	mm
60 min	0	mm

Bilaga 1

Provnr:	Std P 350 T20	Cementtyp:	Std P-cement
Vct:	0.57	Lagringstemp.:	+20°C
Gjutdatum:	980309	Tid:	KI 10.30

Recept	
	kg/m3
Cement	350.0
Vatten	200.0
Sten 12-16	450.2
Sten 8-12	450.2
Grus 0-8	900.4

Bakgrundsfakta recept	
Densitet	kg/m3
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	120 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2369	kg/m3
Lufthalt	1.80	%
Vattensep. (120 min)	0.31	%
Sättnmätt		
0 min	60	mm
60 min	40	mm

Bilaga 1

Provnr:	Std P 260 T20	Cementtyp:	Std P-cement
Vct:	0.75	Lagringstemp.:	+20°C
Gjutdatum:	980223	Tid:	KI 21.05

Recept	
	kg/m3
Cement	260.0
Vatten	195.0
Sten 12-16	472.8
Sten 8-12	472.8
Grus 0-8	945.6

Bakgrundsfakta recept	
	kg/m3
Densitet	
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	120 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2379	kg/m3
Lufthalt	1.50	%
Vattensep. (120 min)	0.80	%
Sättnått		
0 min	60	mm
60 min	60	mm

Bilaga 1

Provnr:	Std P 260 T5+30	Cementtyp:	Std P-cement
Vct:	0.75	Lagringstemp.:	+20°C
Gjutdatum:	980226	Tid:	KI 10.20

Recept	
	kg/m3
Cement	260.0
Vatten	195.0
Sten 12-16	472.8
Sten 8-12	472.8
Grus 0-8	945.6

Bakgrundsfakta recept	
Densitet	kg/m3
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	120 liter

Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2384	kg/m3
Lufthalt	1.50	%
Vattensep. (120 min)	1.11	%
Sättnått		
0 min	60	mm
60 min	60	mm

Bilaga 1

Provnr:	Std P 200 T20	Cementtyp:	Std P-cement
Vct:	0,85	Lagringstemp.:	+20°C
Gjutdatum:	980330	Tid:	KI 10.45

Recept	
	kg/m3
Cement	200.0
Vatten	170.0
Sten 12-16	502.2
Sten 8-12	502.2
Grus 0-8	1004.4

Bakgrundsfakta recept	
Densitet	kg/m3
Cement	3100
Vatten	1000
Ballast	2650
Antagen lufthalt	0.75 %
Blandningsvolym	120 liter

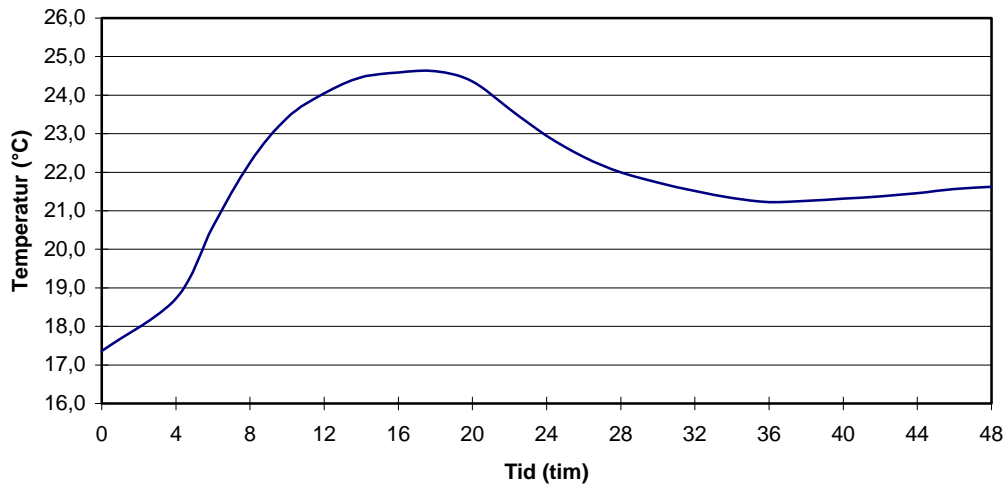
Den färska betongens egenskaper		
Densitet	2413	kg/m3
Lufthalt	1.50	%
Vattensep. (120 min)	0.15	%
Sättnmätt		
0 min	60	mm
60 min	0	mm

Bilaga 2

Hållfasthetskurvor och betongtemperaturkurvor

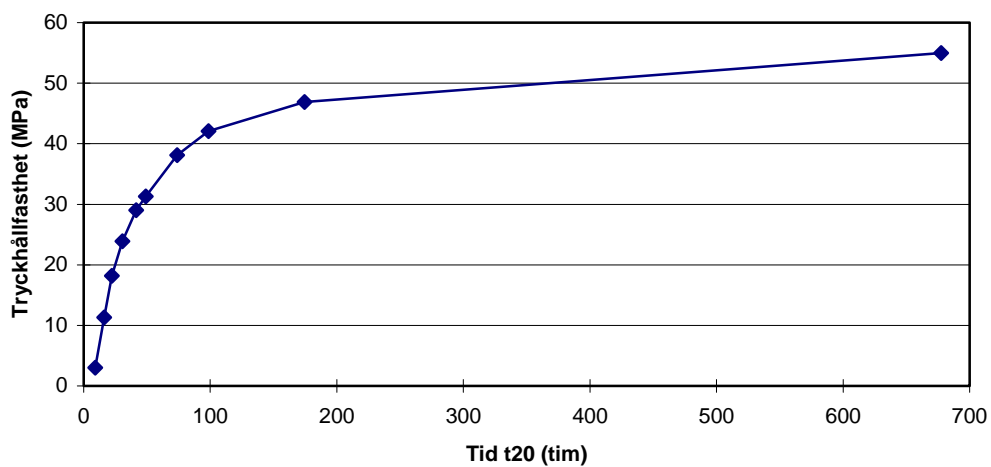
Bilaga 2

Temperaturutveckling PK-cement vct 0.57 +20°C



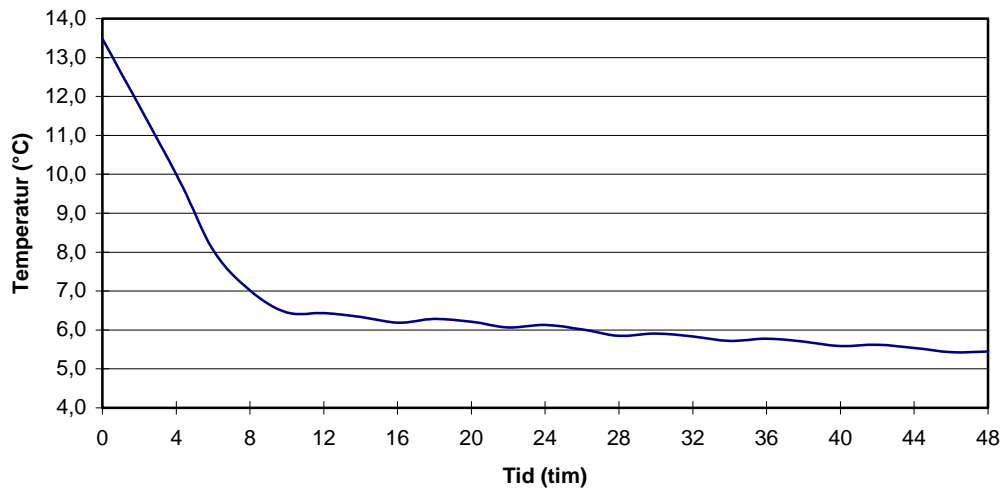
Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0.57 +20°C

t (tim)	t20 (tim)	Hållfasthet (MPa)
9,4	9,2	3,0
14,8	16,2	11,3
19,7	22,3	18,2
26,2	30,7	23,9
36,0	41,6	29,0
42,9	49,1	31,3
67,0	73,9	38,1
91,8	98,7	42,1
167,7	174,6	46,9
670,6	677,5	55,0



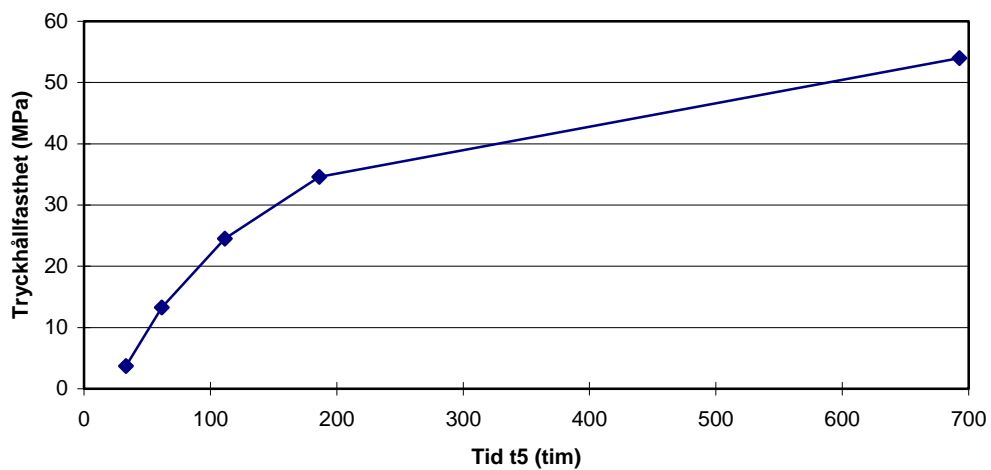
Bilaga 2

Temperaturutveckling PK-cement vct 0.57 +5°C



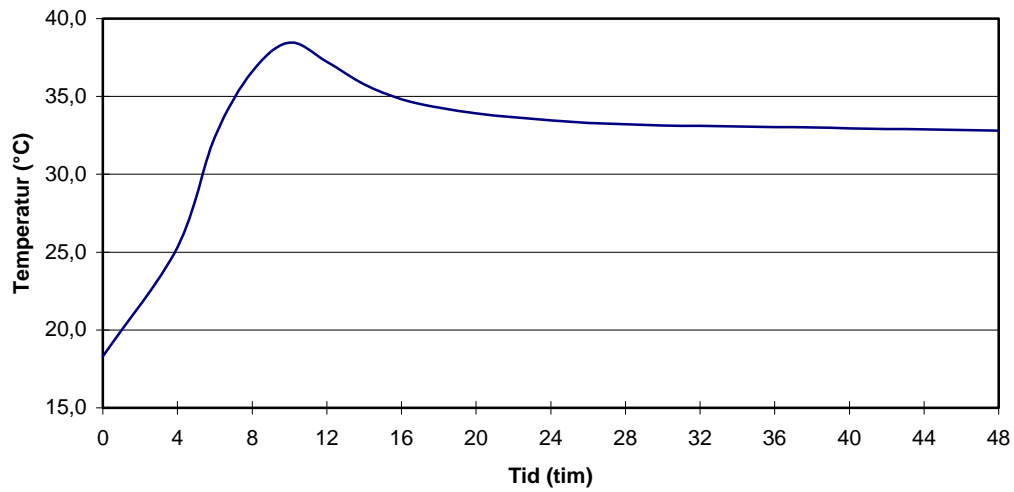
Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0.57 +5°C

t (tim)	t5 (tim)	Hållfasthet (MPa)
23,2	33,1	3,7
49,1	61,6	13,3
99,0	111,5	24,5
173,7	186,2	34,6
680,2	692,7	54,0



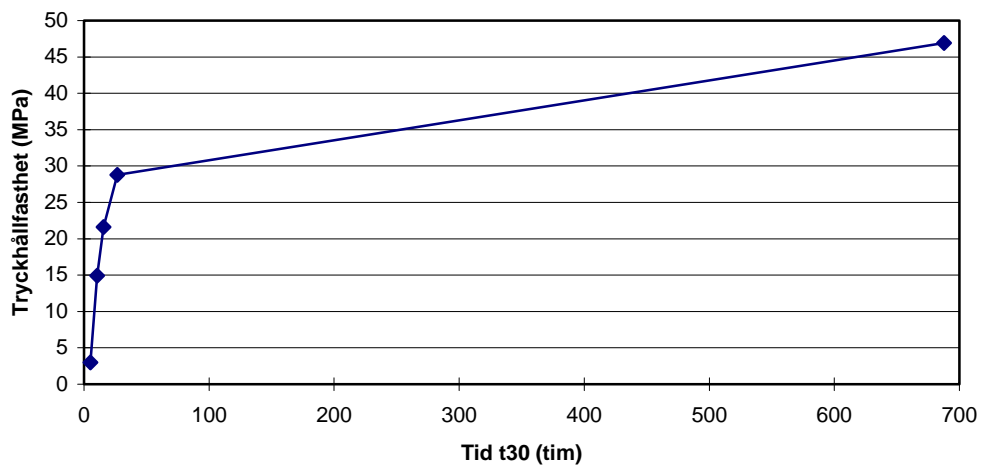
Bilaga 2

Temperaturutveckling PK-cement vct 0.57 +30°C



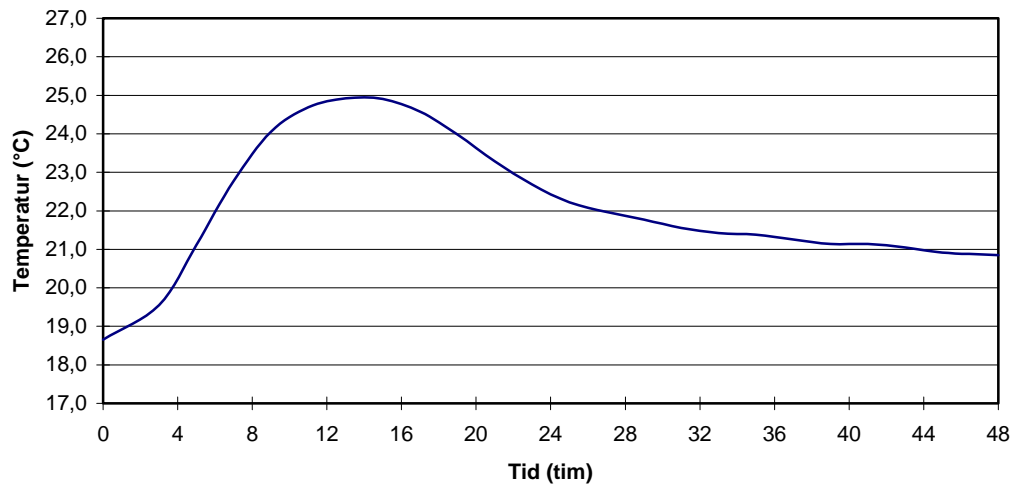
Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0.57 +30°C

t (tim)	t30 (tim)	Hållfasthet (MPa)
6,7	5,0	3,0
10,6	10,4	14,9
14,3	15,5	21,6
23,3	26,5	28,8
680,3	687,6	46,9



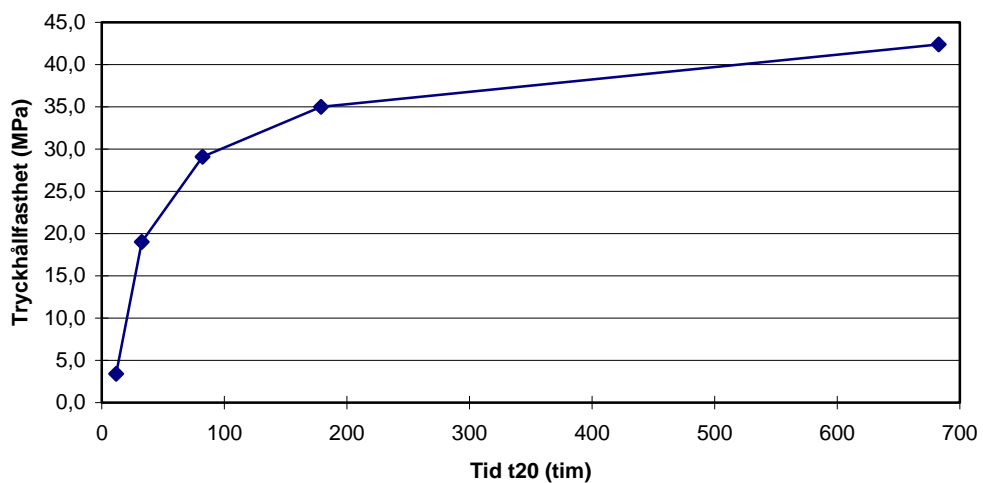
Bilaga 2

Temperaturutveckling PK-cement vct 0.61 +20°C



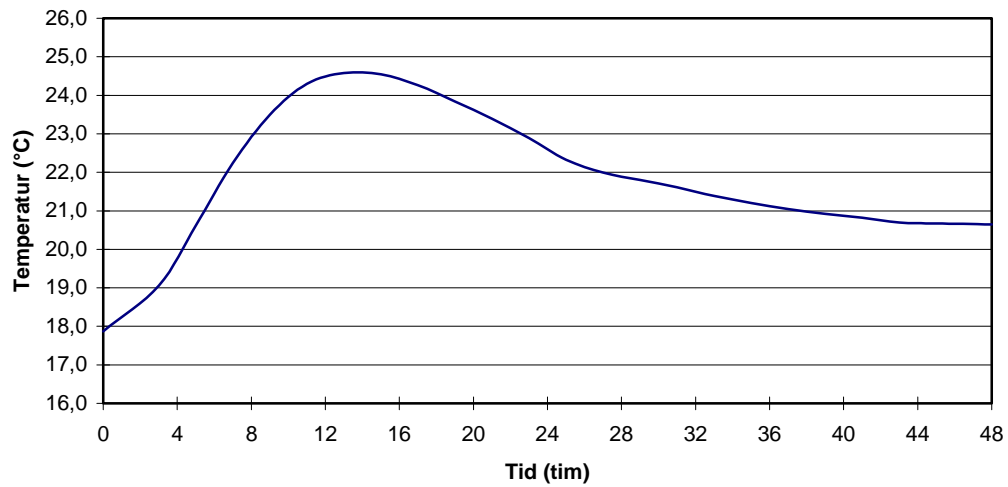
Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0.61 +20°C

t (tim)	t20 (tim)	Hållfasthet (MPa)
10,6	11,7	3,4
27,1	32,6	19,0
74,9	82,2	29,1
171,5	178,8	35,0
675,5	682,8	42,4



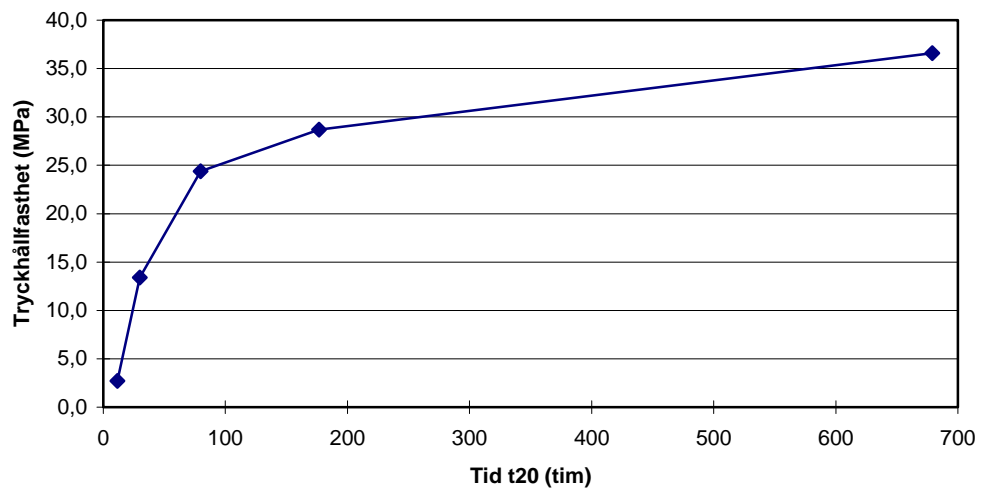
Bilaga 2

Temperaturutveckling PK-cement vct 0.67 +20°C



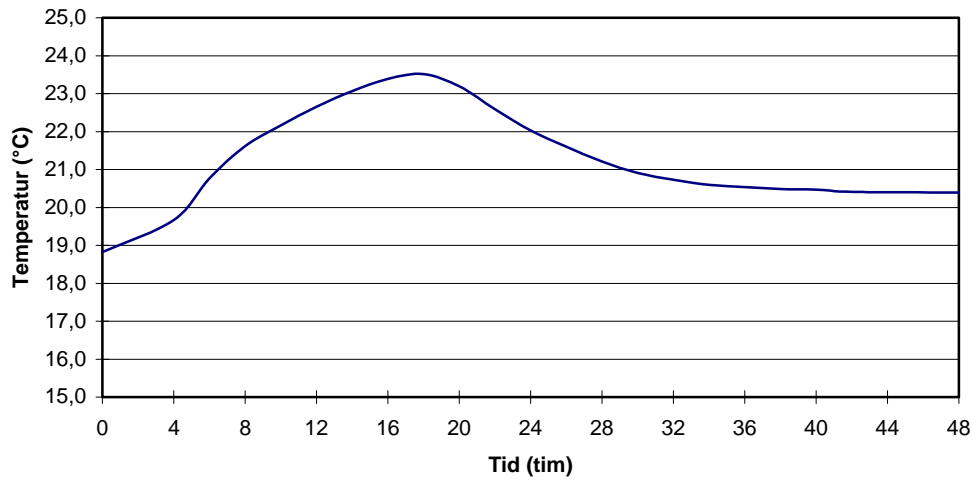
Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0.67 +20°C

t (tim)	t20 (tim)	Hållfasthet (MPa)
10,8	11,5	2,7
25,2	29,8	13,4
73,3	79,8	24,4
170,3	176,8	28,7
672,6	679,1	36,6



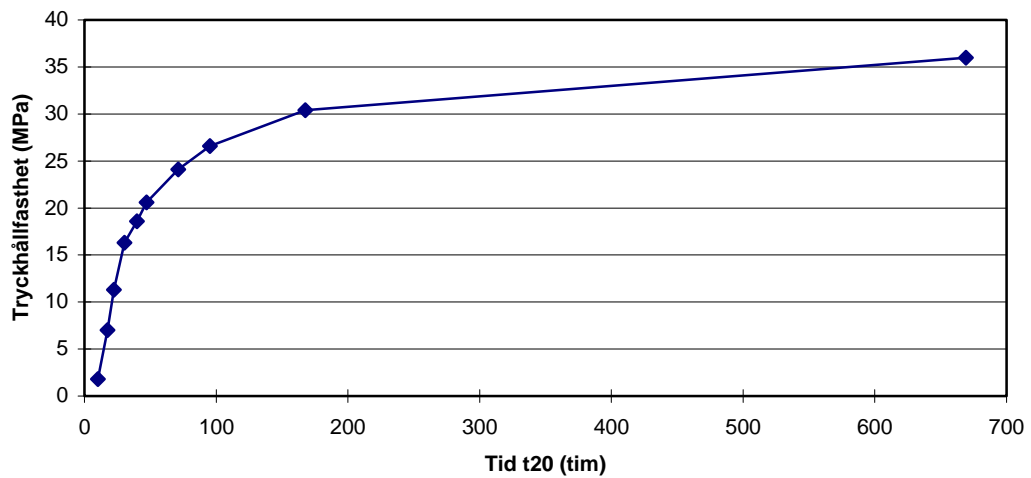
Bilaga 2

Temperaturutveckling PK-cement vct 0.75 +20°C



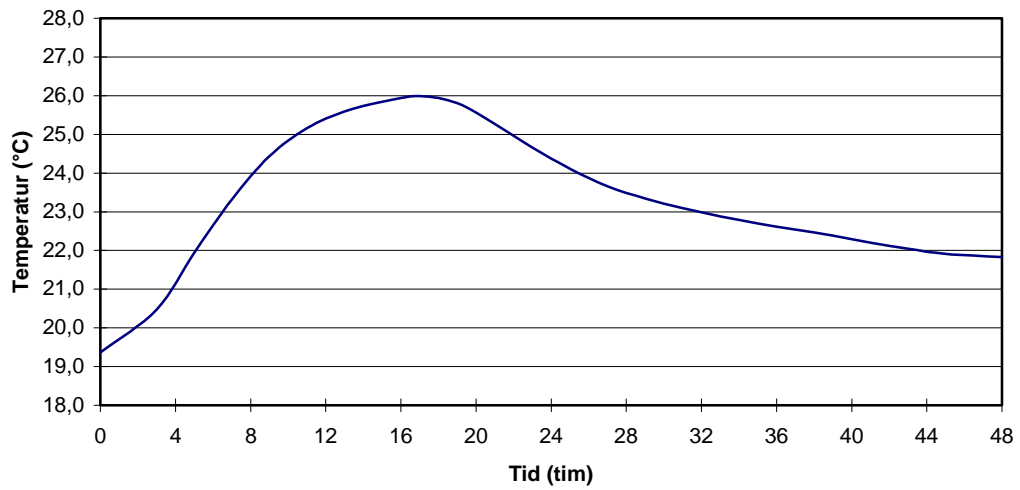
Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0.75 +20°C

t (tim)	t20 (tim)	Hållfasthet (MPa)
10	10,2	1,8
16	17,4	7,0
20	22,3	11,3
27	30,4	16,3
36	39,9	18,6
43	47,2	20,6
67	71,2	24,1
91	95,2	26,6
163,5	167,7	30,4
665	669,2	36,0



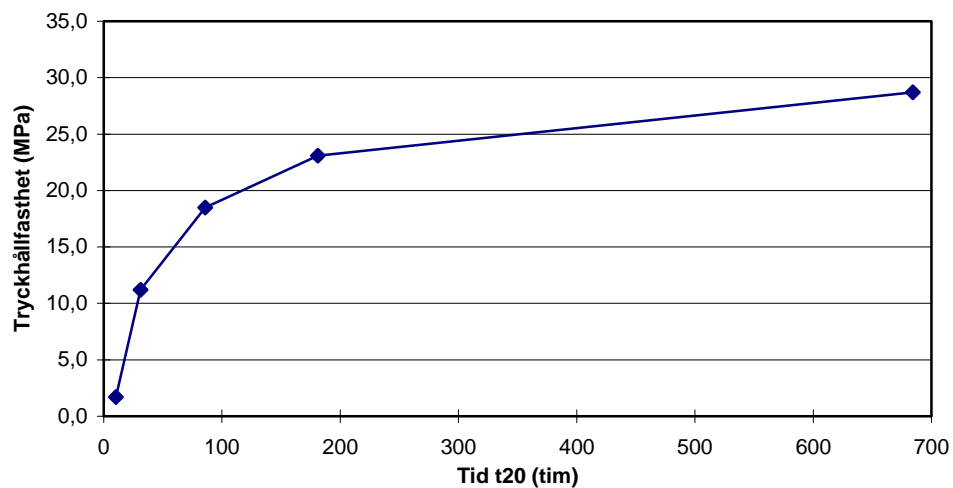
Bilaga 2

Temperaturutveckling PK-cement vct 0.80 +20°C



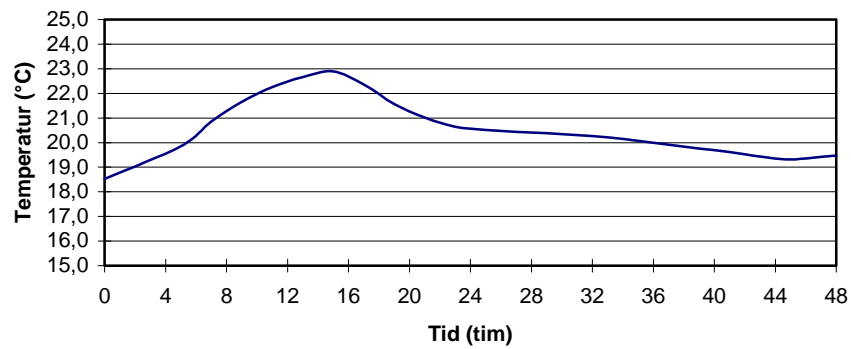
Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0.80 +20°C

t (tim)	t20 (tim)	Hållfasthet (MPa)
9,2	10,3	1,7
24,2	31,2	11,2
74,2	85,7	18,5
169,7	181,2	23,1
672,9	684,4	28,7



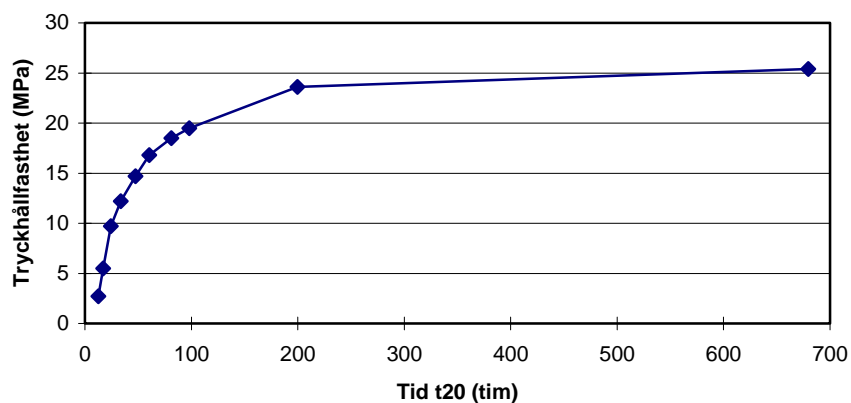
Bilaga 2

Temperaturutveckling PK-cement vct 0.85 +20°C



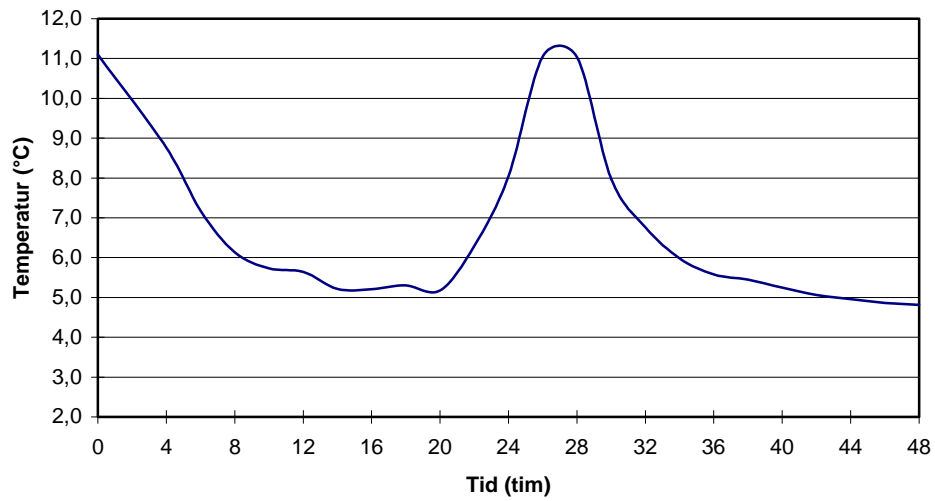
Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0.85 +20°C

t (tim)	t20 (tim)	Hållfasthet (MPa)
12,2	12,5	2,7
16,0	17,0	5,5
22,8	24,5	9,7
31,7	33,7	12,2
45,6	47,4	14,7
58,6	60,3	16,8
79,6	81,3	18,5
96,2	97,9	19,5
197,9	199,6	23,6
677,8	679,5	25,4



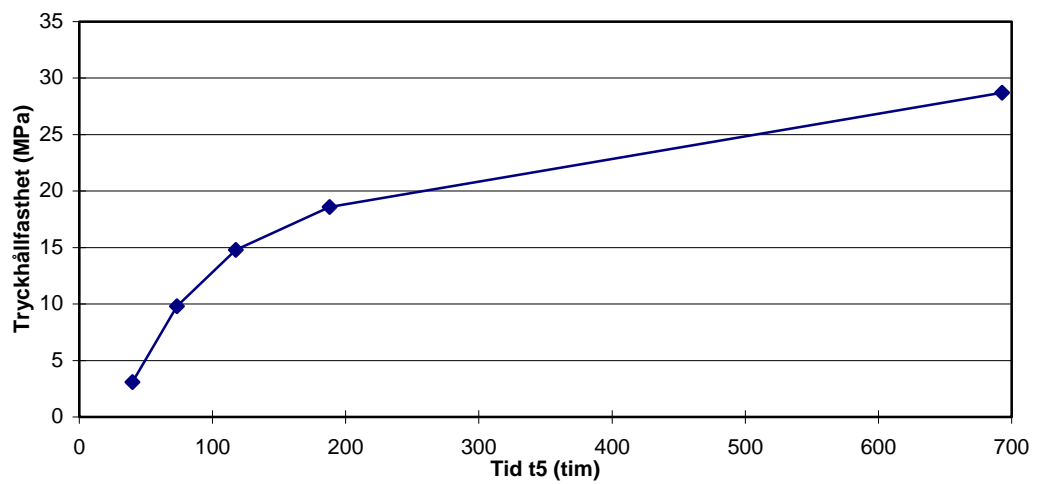
Bilaga 2

Temperaturutveckling PK-cement vct 0.85 +5°C



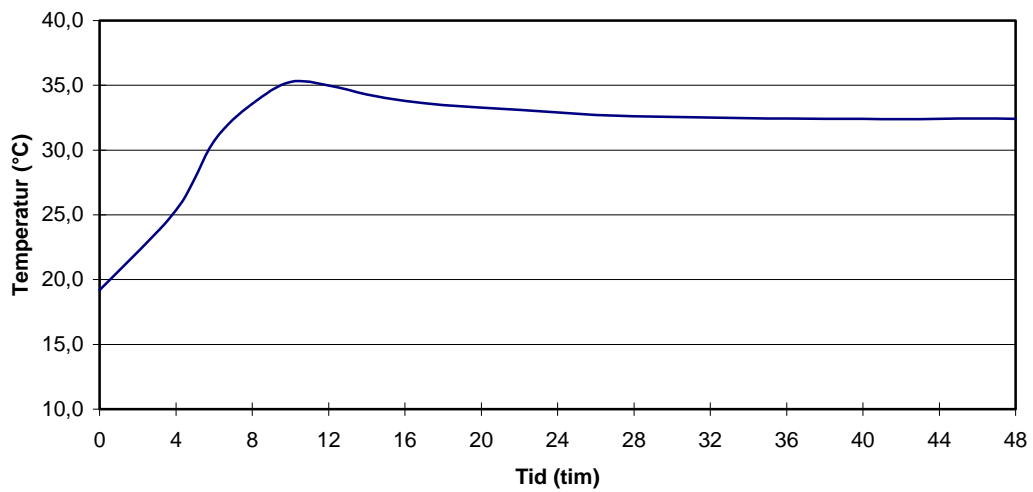
Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0.85 +5°C

t (tim)	t5 (tim)	Hållfasthet (MPa)
29,2	40,0	3,1
60,8	73,4	9,8
105,0	117,6	14,8
175,4	188,0	18,6
680,3	692,9	28,7



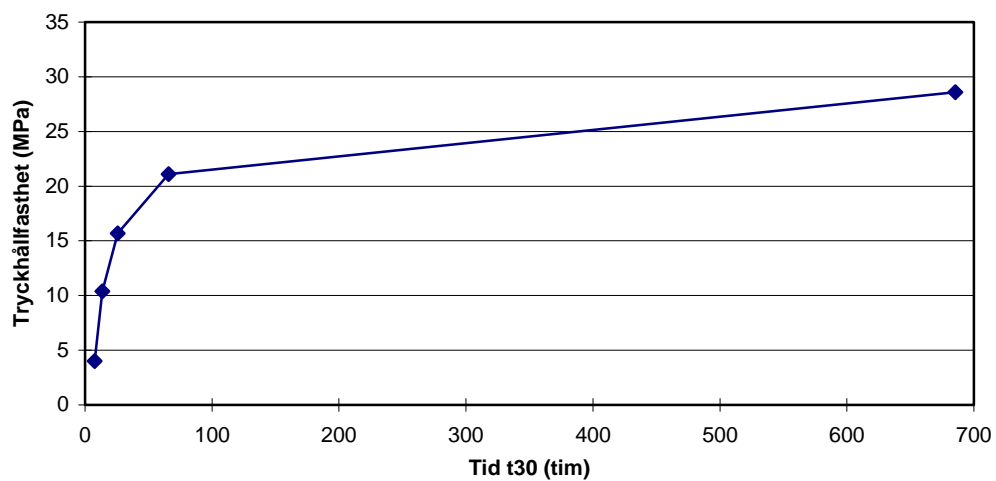
Bilaga 2

Temperaturutveckling PK-cement vct 0.85 +30°C



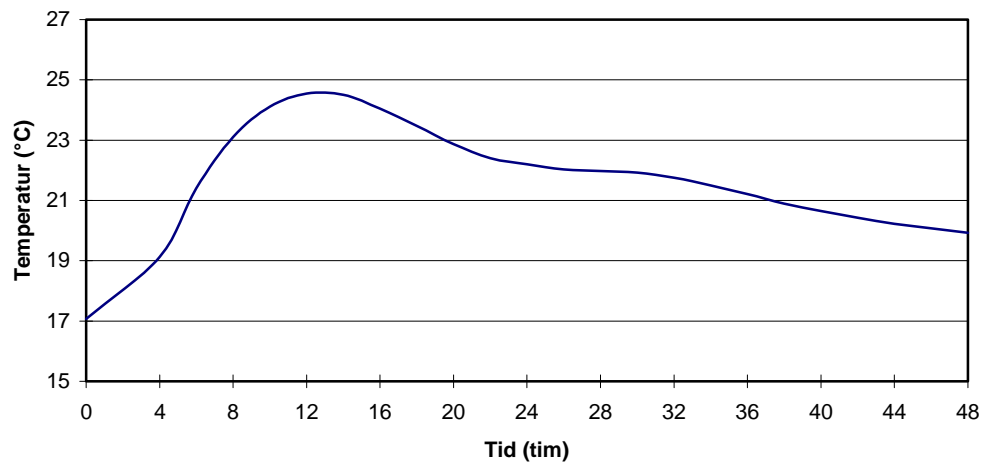
Hållfasthetsutveckling PK-cement vct 0.85 +30°C

t (tim)	t30 (tim)	Hållfasthet (MPa)
8,9	7,5	4,0
13,7	13,6	10,4
23,9	25,6	15,7
60,9	65,9	21,1
680,4	685,4	28,6



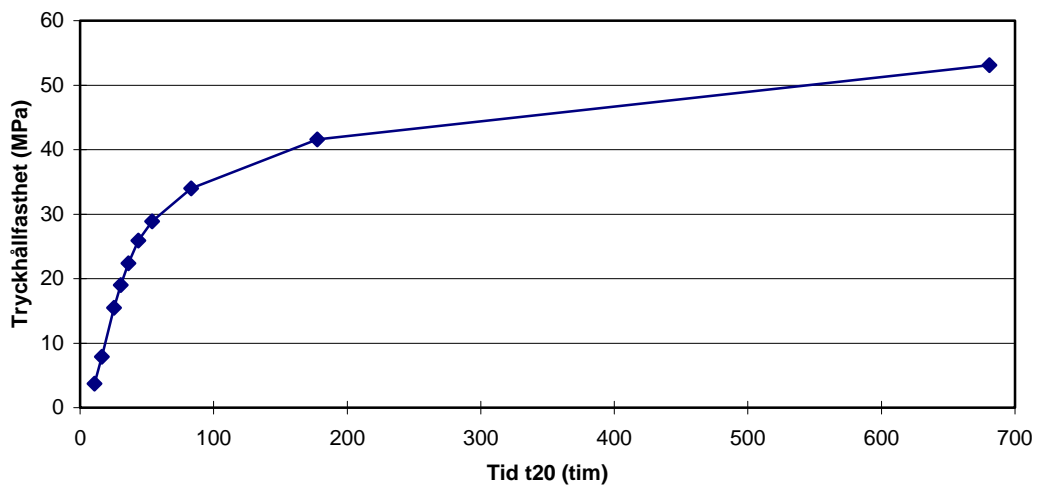
Bilaga 2

Temperaturutveckling Std P-cement vct 0.57 +20°C



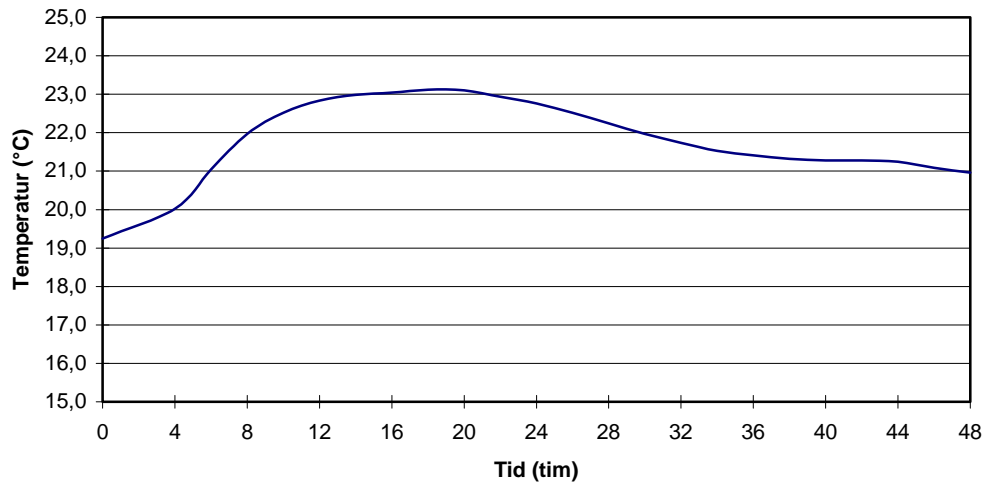
Hållfasthetsutveckling Std P-cement vct 0.57 +20°C

t (tim)	t20 (tim)	Hållfasthet (MPa)
10,5	10,9	3,7
14,5	16,2	7,9
21,9	25,4	15,5
26,3	30,4	19,0
31,3	36,1	22,4
38,3	43,7	25,9
48,2	53,9	28,9
77,4	83,1	34,0
171,8	177,5	41,6
675,2	680,9	53,1



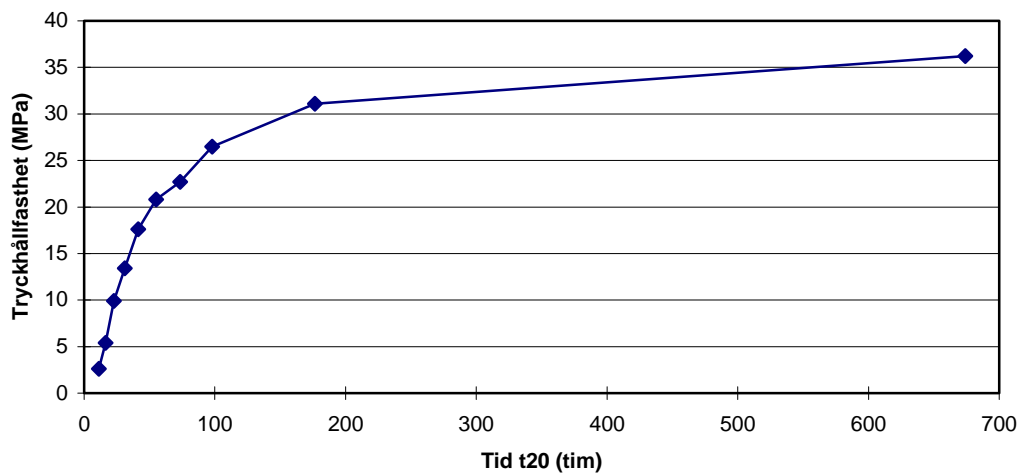
Bilaga 2

Temperaturutveckling Std P-cement vct 0.75 +20°C



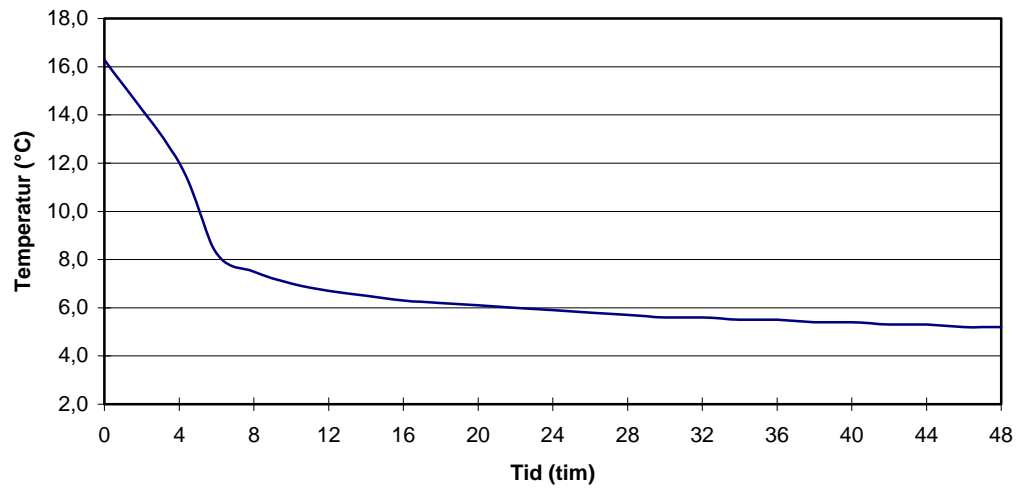
Hållfasthetsutveckling Std P-cement vct 0.75 +20°C

t (tim)	t20 (tim)	Hållfasthet (MPa)
10,7	11,3	2,6
14,9	16,3	5,4
20,2	22,8	9,9
27,2	31,1	13,4
36,4	41,4	17,6
49,0	55,1	20,8
67,4	73,5	22,7
91,8	97,9	26,5
170,5	176,6	31,1
667,9	674,0	36,2



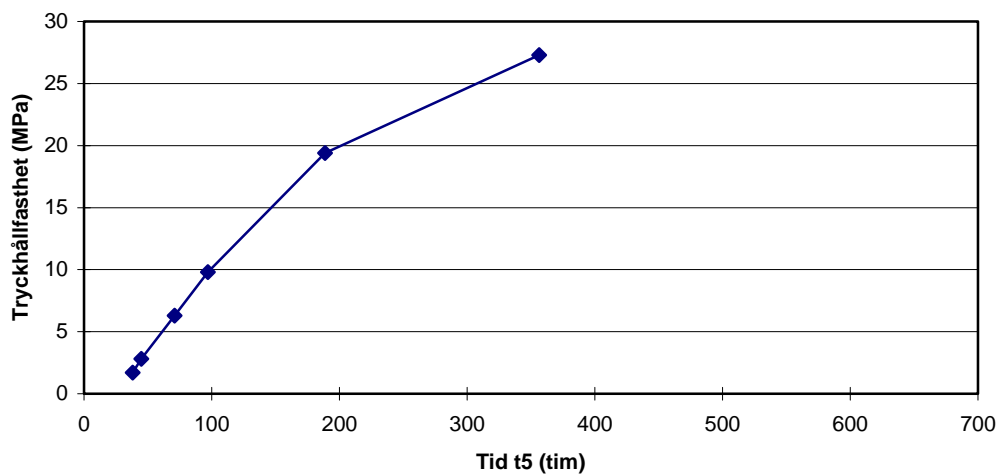
Bilaga 2

Temperaturutveckling Std P-cement vct 0.75 +5°C



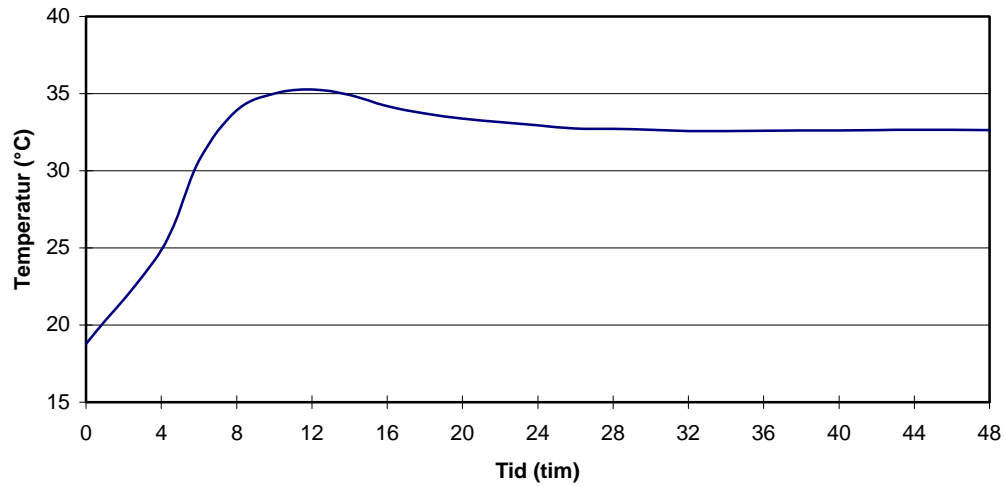
Hållfasthetsutveckling Std P-cement vct 0.75 +5°C

t (tim)	t5 (tim)	Hållfasthet (MPa)
24,8	38,0	1,7
31,1	44,9	2,8
56,3	71,0	6,3
82,2	96,9	9,8
173,9	188,6	19,4
341,8	356,5	27,3



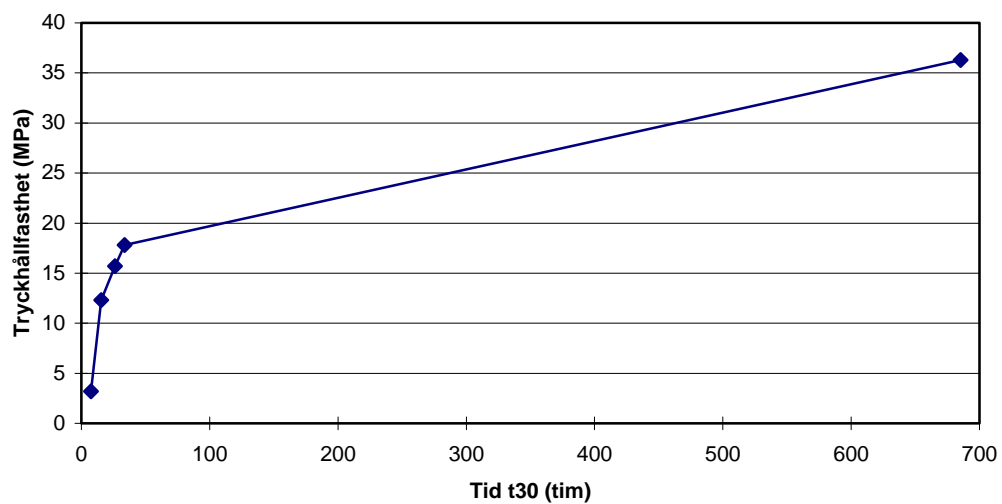
Bilaga 2

Temperaturutveckling Std P-cement vct 0.75 +30°C



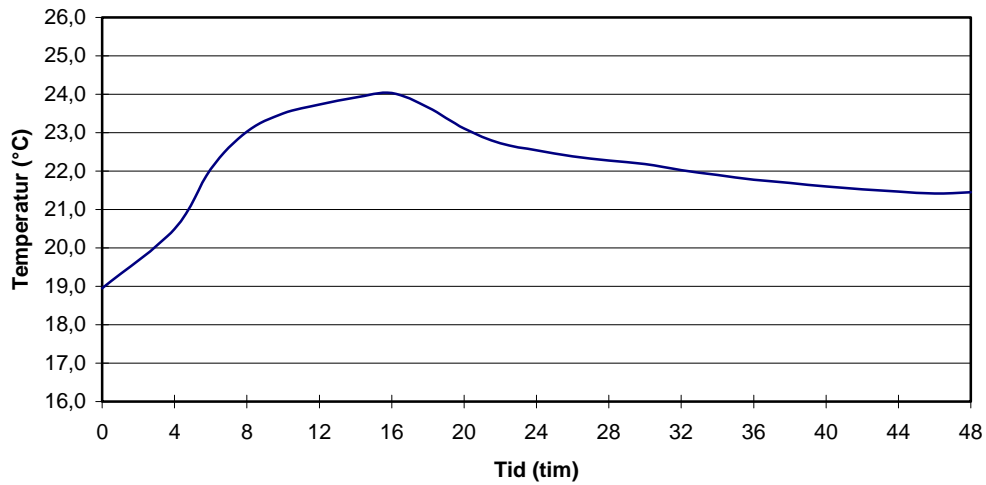
Hållfasthetsutveckling Std P-cement vct 0.75 +30°C

t (tim)	t30 (tim)	Hållfasthet (MPa)
8,9	7,4	3,2
15,2	15,4	12,3
24,2	26,1	15,7
30,8	33,6	17,8
680,1	685,4	36,3



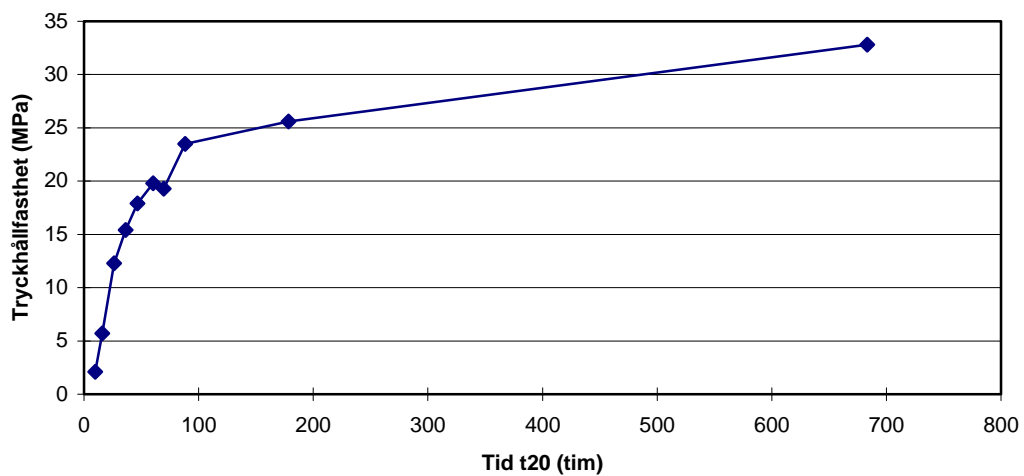
Bilaga 2

Temperaturutveckling Std P-cement vct 0.85 +20°C



Hållfasthetsutveckling Std P-cement vct 0.85 +20°C

t (tim)	t20 (tim)	Hållfasthet (MPa)
9,1	9,7	2,1
14,1	16,0	5,7
22,3	26,2	12,3
30,9	36,2	15,4
40,2	46,7	17,9
52,8	60,2	19,8
62,2	69,6	19,3
79,7	88,1	23,5
171,0	178,4	25,6
675,8	683,2	32,8



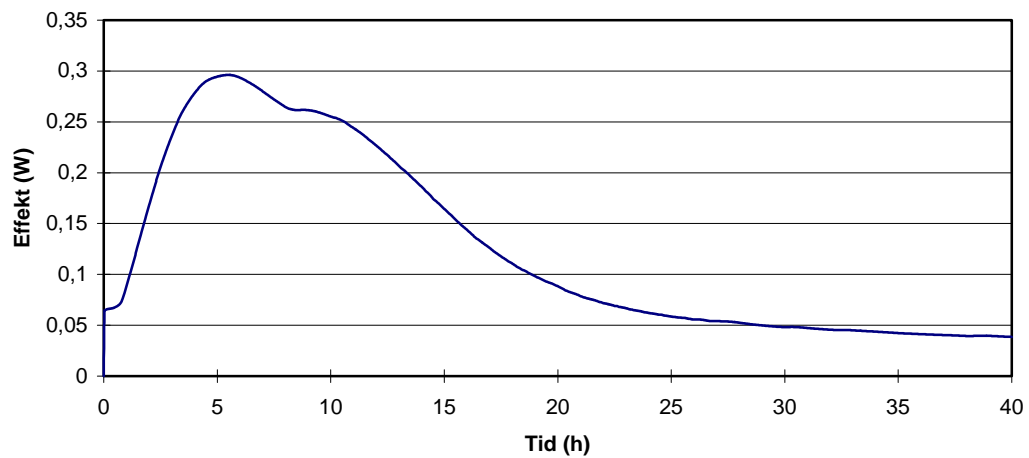
Bilaga 3

Bilaga 3

Värmeutveckling

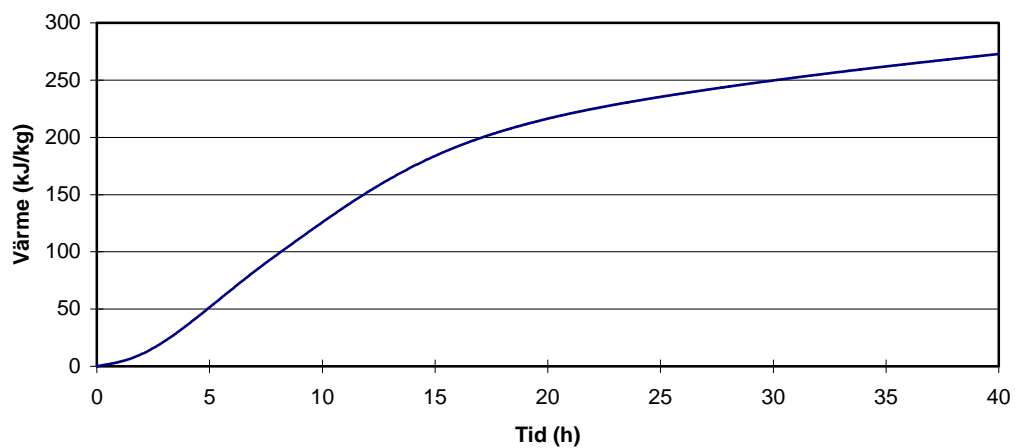
Bilaga 3

Värmeeffekt PK-cement vct 0.50 +23°C



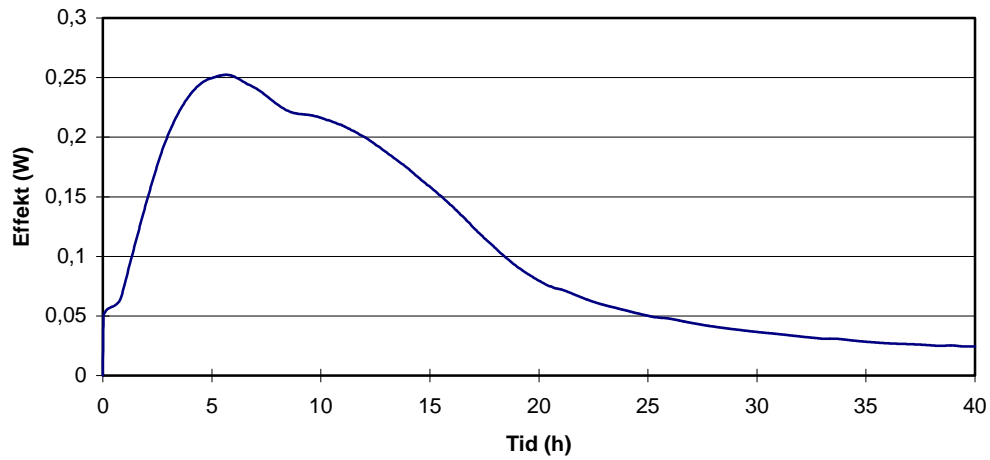
Värmeutveckling PK-cement vct 0.50 +23°C

Tid (tim)	Värme (kJ)	Värme (kJ/kg)
0	0,00	0,00
4	2,40	35,94
8	6,51	97,67
12	10,14	152,04
16	12,81	192,09
20	14,42	216,33
24	15,47	232,08
28	16,29	244,28
32	16,99	254,78
36	17,61	264,20
40	18,19	272,81



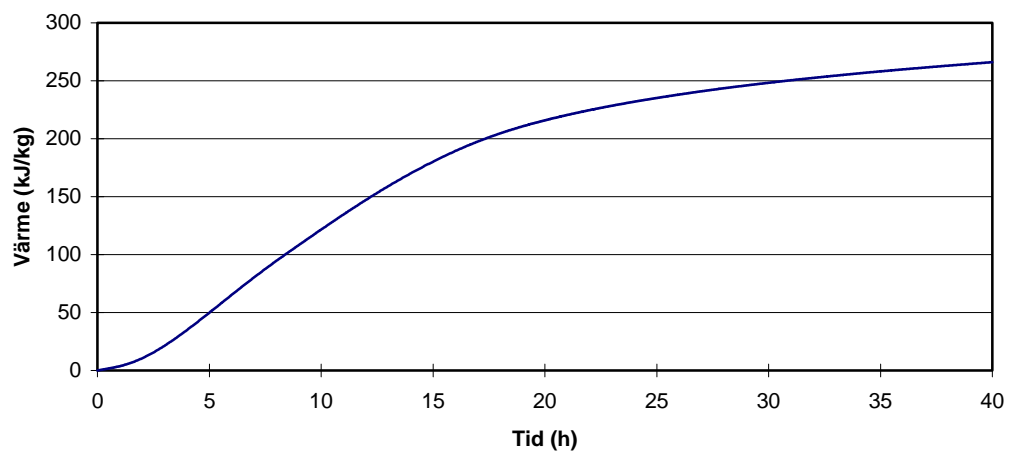
Bilaga 3

Värmeeffekt PK-cement vct 0.60 +23°C



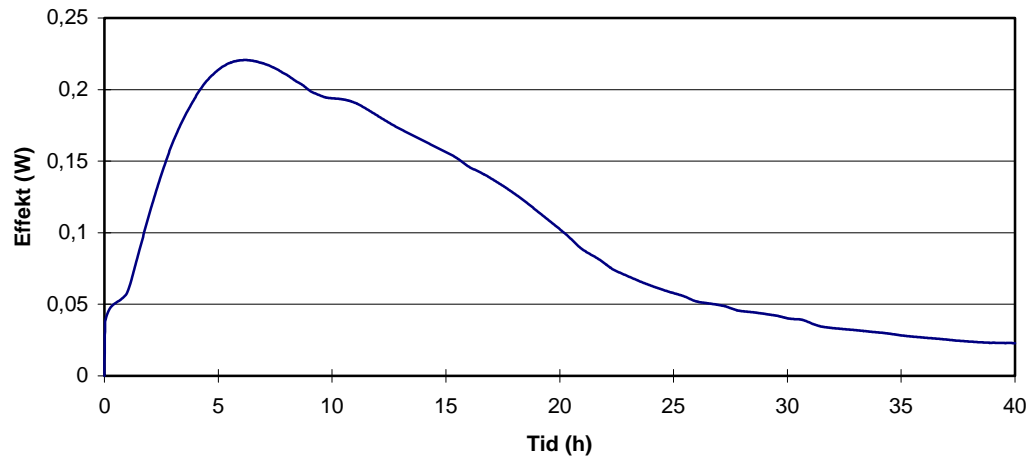
Värmeutveckling PK-cement vct 0.60 +23°C

Tid (tim)	Värme (kJ)	Värme (kJ/kg)
0	0,00	0,00
4	2,05	34,88
8	5,57	94,64
12	8,06	136,97
16	11,14	189,41
20	12,70	215,87
24	13,64	231,93
28	14,33	243,53
32	14,85	252,50
36	15,28	259,81
40	15,65	266,07



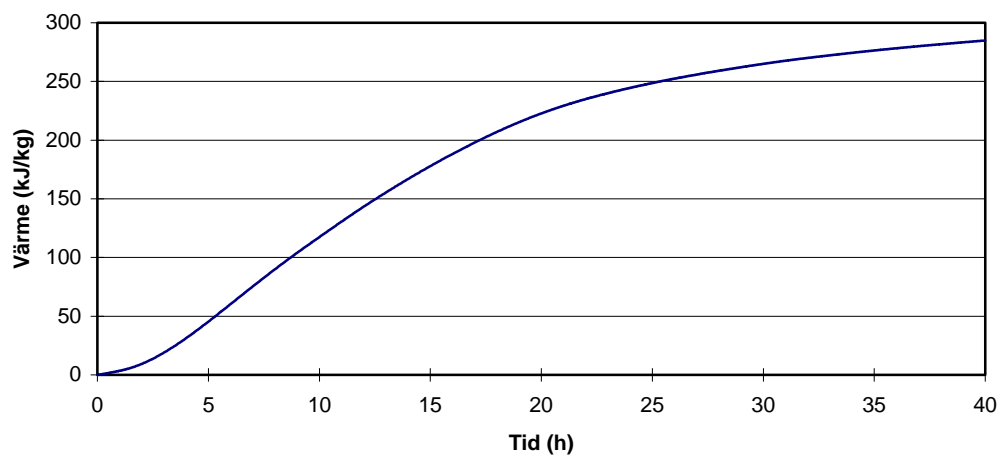
Bilaga 3

Värmeeffekt PK-cement vct 0.70 +23°C



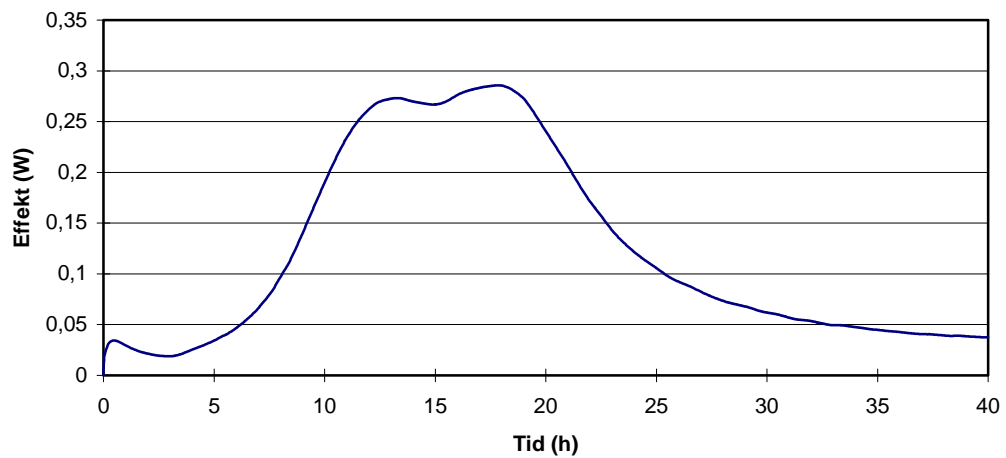
Värmeutveckling PK-cement vct 0.70 +23°C

Tid (tim)	Värme (kJ)	Värme (kJ/kg)
0	0,00	0,00
4	1,65	31,30
8	4,74	89,99
12	7,55	143,33
16	9,91	188,25
20	11,73	222,75
24	12,87	244,49
28	13,64	259,08
32	14,22	270,02
36	14,65	278,27
40	15,00	284,90



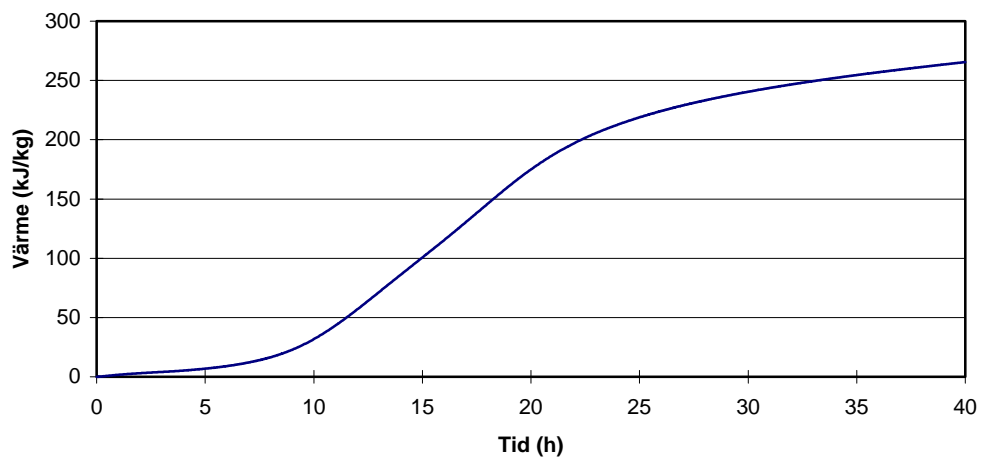
Bilaga 3

Värmeeffekt PK-cement vct 0.50 +23°C med flyttillsats



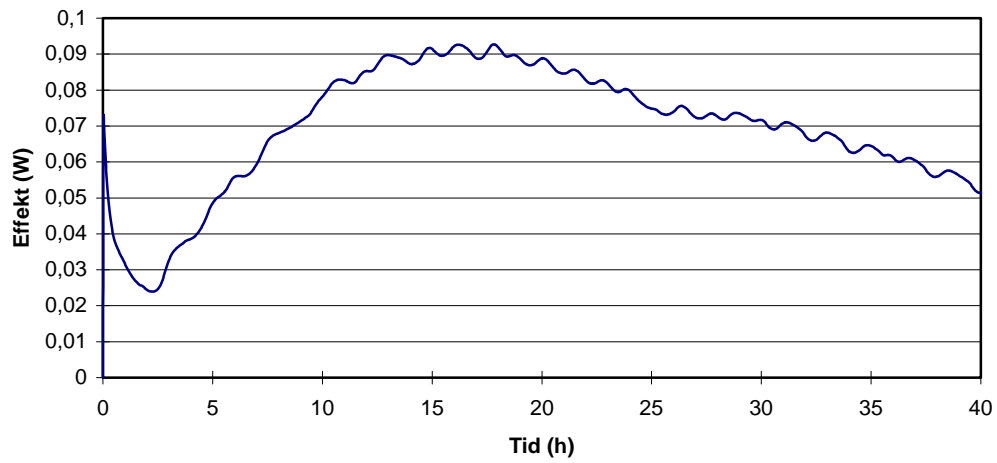
Värmeutveckling PK-cement vct 0.50 +23°C med flyttillsats

Tid (tim)	Värme (kJ)	Värme (kJ/kg)
0	0,00	0,00
4	0,35	5,25
8	1,09	16,43
12	3,78	56,84
16	7,67	115,28
20	11,64	174,93
24	14,15	212,74
28	15,51	233,12
32	16,41	246,62
36	17,09	256,89
40	17,66	265,47



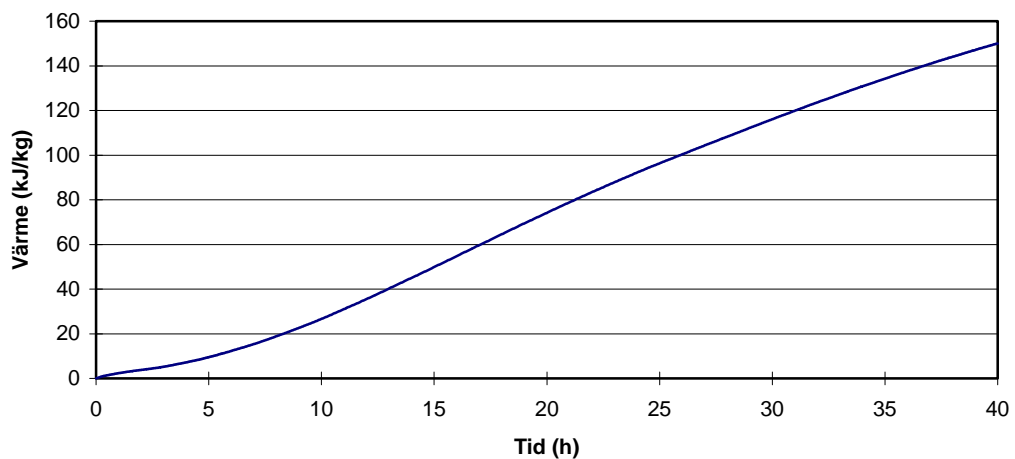
Bilaga 3

Värmeeffekt PK-cement vct 0.50 +8°C



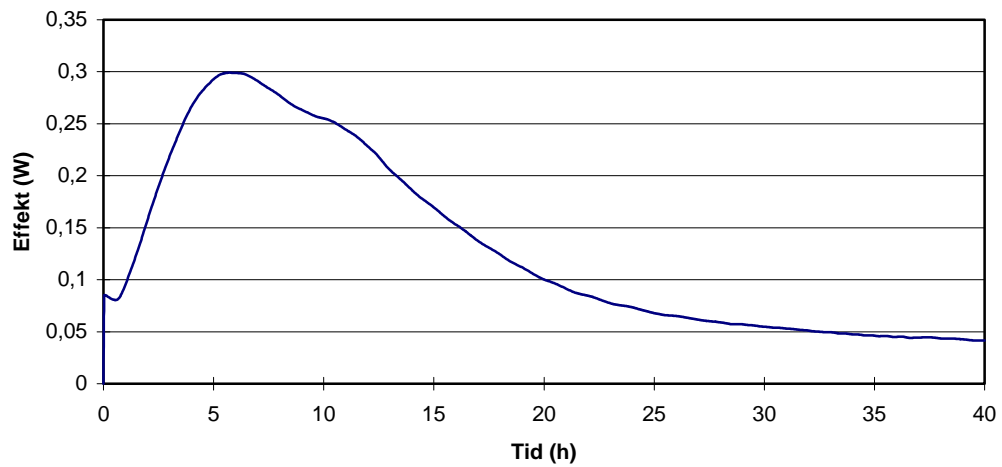
Värmeutveckling PK-cement vct 0.50 +8°C

Tid (tim)	Värme (kJ)	Värme (kJ/kg)
0	0,00	0,00
4	0,48	7,19
8	1,26	18,87
12	2,37	35,54
16	3,65	54,77
20	4,95	74,18
24	6,15	92,19
28	7,22	108,27
32	8,24	123,65
36	9,18	137,64
40	10,00	150,00



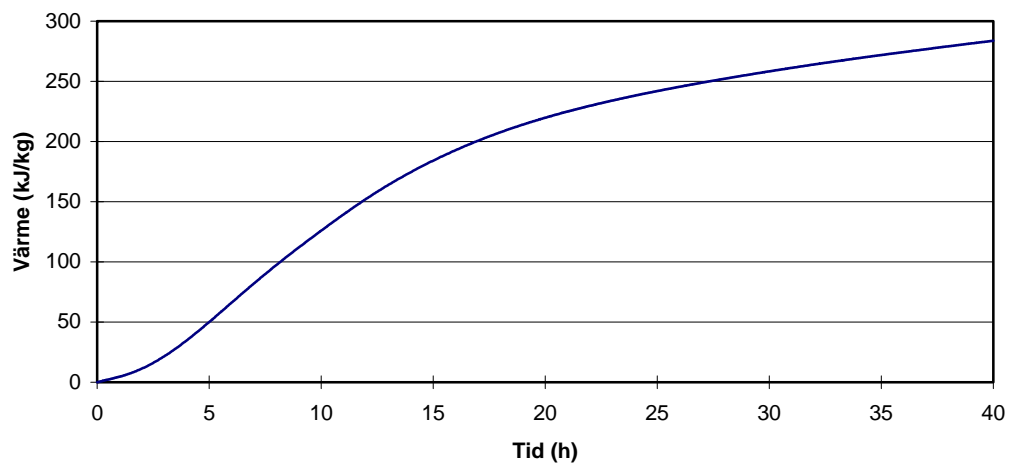
Bilaga 3

Värmeeffekt Std P-cement vct 0.50 +23°C



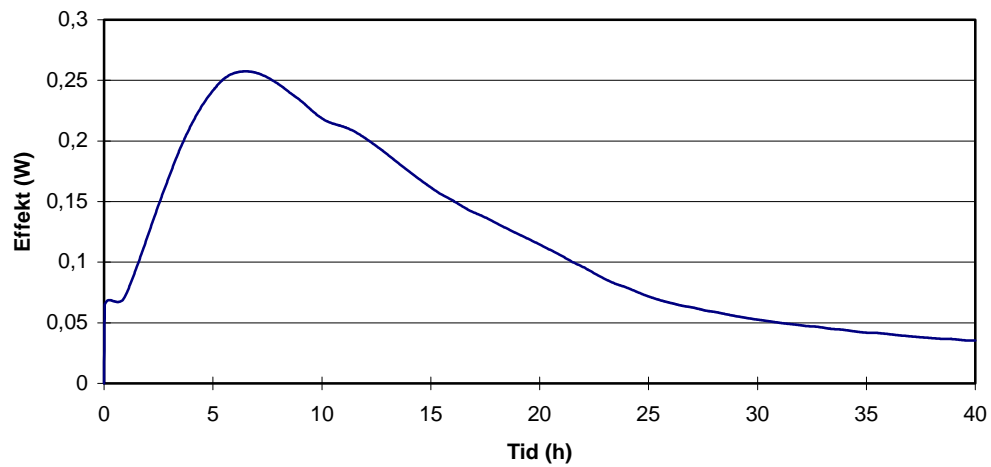
Värmeutveckling Std P-cement vct 0.50 +23°C

Tid (tim)	Värme (kJ)	Värme (kJ/kg)
0	0,00	0,00
4	2,32	34,83
8	6,50	97,44
12	10,15	152,27
16	12,86	192,83
20	14,65	219,77
24	15,87	238,11
28	16,81	252,15
32	17,60	264,02
36	18,29	274,32
40	18,91	283,71



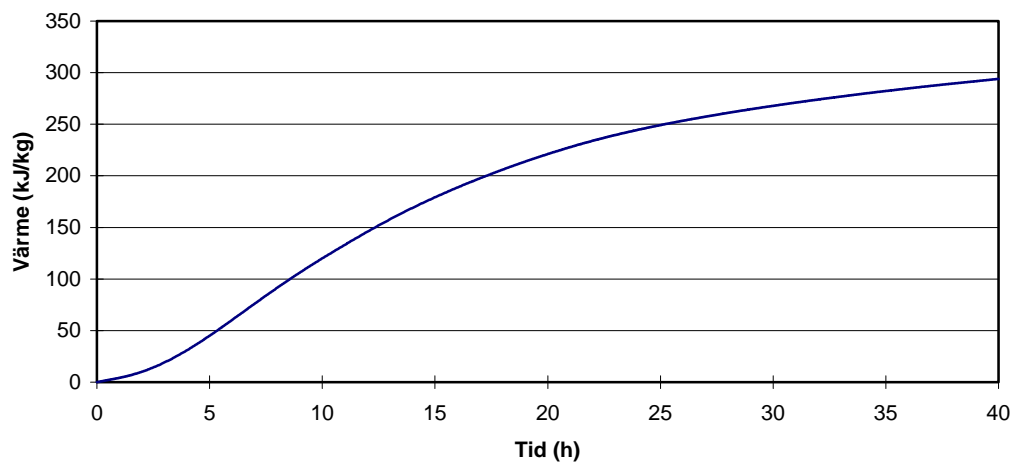
Bilaga 3

Värmeeffekt Std P-cement vct 0.60 +23°C



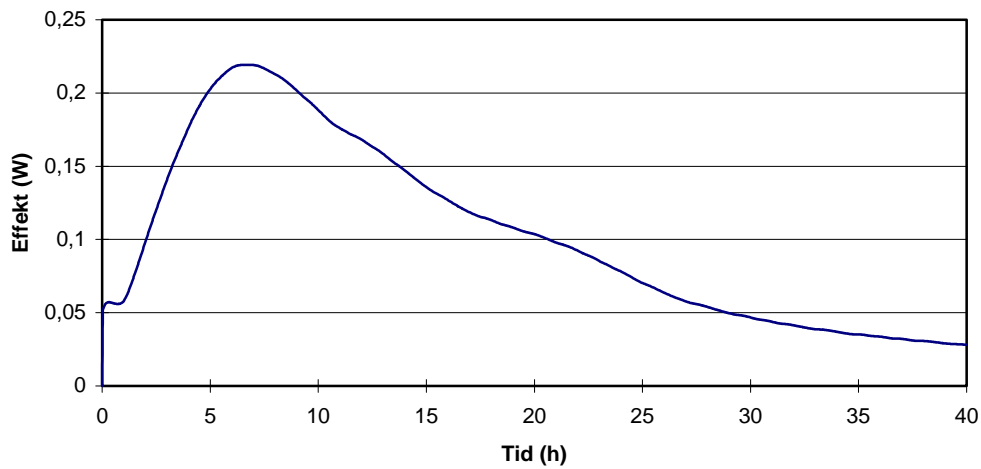
Värmeutveckling Std P-cement vct 0.60 +23°C

Tid (tim)	Värme (kJ)	Värme (kJ/kg)
0	0,00	0,00
4	1,82	31,01
8	5,38	91,51
12	8,58	145,84
16	11,10	188,75
20	13,01	221,12
24	14,39	244,56
28	15,36	261,04
32	16,12	273,97
36	16,75	284,75
40	17,29	293,95



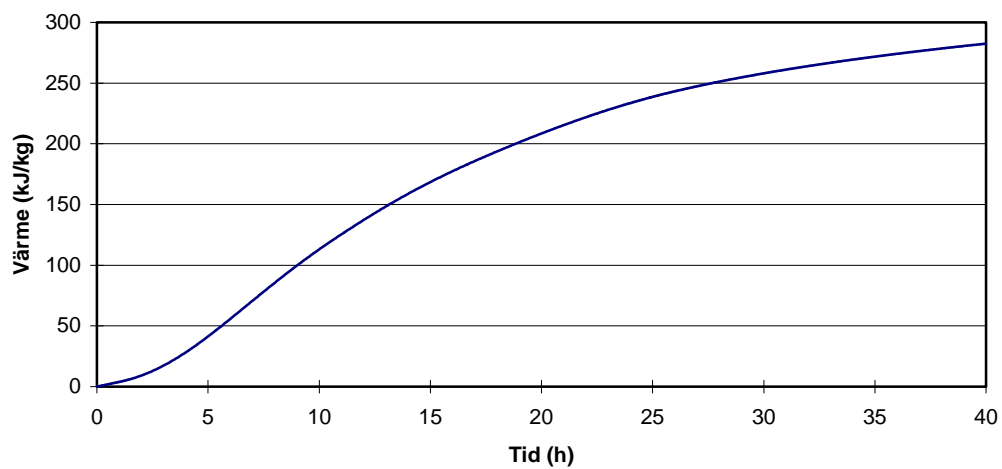
Bilaga 3

Värmeeffekt Std P-cement vct 0.70 +23°C



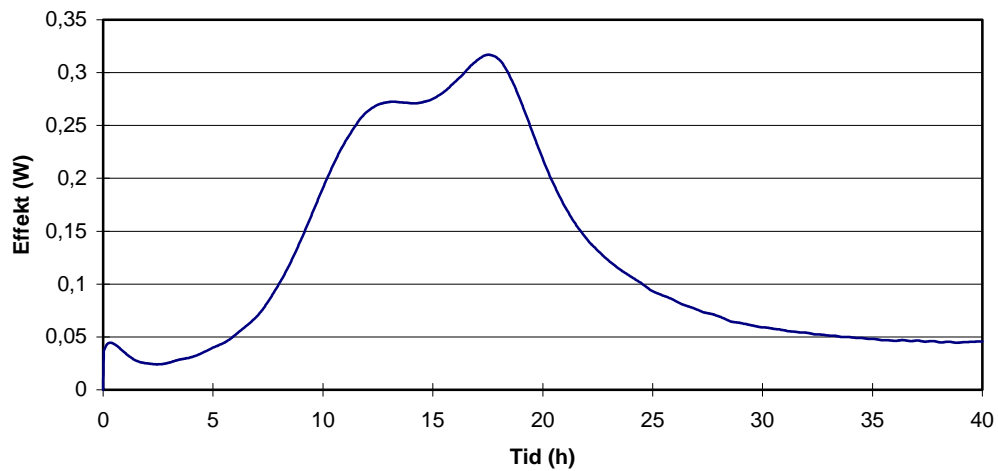
Värmeutveckling Std P-cement vct 0.70 +23°C

Tid (tim)	Värme (kJ)	Värme (kJ/kg)
0	0,00	0,00
4	1,49	28,28
8	4,50	85,53
12	7,22	137,21
16	9,34	177,43
20	10,98	208,48
24	12,30	233,55
28	13,22	251,16
32	13,90	263,98
36	14,43	274,11
40	14,87	282,46



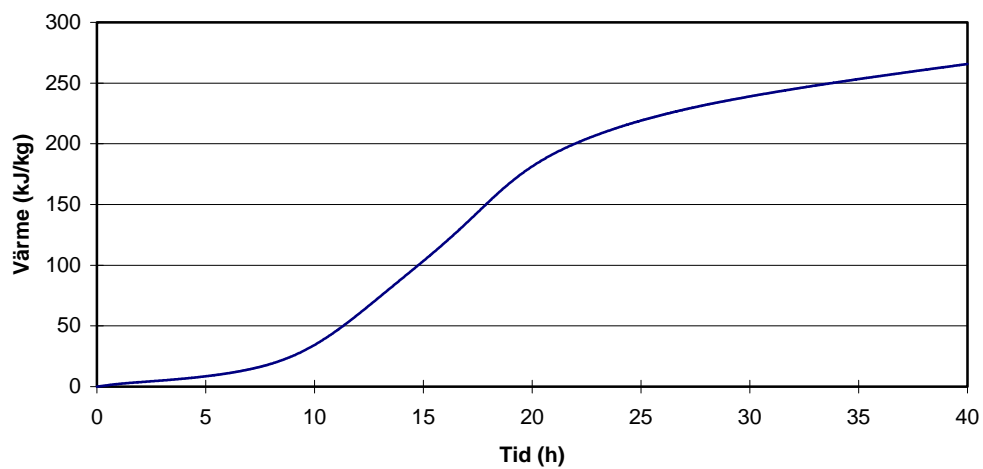
Bilaga 3

Värmeeffekt Std P-cement vct 0.50 +23°C med flyttillsats



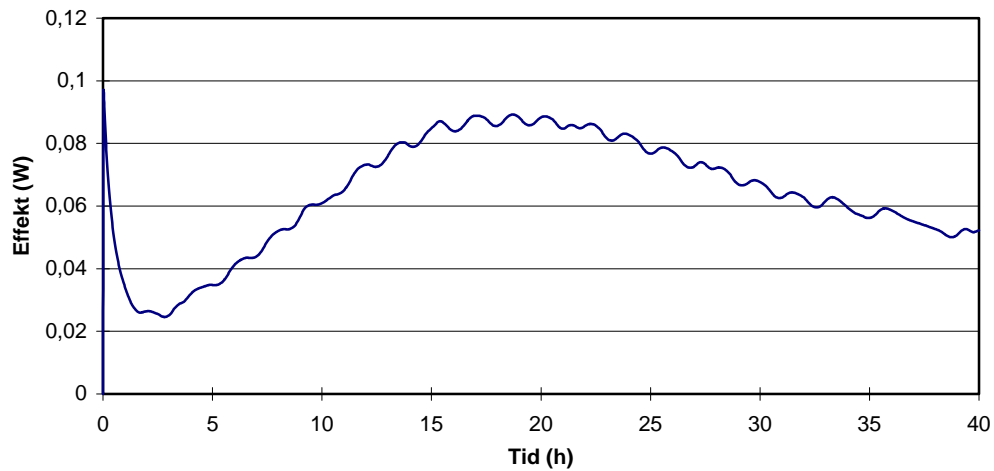
Värmeutveckling Std P-cement vct 0.50 +23°C med flyttillsats

Tid (tim)	Värme (kJ)	Värme (kJ/kg)
0	0,00	0,00
4	0,44	6,61
8	1,25	18,79
12	3,96	59,49
16	7,90	118,78
20	12,07	181,38
24	14,21	213,67
28	15,44	232,13
32	16,30	245,07
36	17,02	255,84
40	17,68	265,71



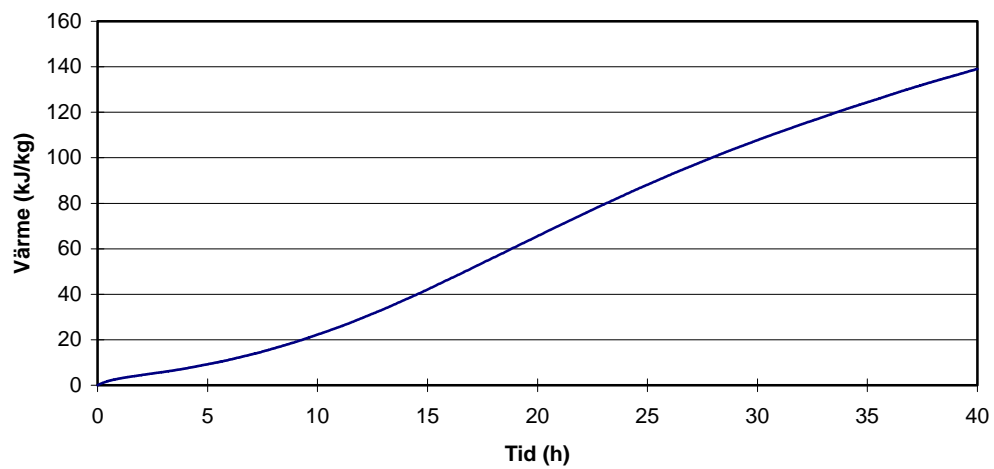
Bilaga 3

Värmeeffekt Std P-cement vct 0.50 +8°C



Värmeutveckling Std P-cement vct 0.50 +8°C

Tid (tim)	Värme (kJ)	Värme (kJ/kg)
0	0,00	0,00
4	0,49	7,38
8	1,08	16,16
12	1,96	29,46
16	3,12	46,73
20	4,37	65,54
24	5,59	83,85
28	6,69	100,31
32	7,65	114,69
36	8,50	127,53
40	9,27	139,07



Bilaga 4

Byggvarudeklaration, yttre miljö-Cement

Byggvarudeklaration, yttre miljö - Cement

Varugrupp:	Portlandcement, CEM I	
Produkter:	Std P Slite	CEM I 42,5 R
	SH P Slite	CEM I 52,5 R
	Std P Skövde	CEM I 42,5 R
	SH P Skövde	CEM I 52,5 R
	Anläggningscement Std P Degerhamn	CEM I 42,5 BV/SR/LA
	Std P Degerhamn 400	CEM I 52,5 SR/LA
	Injekteringscement P Degerhamn	CEM I 52,5 LA/SR
	Ultrafint cement P Degerhamn	CEM I 52,5 R/LA/SR

Företagsinformation

Tillverkare.	Cementa AB Box 144 182 12 Danderyd
Miljöpolicy	Ja
Miljöcertifiering	Planeras 1998

Produktinformation

Innehållsdeklaration	Mald cementklinker med mindre mängder gips, järnsulfat och för vissa produkter kalksten. Detaljerad materialredovisning (Typanalys) kan erhållas på begäran. Järnsulfat tillsätts för att reducera risken för kromallergi.
Användningsområden	Blandas med vatten, grus och sten till betong eller bruk.
Miljömärkning	Nej

Del av livscykeln	Energislag	Råvaror	Utsläpp till		Inverkan på mark
			Vatten	Luft	
1 Ingående material		Ej förnyelsebara			
1.1 Råvaror/Insatsvaror	(Energi ingår i 2.1)	Kalksten, sand, gips (förekommer i riklig mängd)			Dagbrott
1.2 Tillsatser		Järnsulfat			
1.3 Återvunna mtrl	Restbränsle, se 2.1	Industrigips, järnsulfat			
1.4 Ursprung för råvaror		Kalksten lokalt vid fabrik Sand Bornholm/Baskarp Gips Danmark/Spanien			
2 Produktion					
2.1 Processen (Koncessionsvillkor finns)	Fossilt bränsle 3480 MJ Restbränsle 720 MJ Elenergi 415 MJ			CO ₂ 850 kg SO ₂ 1,85 kg NO _x 1,05 kg	

Energiåtgång och utsläpp anges per ton cement och är viktade medelvärden, inkl transport till depå.

Bilaga 4

Del av livscykeln	Information och data
3 Distribution av färdig produkt	
3.1 Produktionsorter	Degerhamn, Skövde och Slite.
3.2 Transportsätt	Båt ca 98%, järnväg eller bil ca 2% , räknat i tonkm.
3.3 Distributionsformer	Ca 85% av produktionen distribueras i bulk till någon av 17 st depåer i landet. Resterande andel säljs från fabriksdepå.
3.4 Emballage	Ca 5% av produktionen packas i 25-kilos säckar av papper och plast. Hanteringen är ansluten till återvinningssystem för förpackningar, Reparegistret.
4 Byggskedet	För skede 4 - 6 hänvisas till byggvarudeklarationer för fabriksbetong eller betongvaror.
5 Bruksskedet	
6 Rivning	
7 Restprodukter	Eventuellt överblivet cement som blandats med vatten hårdnar och kan därefter hanteras som överbliven betong. Beträffande säckar se 3.4.
8 Avfallsprodukter	Se restprodukter ovan.

CEMENTA

Cementa AB, Box 144, 182 12 Danderyd, telefon 08-625 68 00