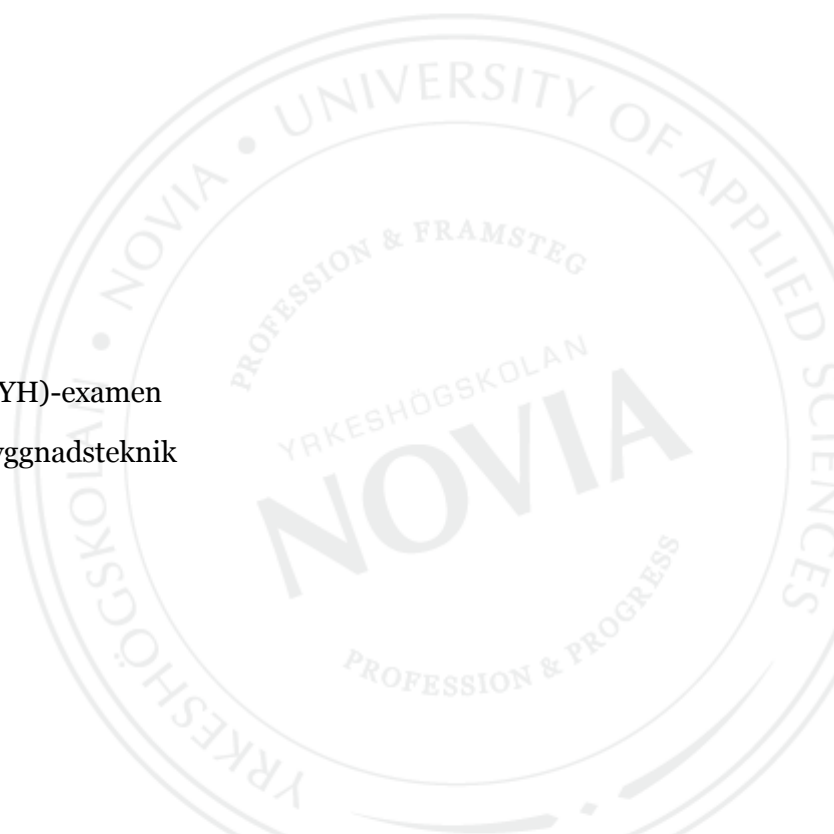


# **Betongkvalitetsuppföljning i vindkraftverksfundament**

## **Undersökning av härdningstemperaturens inverkan på sluthållfastheten**

Ralf Wasberg

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen  
Utbildningsprogrammet för byggnadsteknik  
Vasa 2015



## EXAMENSARBETE

Författare: Ralf Wasberg  
Utbildningsprogram och ort: Byggnadsteknik, Vasa  
Inriktningsalternativ: Byggnadskonstruktion  
Handledare: Tom Lipkin

*Betongkvalitetsuppföljning i vindkraftverksfundament/ Undersökning av härdningstemperaturens inverkan på sluthållfastheten*

---

Datum 24.03.2015

Sidantal 53

Bilagor 6

---

### Abstrakt

Detta examensarbete har gjorts på uppdrag av EPV Vindkraft. Arbetet består av två olika delar: kvalitetsuppföljning av vindkraftverksfundamentens betongkvalitet samt en undersökning på hur olika härdningstemperaturer inverkar på betongens slutliga tryckhållfasthet. Andra delen av arbetet består av en betonglaboration.

Syftet med betonglaborationen var att undersöka härdningsvärmens inverkan på sluthållfastheten i olika härdningstemperaturer. Undersökningen är utförd med betong som har en bindemedelsblandning på 60 % masugnsslagg och 40 % cement.

Temperaturkurvorna som betongkuberna utsatts för är specifikt framtagna för denna undersökning. Kurvornas form likar de verkliga som kan uppkomma i massiva gjutningar, dock med högre temperaturer.

Undersökningsresultaten bevisade en nedsatt tryckhållfasthet för betong som utsatts för höga temperaturer under hydratationsförloppet. Resultaten av undersökningen gav uppdragsgivaren information om slaggbetongens hållfasthetsutvecklingsegenskaper vid olika härdningstemperaturer. Tryckhållfasthetsresultaten är sekretessbelagda.

---

Språk: svenska

Nyckelord: vindkraftverk, massivbetong, slaggbetong

---

## OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Ralf Wasberg  
Koulutusohjelma ja paikkakunta: Rakennustekniikka, Vaasa  
Suuntautumisvaihtoehto: Rakennesuunnittelu  
Ohjaajat: Tom Lipkin

*Tuulivoimalaperustuksen betonin laadunvarmistus/ tutkimus kovettumislämmön vaikutuksesta loppulujuuteen*

---

Päivämäärä 24.03.2015

Sivumäärä 53

Liitteet 6

---

### Tiivistelmä

Tämä on EPV Tuulivoiman toimeksiantona tehty opinnäytetyö. Työ koostuu kahdesta eri osasta: tuulivoimaperustojen betonilaadun laadunvarmistustyöstä sekä tutkimuksesta kovettumislämpötilojen vaikutuksesta betonin puristuslujuuteen eri kovettumislämpötiloissa.

Betonilaboratoriotutkimusten tarkoitus oli tutkia erilaisten kovettumislämpötilojen vaikutusta puristuslujuuteen. Tutkimuksessa on käytetty betonia, jonka sideaineen sekoitussuhde on 60 % kuonaa ja 40 % sementtiä.

Betonikuutioiden lämmityksessä käytetyt lämpökäyrät ovat erityisesti kehitetty tähän tutkimukseen. Käyrien muoto muistuttaa todellisia lämpökäyriä mutta korotetuilla lämpöarvoilla.

Tutkimustulokset todistavat alentuneen puristuslujuuden betonissa, jonka kovettuminen on tapahtunut korkeassa lämpötilassa. Tutkimuksen tulokset antoivat toimeksiantajalle tietoa kuonabetonin lujuudenkehitysominaisuuksista erilaisissa kovettumislämpötiloissa. Puristuslujuustulokset ovat luottamuksellisia.

---

Kieli: ruotsi

Avainsanat: tuulivoimala, massiivibetoni, kuonabetoni

---

## **BACHELOR'S THESIS**

Author: Ralf Wasberg  
Degree Programme: Construction Engineering  
Specialization: Structural design  
Supervisors: Tom Lipkin

*Quality monitoring of concrete in windmill foundations including a study of the impact of curing temperature on final strength*

---

Date 24.03.2015

Number of pages 53

Appendices 6

---

### **Summary**

This thesis has been done on behalf of the EPV Vindkraft. The work consists of two parts: quality monitoring of the concrete quality of wind turbine foundations and a study of how different hydration temperatures affects the compressive strength of concrete. The second part of the work consists of concrete laboratory work.

The purpose of the concrete laboratory work was to investigate the impact of hydration temperatures on the final strength at different curing temperatures. The survey is performed with concrete that has a binder mixture of 60% blast furnace slag and 40% cement.

The temperature curves that the concrete cubes were exposed to are specifically developed for this study. The shape of the curves equals the real temperatures that may occur in massive castings but extended to cover higher temperatures.

The survey results show a reduced compressive strength of concrete that is subjected to high temperatures during the hydration process. The results of the investigation provided the client with information about the slag concrete strength development characteristics at different curing temperatures. The compressive strength results are confidential.

---

Language: Swedish

Key words: windmill, mass concrete, slag concrete

---

<b>1</b>	<b>Innehållsförteckning</b>	
<b>1</b>	<b>Inledning</b> .....	<b>1</b>
1.1	Uppdragsgivare .....	1
1.2	Syfte .....	1
1.3	Avgränsning .....	1
<b>2</b>	<b>Betongens historia i Världen</b> .....	<b>2</b>
2.1	Finlands betong historia .....	2
<b>3</b>	<b>Betongens delmaterial</b> .....	<b>2</b>
3.1	Cement .....	2
3.1.1	Cementtillverkning .....	3
3.1.2	Cementstandarder .....	4
3.1.3	Hållfasthetsklasser .....	5
3.1.4	Andra egenskaper .....	6
3.1.5	Andra cement .....	6
3.1.6	Densitet och finhet .....	6
3.1.7	Kvalitetsövervakning av cementtillverkning .....	7
3.2	Ballast.....	7
3.2.1	Ballastgradering .....	8
3.2.2	Form .....	8
3.2.3	Renhet .....	8
3.2.4	Fukthalt .....	9
3.2.5	Alkaliska reaktioner i betong .....	9
3.3	Vatten .....	9
3.3.1	Vatten cement tal.....	10
3.4	Tillsatsmedel .....	11
3.5	Övriga bindemedel .....	12
3.5.1	Flygaska .....	13
3.5.1.1	Flygaskans sammansättning och egenskaper .....	13
3.5.2	Masugnsslagg .....	14
3.5.2.1	Masugnsslaggens sammansättning och egenskaper .....	14
3.5.2.2	Färg .....	16
3.5.3	Silikastoft .....	16
3.5.3.1	Silikastoft sammansättning och egenskaper .....	16
<b>4</b>	<b>Cementets hydratation</b> .....	<b>17</b>
4.1	Kalciumsilikatreaktion .....	17
4.2	Aluminatreaktion.....	18
4.3	Ferritreaktion.....	19

<b>5</b>	<b>Hydratationsproduktens utveckling .....</b>	<b>19</b>
5.1	Hydratationsproduktens mekaniska egenskaper.....	21
5.2	Hydratationens värmeutveckling.....	22
5.3	Tvångskrafter .....	24
5.3.1	Interna tvångskrafter .....	24
5.3.2	Externa tvångskrafter .....	24
5.4	Plastiska ytsprickor .....	25
5.5	Beräkning av hydratationsvärme.....	25
5.5.1	Manuell beräkning av hydratationstemperatur .....	25
5.5.2	Temperaturberäkningsprogram .....	26
5.6	Försenad ettringit bildning .....	28
5.7	Förebyggande av temperatur problem.....	28
<b>6</b>	<b>Massiva betongkonstruktioner.....</b>	<b>30</b>
6.1	Projektering av massiva betongkonstruktioner .....	30
6.1.1	Konstruktionsklasser .....	30
6.1.2	Planering och ledning av 1-klass betongarbete .....	31
<b>7</b>	<b>Kvalitetskontroll av betongkonstruktioner.....</b>	<b>32</b>
7.1	Temperatur kontroll.....	32
7.2	Beräkning av hållfasthetsutveckling .....	33
7.3	Betongens hållfasthet .....	33
7.3.1	Normprov .....	34
7.3.2	Konstruktionsprov .....	34
7.4	Åtgärder vid otillfredsställande kvalitet .....	35
<b>8</b>	<b>Kvalitetsuppföljning av vindkraftverksfundament.....</b>	<b>36</b>
8.1	Temperaturer .....	36
8.2	Hållfastheter .....	38
8.3	Slutsatser av kvalitetsuppföljningen.....	39
<b>9</b>	<b>Laboratorieundersökning på härdningstemperaturens inverkan på sluthållfastheten .....</b>	<b>40</b>
9.1	Syfte .....	40
9.2	Teori.....	40
9.3	Material & apparatur .....	41
9.4	Recept.....	42
9.5	Utförande.....	42
9.5.1	Delmaterial .....	42
9.5.2	Blandning .....	44
9.5.3	Gjutning.....	44

9.5.4	Lagring av kuber .....	46
9.5.4.1	Ugnskuber .....	46
9.5.5	Mognade kuber.....	48
9.5.5.1	Förberedande arbete .....	48
9.5.5.2	Provtryckning .....	49
9.5.6	Utvärdering av hållfasthets resultat.....	50
9.5.7	Beräkningar .....	51
<b>10</b>	<b>Resultat.....</b>	<b>51</b>
<b>11</b>	<b>Källförteckning.....</b>	<b>52</b>

## Bilageförteckning

Bilaga 1	Betongrecept
Bilaga 2	Fukthalt + graderingskurva
Bilaga 3	Tekniskt datablad över använda cementets egenskaper
Bilaga 4	Informationsblad över använda masugnsslaggets egenskaper
Bilaga 5	Informationsblad över använda masugnsslaggets egenskaper
Bilaga 6	Graf över härdningstemperaturer

## 1 Inledning

Vindkraftverk grundläggs oftast med betongkonstruktioner. För att kunna kontrollera krafterna som tillförs grundkonstruktionerna behöver själva fundamentet erhålla stora mått. Detta medför vissa utmaningar vid planering och produktion av fundamenten i form av betonghållfasthet, temperaturutveckling samt temperaturskillnader som kan bidra till sprickbildning.

För att säkerställa sig om kvalitén av en produkt görs kvalitetsuppföljning. Faktorer som inverkar på kvalitén i ett vindkraftverksfundament är bl.a. betongens kvalitet vid gjutning samt härdningstemperaturer som uppkommer under härdningsförloppet. För att få en uppfattning av betongens kvalitet i konstruktionen har jag gjort en kvalitetsuppföljning på betongens tryckhållfastheter samt härdningstemperaturer.

Betongen erhåller olika egenskaper vid olika sammansättningar, syftet med teoridelen i detta arbete är att ge en grundlig uppfattning om materialet betong. I slutet av detta arbete finns andra delen av examensarbetet som består av betonglaborationsrapporten.

### 1.1 Uppdragsgivare

EPV Vindkraft har grundats år 2007 av EPV Energi, vilket ägs av inhemska energibolag. Företaget bildades eftersom EPV Energis mål är att gradvis utveckla energiproduktionen miljövänligare. Det huvudsakliga verksamhetsområdet för EPV Vindkraft är förberedning av vindkraftverksprojekt i Österbotten. Under åren 2014-2015 bygger EPV Vindkraft Österbottens första vindkraftpark i industriell skala. Projektet befinner sig i Vasa och omfattar 16 vindkraftverk med en effekt på 3,3 MW/ kraftverk. (EPV Vindkraft, företaget, u.å.)

### 1.2 Syfte

Säkerställande av betongens hållfasthet i vindkraftverksfundament. Detta har gjorts i form av en kvalitetsuppföljning på betongtryckhållfastheter samt härdningstemperaturer.

Vindkraftverksfundament är massiva betongkonstruktioner som vid härdning kan få skadligt höga temperaturer i kärnan. Om förhöjda temperaturer uppkommer kan betongens sluthållfasthet påverkas negativt. Syftet med laboratorieundersökningen är att få en uppfattning om hur slaggbetongens hållfasthetsutveckling påverkas av olika härdningstemperaturer.

### 1.3 Avgränsning

I detta arbete behandlas betongens kvalitetsuppföljning. Armering/dimensionering av betongkonstruktioner ingår inte i detta arbete. Sprickor som kan uppkomma vid förhöjda temperaturförändringar i en betongkonstruktion har inte undersökts i detta arbete.



## 2 Betongens historia i världen

Konsten att tillverka cementliknande bindemedel går långt bak i tiden. Bindemedlet som användes i pyramiderna var bränd gips. Grekerna tillsatte vulkaniserad aska i bränd kalk vilket gav ett hydrauliskt bindemedel som hårdnade tillsammans med vatten och kunde gjutas under vatten. (BY 201 2004, s.20)

Engelsmannen Joseph Aspdin utvecklade portlandscementen som han patenterade 1824. Namnet kommer från Portland, Englands kust där det finns stenar av samma färg som cementen. Isaac Johnson från England förbättrade Aspdins metod 1843. Johnson brände råmaterialen upp till sintringstemperatur. Man kan säga att då uppkom dagens portlandscement. Den första verkliga ugnen befann sig i Kent, England.

År 1885 tog engelsmannen Frederick Ransome patent på bränning av råmaterialen i roterande ugn. Efter patenteringen utvecklades sintringsmetoden snabbt. Redan i början av 1900- talet började den industriella tillverkningen av roterande ugnar. Den nya tillverkningstekniken förbättrade cementets kvalitet och sänkte betydligt tillverkningskostnaderna. (Finnsementti, Suomalainen sementti u.å., s.5)

### 2.1 Finlands betong historia

I Finland inleddes cementtillverkningen i Savio år 1869. Endast 4000t cement tillverkades i året men efterfrågan var så liten att tillverkningen lades ner 1894. Nutida cementtillverkningen inleddes av Pargas Kalkbergs Aktiebolag år 1914. OY Lojo Kalkverk AB grundade en cementfabrik i Virkby 1919. Cementets användning växte i takt med att cementtillverkningen industrialiserades och betongarmeringen utvecklades. (BY 201 2004, s.22)

År 1914 var Pargas första cementugn världens största. Ugnens kapacitet uppgick till 400 000 tunnor cement i året, vilket var hälften mera än vad andra ”stora ugnar” kunde framställa på den tiden. Pargas cementet hade 25 % bättre hållfasthet än den importerade portlandscementen. (Finnsementti, Kotimaista laatua heti 1910-luvulla u.å. )

År 1904 utarbetade Jalmar Castren första konstruktionsritningarna av armerad betong till en byggnad. Helsingfors stads byggnadsinspektionskontor utgav första betongbyggnadsföreskrifterna 1913. Finlands Betongförening grundades 1925. (BY 201 2004, s22-24)

## 3 Betongens delmaterial

Betong är en konstgjord sten, där det hårdnade cementlimmet binder ihop stenmaterialet. Betongens delmaterial består av cement, vatten och ballast. Till detta kan även tillsatsmedel blandas in för att få eftersträfvade egenskaper som kan ha inverkan på massans arbetbarhet i gjutningsskede, hårdnade betongens täthet, hållfasthet eller ålderbeständighet. (BY 201 2004, s.31)

### 3.1 Cement

Cement är ett hydrauliskt bindemedel, vilket kännetecknas av att det stelnar genom reaktion med vatten i både luft och vatten till en hållbar slutprodukt. Cementets uppbyggnad har betydande inverkan på egenskaper i betongmassans arbetbarhet och åldersbeständighet i den hårdnade

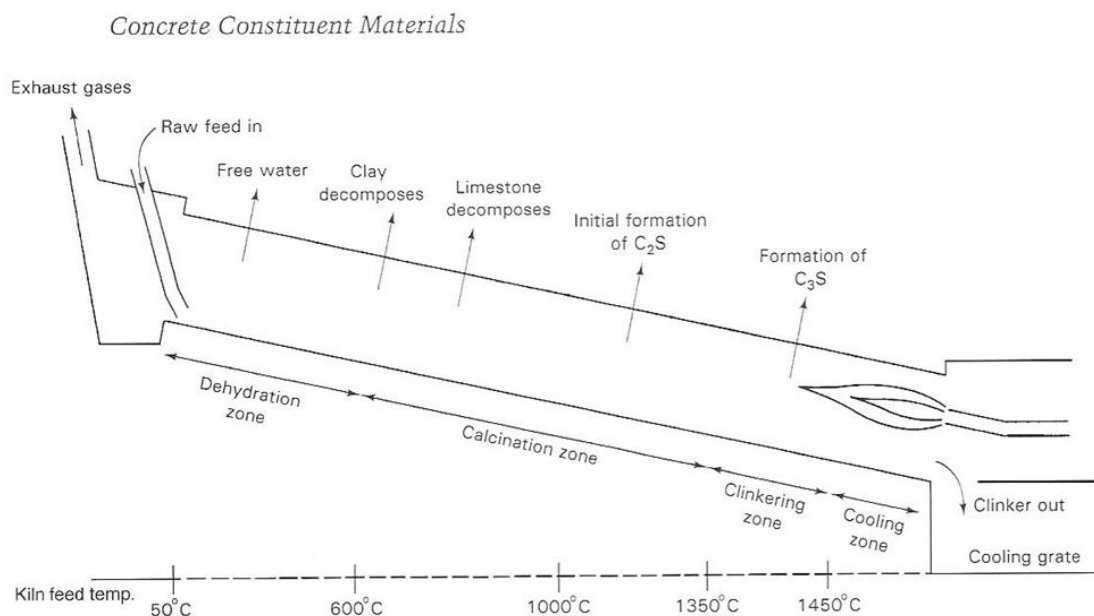
massan. Med val av olika cement uppnås olika egenskaper som kan ha inverkan på hållfasthet, värmeutveckling och kemisk motståndsförmåga. (BY 201 2004, s.39)

### 3.1.1 Cementtillverkning

Cementets huvudsakliga råmaterial är kalksten som i sin tur har kalciumkarbonat  $\text{CaCO}_3$  som huvudmaterial. Från industrin och kalkstensbrotts slaggsten kommer andra delmaterial: kiseloxid ( $\text{SiO}_2$  som förkortas till S i cementkemin), järnoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  som förkortas F) och aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  som förkortas A). (BY 201 2004, s.39)

Sedan 1970- talet har cementen i Finland tillverkats med tanke på lägre energiförbrukning med hjälp av en s.k. torrmetod. Det sprängda råmaterialet krossas, sorteras och flyttas till råmaterials cisterner. Stenarnas kemiska beståndsdelar bedöms för att kunna proportionera stenmaterialet. Kalkstenskross och andra behövliga material som t.ex. sand och slagg (under 10 %) som krävs vid tillverkningen blandas i en roterande kvarn med stålkulor. I kvarnen mals materialen till mjöl i önskad grovlek. Efter detta matas mjölet via ett förvärmningssystem till en roterande ugn med ca  $1400^\circ\text{C}$ . (BY 201 2004, s. 39-40) Våt metoden fungerar på samma sätt men då matas rå materialen in i form av rå slam. Våt metoden är mer energikrävande vilket bidrar till att den ersätts till torrmetoden. (Burström 2007, s.207).

Mjölet matas kontinuerligt in i den högre änden av den svagt lutande roterugnen som har en brännare i den lägre änden.(Nawy 1997, s.1-2-1-3) Ugnen brukar ha en längd på 80 m samt en diameter på 5-6m. (Ljungkranz & Möller & Petersons 1994, s.64) Bränningsvärmnen kommer från naturgas, olja eller pulveriserad kol som sprutas in och förbränns. Varma gaser evakueras i den högre änden av ugnen. Bränningsprocessen pågår från 20 minuter upp till 2,5h beroende på ugnens design. I den lägre änden där sintringszonen befinner sig är det som varmast.( Nawy 1997, s.1-3)



Figur 1. Cementförbränningsförloppets olika skeden. (Nawy 1997, figur1.2)

Det brända pulvret kyls snabbt ned och tas ut i den lägre änden. Då är den i form av mörka klumpar med en storlek på 6-50mm i diameter som kallas cementklinker. För att erhålla cement, mals cementklinker tillsammans med gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) till en partikelstorlek på  $10\mu\text{m}$  eller mindre. Gipset blandas in för att reducera cementets hydrationsprocess. (Nawy 1997, s. 1-3)

Uppvärmningen i ugnen bidrar till att kolsyra ( $\text{CO}_2$ ) avgår ur kalkstenen ( $\text{CaCO}_3$ ), vilket i sin tur övergår till kalciumoxid ( $\text{CaO}$ ). Råmaterialen innehåller även kiseloxid ( $\text{SiO}_2$ ), liten mängd ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) samt järnoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Oxiderna förenar sig med varandra under bränningsförloppet till ett antal nya kemiska föreningar s.k. klinkermineral, vilka är specifika för cement. (Burström 2007, s. 208)

Tabell 1. Typiska sammansättningen av portlands cement. Översatt till svenska.

Typiska sammansättningen av Portland cement			
Kemisk formel	Förkortning	Kemiskt namn	vikt %
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	Trikalciumsilikat	50
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	Dikalciumsilikat	25
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	Trikalciumaluminat	12
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	Tetrakalciumaluminatferrit	8
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CSH}_2$	kalciumsulfat dihydrat (gips)	3,5

Källa: Nawy 1997, tabell 1.2

Av naturen har råmaterialen en del föroreningar som blir inblandade i cementen. Den färdiga cementen innehåller  $\text{MgO}$  (från kalksten),  $\text{Na}_2\text{O}$  och  $\text{K}_2\text{O}$  (från lera), och  $\text{SO}_3$  (från bränsle). Dessa har små mekaniska egenskaper på cementen men kan ha betydande inverkan på hållfastheten. (Nawy 1997, s. 1-3)

### 3.1.2 Cementstandarder

Enligt betongnormerna skall de använda cement kvalitéerna vara CE-märkta och uppfylla kraven i SFS-EN 197-1 standarden. Cementstandarden SFS-EN 197-1 trädde i kraft 1.4.2001. Det var den första gemensamma byggnadsprodukt standarden som godkändes i EU. (BY 201 2004, s. 42)

Cementstandarden SFS-EN 197-1 definierar cementets sammansättning och kvalitetskrav. Enligt standarden är cementen ett hydrauliskt bindemedel med vilket menas att det är ett finmalt oorganiskt material som vid blandning med vatten omvandlas till pasta, binds med hjälp av en hydrations reaktion och behåller sin hållfasthet efter härdningen även under vatten. (BY 201 2004, s. 42)

Tabell 2. Godkända cementsammansättningar i Finland. Översatt till svenska.

Cementtyp	Sammansättningskrav (%)					
	klinker	slagg	silika	flygaska	kalksten	annat
CEM I	95...100	-	-	-	-	0...5
CEM II/A-S	80...94	6...20	-	-	-	0...5
CEM II/B-S	65...79	21...35	-	-	-	0...5
CEM II/A-D	90...94	-	6...10	-	-	0...5
CEM II/A-V	80...94	-	-	6...20	-	0...5
CEM II/B-V	65...79	-	-	21...35	-	0...5
CEM II/A-LL	80...94	-	-	-	6...20	0...5
CEM II/A-M	80...94	6...20				0...5
CEM II/B-M	65...79	21...35				0...5
CEM III/A	35...64	36...65	-	-	-	0...5
CEM III/B	20...34	66...80	-	-	-	0...5

Källa: BY 201 2004, tabell 2.3

### 3.1.3 Hållfasthetsklasser

Byggnadscementen delas upp i tre olika standardhållfasthetsgrupper. Med standardhållfasthet menas tryckhållfastheten som cementen erhåller vid 28 dygns ålder. (BY 201 2004, s. 43) Hållfasthetsklasserna är 32,5, 42,5 och 52,5 N/mm<sup>2</sup>. Till varje hållfasthetsklass finns även två korttidshållfasthetsklasser, där N betyder normal korttidshållfasthet och R som betyder hög korttidshållfasthet. (BY 201 2004, s. 43) I Finland används hållfasthetsklasserna 42,5 och 52,5. (semtu, sementit ja seosaineet, u.å.)

Cementets tryckhållfasthet testas enligt SFS-EN 169-1 standarden. (BY 201 2004, s. 55) I praktiken gjuter man 40x40x160mm cementprismor som provtrycks på ett 100mm span så att både drag- och tryckhållfastheten inverkar på brottet. Cementpastan består av cement, vatten och standardsand. Standardsanden heter CEM standard sand och innehåller kornstorlekar mellan 80µm och 1,6mm. Cementpastans sand/cement förhållande är 3 och vattencementtal 0,50. Dessa prismor förvaras i vatten med temperaturen +20°C. (Neville 2011, s. 53-54)

Tabell 3. Krav som ställs på cementens korttidshållfasthet och standardhållfasthet. Översatt till svenska.

Hållfasthetsklass	Tryckhållfasthet (MPa)		
	Korttidshållfasthet		Standardhållfasthet
	2 dygn	7 dygn	28 dygn
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5    ≤ 52,5
32,5 R	≥ 10,0	-	
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5    ≤ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	-	
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5    -
52,5 R	≥ 30,0	-	

Källa: BY 2012004, tabell 2.4

### 3.1.4 Andra egenskaper

Standarden SFS-EN 197-1 ställer inte krav på special egenskaper så som låg temperaturutveckling eller sulfatuthållighet, därmed hör dessa egenskaper inte in i CE märkningen. Enligt nationella bestämmelser kan dessa specialegenskaper ännu informeras som tilläggsinformation enligt den upphävda standarden SFS 3165: 1993 som behandlar både värmeutvecklingen och sulfatmotståndskraften.

Enligt SFS 3179 ses byggnadscement som långsamt värmeutvecklande om hydratations värmen under de 7 första dygnen inte överstiger 250 kJ/kg. Byggnadscement ses som sulfatbeständigt om cementet är tillverkat av klinker som innehåller högst 3 % trikalciualuminat och högst 5 % aluminium i form av aluminiumoxid. Också om masugnsslaggets andel i cementet är minst 70 % av portlandklinkers och slaggets gemensamma mängd, ses den som sulfatbeständigt. (BY 201 2004, s. 44)

### 3.1.5 Andra cement

För sprickor och håligheter har det utvecklats ett s.k. injekteringscement. De kännetecknas av cementets enorma kornfinhet, som förbättrar cementets och cementpastans reaktion samt inträngningens egenskaper. I allmänhet är injekteringscement vanlig portland - eller portlands blandcement vars specifika yta varierar från 600 till 900 m<sup>2</sup>/kg (Blaine). Injekteringscement vars kornstorlek minst 95 % är under 16µm kallas för mikrocement. (BY 201 2004, s. 39)

Murningscement består av portlandklinker, gips, kalksten och andra tillsatsmedel som bildar ett hydrauliskt bruk. (BY 201 2004, s. 49). Vid tillverkningen mals portlandklinker med 25-50 % kalksten och tillsatser. På detta sätt reduceras hållfastheten, vilket ger en förbättrad arbetbarhet samt frostbeständighet i massan. (Ljungkranz m.fl. 1994, s. 38)

Aluminatcement uppfanns i Frankrike 1908. Denna cement erhåller största delen av hållfastheten redan efter ett dygn. Aluminatcement tappar upp till 90 % av hållfastheten efter ca 30 år. Frankrike förbjöd användningen av aluminatcement till bärande konstruktioner i början av 40-talet. (Burström 2007, s. 210)

Aluminatcement är tillverkat av kalksten samt bauxit, innehåller i huvudsak kalsiumaluminater. Denna cement får inte användas i bärande konstruktioner eftersom aluminatcement inte innehåller portlandklinker vilket bidrar till att reaktionsprodukterna i cementen inte är ålderbeständiga utan förändras till svagare sammansättningar. Aluminatcement betong tål temperatur upp till 1500...1600°C, därför används den i tillverkningen av eldfasta bruk. I höga temperaturer förändras aluminatcementprodukter till beständig form. (BY 201 2004, s. 49). Betong som blandats av aluminatcement har god resistens mot sulfater och syror. (Ljungkranz m.fl. 1994, s. 39)

På marknaden finns även andra specialcement som t.ex. färgade och svällande. I Finland tillverkas inte sådana cement, deras användning är mycket liten. (BY 201 2004, s. 49)

### 3.1.6 Densitet och finhet

Cementets fastdensitet är ungefär 3100kg/m<sup>3</sup> och lösdensiteten ligger på 1000...1400kg/m<sup>3</sup> beroende på cementkvalité och packningsgrad. Ju större specifik yta cementen har desto mindre är lösdensiteten. Icke förpackade cement innehåller 2/3 luft. Vid packning kan upp till 40 % luft

reduceras från cementen. Vid transport och lagring av cement brukar man räkna med en volymvikt på 1200kg/m<sup>3</sup>.(BY 201 2004, s. 56)

Finheten uppskattas oftast av på basen av specifik yta. Den specifika ytan mäts med hjälp av en metod som mäter luftgenomträngningsmotstånd. Olika metoder kan användas för att mäta luftgenomtränglighet men de ger olika resultat. Oftast används R.L. Blains metod (SFS-EN196-6) (BY 201 2004, s. 56)

### 3.1.7 Kvalitetsövervakning av cementtillverkning

Kvaliteten övervakas ända från kalkbrottet med geologiska utredningar. Under pågående krossning av kalksten tas prov för undersökning. Efter homogenisering tas prov för att säkerställa kvalitén. Under förbränningsprocessen i ugn tas prov för analysering. I slutliga malningen tas prov för undersökning som är s.k. kvalitetsövervakningsprov, där finheten, bindningstiden och hållfastheten undersöks.

Enligt BY 201 skall cementproducenten, två gånger i veckan göra s.k. officiella cisternprov i samband med lastning. För cementen görs standardenliga prov enligt SFS-EN 197-1. Då cementen uppfyller kraven i SFS-EN 197-1 kan en varucertifiering (CE märkning) göras av en officiell instans som bestyrker att cementen uppfyller alla krav i standarden. I Finland är den officiella instansen SFS- Inspecta Sertifionti Oy som övervakar cementfabrikers kvalitetsövervakning samt att de följer SFS-EN 197-1. (BY 201 2004, s. 49-50)

## 3.2 Ballast

Stenmaterial som blandas in i betongen kallas för ballast. (Lagerkranz m.fl. 1994, s. 69). Av betongens delmaterial är 65...80 % av volymen ballast. Ballstens kvalitet har betydande inverkan på den slutliga betongens egenskaper. Som ballast kan man använda stenarter som erhåller bra hållfasthet och som inte påverkar cementets reaktion.

Som ballast lämpar sig vanliga stenmaterial samt tunga, malmhaltiga eller lätta vulkaniska stenmaterial. Naturstenen kan vara naturligt eller mekaniskt krossat. I betongen kan även konstgjorda stenmaterial användas som ballast t.ex. lättklinker och masugnsslagg i olika former, flygaska, tegelkross eller betongkross.

I Finland används vanligen granitbaserade naturstensmaterial som är ofta mekaniskt krossade. Återkrossning av gammal betong har blivit allt vanligare. Flygaska kan användas för att kompensera det fina stenmaterialet s.k. filler. När man kräver specialegenskaper som t.ex. slitbarhet så används s.k. tyngre stenmaterial.

Enligt betongnormerna skall stenmaterialet som används till ballasten uppfylla standarden SFS-EN 12620. Stenmaterialet bör vara CE-märkt och granskat. Om stenmaterialet inte är CE- märkt bör betongtillverkaren se till att miljöministeriets godkända kontrollant övervakar att alla tester görs på stenmaterialet. Enligt standarden skall följande undersökas: porighet, fuktighet, vatteninträngningsförmåga och andra egenskaper som har betydelse för betongens kvalitet. (BY 201 2004, s. 31-32)

Finländska stenarter är i regel lämpliga för betong. Stenmaterial som härstammar från granit har i medeltal en fastdensitet på  $2,68\text{kg/m}^3$ . Stenmaterialets vatteninträngnings och hållfasthetsegenskaper skall testas enligt SFS 1097-6. (BY 201 2004, s. 38)

### 3.2.1 Ballastgradering

Ballastgradering beskriver storleken på kornen och deras fördelning i viktförhållande. Graderingen bestäms vanligen med torrsiktning. Graderingskurvas position och form beskriver mycket bra stenmaterialets kornfördelning.

Med torrsiktningen undersöker man fördelningen på stenar som är över 0,125mm. Man brukar använda en standard siktningsserie med följande storlekar 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 31,5,63mm. Man räknar antalet stenar i vikt procent som gått genom en viss gallerstorlek. Anvisningarna för hur man torrsiktat en serie finns i standarden SFS-EN 933-1.

Ballastens finmaterial innehåll bestäms med våt siktning. Materialet torrvägs till (a) och hålls i ett kärl. I kärlet blandas några liter vatten, det grumliga vattnet hålls bort via 1 och 0,063mm sikt. Till provet läggs ytterligare några liter vatten som blandas och hålls bort. Denna procedur görs tills vattnet inte mera blir grumligt. Det som blivit kvar på 1 och 0,063mm siktet tvättas under rinnande vatten tills tvättvattnet inte blir grumligt. Båda tvättade materialen blandas tillsammans och torkas i +105 grader °C. Det torkade materialet vägs till (b). Då kan man räkna ut mängden som genomsläpps i 0,063mm med  $(a-b)/a*100$ .

Det finns presenterat flera ideala graderingskurvor men det går inte att säga vad som är den optimala kurvan. Både kontinuerlig och icke kontinuerlig kurva som saknar mellanstorlekar kan ge en god hållfasthet för betongen. Idén med planeringen av en graderingskurva är att få kornen maximalt ihop packade så att cementlimmet inte har mycket att fylla upp. (BY 201 2004, s. 33)

### 3.2.2 Form

Formen på ballasten har inverkan på den färska och härdade betongen. Runda och släta stenar ger en lättbearbetad massa som kräver minst cementlim, natursten och sand har dessa egenskaper. Där var natursten inte är tillgängligt måste stenkross användas. Krossad sten har en råare yta och kubisk form, detta resulterar i ökad cementåtgång för arbetbarheten. Oberoende om natursten eller krossad sten används bör man undvika avlånga former eftersom det leder till arbetbarhetsproblem. (Nawy 1997, s. 1-13)

### 3.2.3 Renhet

Stenmaterial som används får inte innehålla ämnen som är skadliga för betongens egenskaper, så som växt- och djurrikets förmultningsavfall s.k. humusämnen. Humus kan i värsta fall förhindra härdningen totalt. Humusinnehåll bestäms med ett humusprov i natriumhydroxid lösning. Humusen färgar lösningen mörkare, på basen av detta kan man konstatera humusgrad och användbarheten. Vissa humusämnen färgar inte lösningen mörkare, vilket gör att provet ger riktlinjer för humusinnehåll. Direktiv på hur man bestämmer organiska orenheter finns i standarden SFS-EN 1744-1.(BY 201 2004, s. 37)

### 3.2.4 Fukthalt

Stenmaterialet tas från naturen och förvaras oftast utomhus. Fukthalten varierar kraftigt. För att få fram verkliga fuktprocenten tas ett prov som torkas i 105°C, då man väger materialet före och efter torkning kan man räkna ut fuktprocent (SFS -EN 1097-5). Enligt 2004 års BY50 betongnormer skall stenmaterialets vattenabsorption bestämmas enligt SFS-EN 1097-6. Absorberat vatten befinner sig i öppna yt- porer. Stenens poröshet bestämmer absorptionsförmågan. En normal porös stens absorptionsförmåga är 0,3...0,5 % och en porös sten kan ha 1,0...1,5 %.

Enligt betongnormerna som togs i bruk år 2005 skall endast det fria vattnet som kommer med stenmaterialet räknas som tillsatt vatten vid planeringen av betong konsistensen. Man pratar om betongens effektiva vattenmängd vid räkning av det effektiva vatten- cementtalet. I de fall då stenmaterialets helhetsfukthalt är lägre än materialets absorptions förmåga, reduceras det av det tillsatta vattnet, den del som ännu absorberas vid räkning av effektiv vattenmängd. (BY 201 2004, s. 38)

### 3.2.5 Alkaliska reaktioner i betong

Det har uppkommit flera misslyckanden i form av svällning, vilket orsakas av reaktioner mellan olika typer av kiselhaltiga ballaster och alkalier ( $K_2O$  och  $Na_2O$ ) som cement innehåller. Den typ av sten som troligtvis reagerar i dessa reaktioner innehåller kiselhaltiga kalkstenar, hornsten, skiffer, flinta, vulkanisk glas, opal sten, kvartsit, sandsten och graniter. I vissa fall brukar dessa expansions reaktioner uppkomma först efter flera år i form av omfattande ytsprickor. I vissa fall kan det ta upp till 15...20 år förrän sprickbildning uppstår.

Faktorer som inverkar på alkaliska ballastens reaktionsgrad och omfattning är: (1) arten av den reaktiva kiseloxiden, (2) mängden reaktiv kiseloxid, (3) reaktiva materialens partikelstorlek, (4) mängden tillgänglig alkali och (5) mängden tillgänglig fukt. Om betongen hålls torr kommer inte steg 3 och 4 inverka på reaktionerna.

Om låg-alkalisk cement inte är tillgänglig kan en viss andel av cementet bytas ut mot pozzolanska material (låg alkan halt) t.ex. flygaska som inte alls innehåller alkali. På detta sätt kan man få alkalihalten reducerad. Pozzolanska material innehåller kiseloxid i en reaktiv form, kiseloxiden är mycket finfördelad vilket bidrar till en snabb reaktion med alkalier. På detta sätt kan en expansion av betongen undvikas då den resulterande alkali- kiseloxid pastan reagerar korrekt efter cement matrisen, vilket expansionen också gör. Det är sämst att ha små mängder av reaktiva ballaster som är utspridda i betongen, det leder till koncentrerad av expansion vilket bidrar till svår sprickbildning. (Nawy 1997, s. 1-18)

## 3.3 Vatten

Vatten som kommer från vattennätet eller drickbar naturvatten duger oftast för blandning i betong. Endast humushaltiga träskvatten och industriellt nedsmutsade vatten duger inte före vidare undersökningar har gjorts. Träskvattnet är surt och innehåller ofta sulfider samt sulfater men framförallt humus. Vid användning av träskvatten kan betongen förbli ohärdad.

Förutom humus tål färskbetong inget socker. En liten del (0,1 %) socker i vattnet eller i färsk betongen kan förhindra härdningsförloppet. Vattnet som används till betongtillverkningen eller efterbehandlingen får oftast inte innehålla mer än 0,03 viktprocent klorider ( $Cl^-$ ).



Oljor och fetter kan även förhindra cementets hydratation. De kan fästa sig i betongpartiklarnas ytor och därmed förhindra reaktionsbeloppet, fästningen med ballasten eller orsaka överloppsluft i betongen.

Om vattnet ser rent ut, inte smakar- eller luktar illa, kan det oftast användas för betongtillverkningen. Vattnet som används vid gjutningsarbetet får inte skumma, innehålla alger eller mikroorganismer. Vattnets duglighet kan uppskattas med bindningsprov eller ännu pålitligare med en kemisk analys av vattnet. (BY 201 2004, s. 62-63)

### 3.3.1 Vatten cement tal

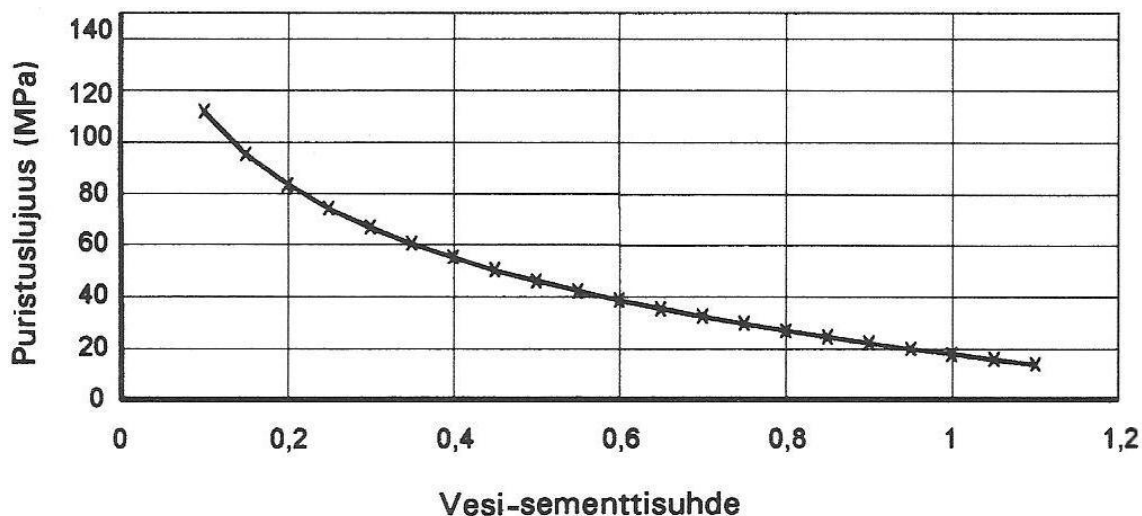
Vattencementtalet har betydande inverkan på sluthållfastheten. Teoretiskt sett skall vattendelen vara 25 % av cementens tyngd för att nå en optimal hydratation. Det binds fysikaliskt ytterligare 15 % vatten i pastaporerna vilket betyder att 40...45 % vatten av cementets tyngd skulle ge den optimala hydratationen. (BY 201 2004, s. 53)

Vattencement talet (vct) räknas enligt formeln:

$$vct = \frac{v}{c}$$

v = vatten vikt/volym

c = cement vikt/ volym (BY201 2004, s. 53)



Figur 2. Tryckhållfasthetsutveckling som funktion av vatten/cement tal. (BY 201 2004, figur 2.14)

Det är känt att en ökning av vattenmängden ökar porositeten i cementpastan proportionellt. Därmed reduceras hållfastheten. Reduceringen av hållfastheten kan räknas med följande formel:

$$f_c = f_{c0} e^{-kp} \quad (\text{Nawy 1997, formel 1.11})$$

Där  $f_c$  är hållfastheten,  $f_{c0}$  är den verkliga hållfastheten utan porositet och  $k$  är en konstant som beror på specifika enskilda fallet. Formler som denna beaktar inte fördelningen på porstorlekarna, formen eller om porerna är fyllda eller tomma. Denna formel ger således en grov uppskattning av slutliga hållfastheten. För vanlig betong med samma grad av hydratation bestäms hållfastheten

primärt av porositeten. Eftersom porositeten bestäms av ursprungliga v/c talet i normala betonghållfastheter kan v/c förhållandets ”lag” tillämpas, denna lag är framtagen av Abrams (1919): för givna material, beror hållfastheten endast på en faktor- förhållandet på v/c- talet. Detta kan uttryckas:

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{(v/c)}} \quad (\text{Nawy 1997, formel 1.12})$$

Där  $K_1$  och  $K_2$  är konstanter och (v/c) är vatten/cement förhållande i viktenheter. Eftersom betong råmaterialens kvalitéer varierar kan man inte räkna ut den exakta hållfastheten.

Det bör noteras att dagens moderna cement innehåller en eller flera mineralblandningar som är mer eller mindre cementhaltiga. Därför har det blivit allt vanligare att använda benämningen vatten/cementhaltiga material förhållande, vilket framhäver existensen av blandade cementer. (Nawy 1997, s. 1-11-1-12)

### 3.4 Tillsatsmedel

Betongens egenskaper kan regleras med hjälp av tillsatsmedel. Man kan påverka betongens egenskaper i den färska massan eller i den härdade massan med hjälp av tillsatsmedlen. Tillsatsmedlens andel i betongblandningen är mycket liten. Medlen bör vara CE godkända eller ha en utredning på egenskaperna som är gjort av en godkänd instans.

Vid användning av tillsatsmedel skall tillverkarens rekommendationer följas men får ändå inte överskrida 50g/kg cement (leveransskede). Om överdoseringens egenskaper är bekanta kan en överdosering godkännas. Om tillsatsmedlets mängd är under 2 g/kg cement skall tillsatsmedlet blandas direkt i vattnet som används i betongblandningen. (BY 201 2004, s. 63)

*Flyttillsatsmedel* kan användas som vattenreducerande av att påverka konsistensen och vattenbehovet. Detta medel skiljer sig från andra p.g.a. den har kraftigare effekt och den ger mycket liten retardation. Oftast används sulfonerade melamin eller naftalen formaldehydkondensat som flyttillsatsmedel. Kemiska verknings sättet likar vattenreduceringsmedlets, vilket använder sig av positivt och negativt laddade molekyler. Vattenhalten kan reduceras med 10-30 % beroende på utgångsreceptet. En överdosering av flytmedel kan ge nedsatt hållfasthetstillväxt.

*Vattenreducerande* medel ger mer lättflytande konsistens med bibehållen betongsammansättning eller så minskar man v/c talet och behåller konsistensen. Detta medel reagerar efter samma princip som flyttillsatsmedlet. Vattenreducerande tillsatsmedel är uppbyggt av ytaktiva ämnen. Reaktionen uppstår när cementkornen blir dispergerade av de aktiva komponenterna i medlet genom att fästa på dess yta och göra dem positivt och negativt laddade så att de stöter ifrån varandra. Då tar de inte ihop med varandra och vattnet får flyta in mellan kornen så att cementpastan blir lättflytande. Verksamma medlet i vattenreducerande tillsatser brukar vara lignosulfonat, hydroxykarboxylsyra eller melamin- eller naftalenformaledehydkondensat. Detta medel blandas in på betongfabriken.

*Luftporbildande* tillsatsmedel bildar små luftporer i betongen, vilka skall fungera som expansionskärl då vattnet fryser. Detta medel gör betongen även mera lättbearbetad. Oftast är de aktiva komponenterna vinsolharts eller en tensid. Detta tillsatsmedel sänker vattnets ytspänning. Medlet blandas in på betongfabriken.

*Retarderande* tillsatsmedel kan fördröja härdningsförloppet upp till flera dygn, utan att reducera hållfasthetsutvecklingen, när den kommit i gång. Tillsatsmedlet brukar användas vid långa transporter eller då det behövs längre bearbetningstid. Detta medel brukar vara baserat på organiska föreningar som är lösliga: lignosulfonater och salter av hydroxykarboxylsyror eller på fosfater. Retarderande effekt framträder oftast då reaktionen mellan cement och vatten förhindras då medlet absorberas, bildar komplex eller utfällning på cementkornens yta.

*Accelererande* tillsatsmedel används för att påskynda hållfasthetstillväxt och tillstyvnads förlopp. Accelererande tillsatsmedel innehåller främst lösliga oorganiska salter, som t.ex. kalciumklorid  $\text{CaCl}_2$ , vilket är mycket effektivt men kloriden orsakar rostangrepp på armeringsjärn så det används endast i inomhusklimat, där korrosionen inte är ett problem. Kalciumklorid tillsätts oftast i 30-35 % lösning med en halt på 0,2-0,7 % av cementvikten. (Lagerkranz m.fl. 1994, s. 106-117)

*Frys punktnedsättande* tillsatsmedel sänker fryspunkten på vattnet i färsk betong. Denna egenskap fås då salter upplöses eller då alkoholer med högre molekyl vikt, ammoniak, karbamid blandas i vattnet. Därefter doseras tillsatsmedlet efter vattenmängden. De flesta fryspunktnedsättande medel brukar markant fördröja härdningsförloppet. Det finns blandningar som innehåller både fryspunktnedsättande och accelererande tillsatsmedel. Denna typ av tillsatsmedel brukar bestå av kombinationer av pottaska och kalcium klorid. Tredje typens fryspunktnedsättande tillsatsmedel främjar en mycket snabb hydrations process som utnyttjar en betydligt högre tidig exotermisk temperatur i betongen för att för snabba härdningsförloppet, även ifall då omgivande temperatur är låg för en normal härdning. (Nawy 1997, s. 3-13)

Det finns övriga tillsatsmedel som t.ex. expanderande, korrosionsinhiberande tillsatsmedel. För undervattensgjutningar och sprutbetong finns skilda tillsatsmedel. (Lagerkranz m.fl. 1994, s. 118-119).

### 3.5 Övriga bindemedel

Övriga bindemedels kvalité, tillverkning, lagring, hantering och kontinuerlig kvalitetsövervakning utförs av Säkerhets- och kemikalieverket Tukes, ifall då produkten inte är CE- märkt. Material provtagning utförs av ett godkänt testverk eller den instans som utfärdat en CE-märkning.

Bindemedlens användbarhet kan konstateras på tre sätt:

- CE- märkning
- Tillverkare, användare eller produktens försäljare som en avtalspart, som med kan kallas för produktens representant, godkänt testverk som andra avtalspart och Säkerhets- och kemikalieverket Tukes som tredje avtalspart tecknar tillsammans ett kvalitetsövervakningskontrakt, som tangerar kontinuerliga kvalitets- samt myndighetsövervakningen.
- Om inget kvalitetsövervaknings kontrakt är tecknat, görs en skild granskning på varje leveransparti. Produktens användare är ansvarig att kvalitetskontrollerna är utförda. (BY50 2012, s. 172)

### 3.5.1 Flygaska

Flygaska som uppfyller SFS-EN 450 standarden ses som lämplig för användning i betongtillverkningen. Standarden delar upp flygaskan i A och B klass, dessa klasser användas i betongtillverkningen. Klass A bör uppfylla glödförlustkravet  $\leq 5\%$  samt klass B får högst ha  $7\%$  glödförlust. Vid tillverkning av betong med flygaska skall bl.a. detta beaktas:

- Flygaskans kvalitet variationers inverkan på betongens egenskaper
- Betongens arbetbarhet
- Betongens hållfasthetsutveckling och temperaturens inverkan på detta
- Tillräcklig cementmängd i beaktande med miljöförhållanden för att säkerställa långtidshållfasthet.
- Tillsatsmedlens dosering, speciellt vid användning av porbildande tillsatsmedel skall flygaskans kolhalt säkerställas vilket har betydelse för doseringen av tillsatsmedlen.
- Efterbehandling
- Betongfärg

Om det ställs köldbändighetskrav på betongen skall man undvika användning av flygaska för materialet hindrar bildningen av porer. Endast A-klass flygaska får användas för tillverkning av frostbeständig betong om dess reaktionsegenskaper har undersökts och en luftporsmätning utförs på arbetsplatsen under gjutningsarbetet.(BY 50 2012, s. 175)

#### 3.5.1.1 Flygaskans sammansättning och egenskaper

Flygaska uppstår i kolpulvereldade kraftverk och värmeverk. Då kolpulvret eldas upp får man en finkorning obrännbar restprodukt som lämnar i rökgasfiltret, filterdammet kallas för flygaska. (Ljungkranz m.fl. 1994, s. 133) Enligt Huges (Neville 2011, s. 85) är flygaskans partiklar sfäriska och har en mycket fin grovlek, majoriteten av partiklarna har en diameter mellan mindre än  $1\ \mu\text{m}$  och  $100\ \mu\text{m}$ . Den specifika ytan brukar vara  $250\text{-}600\text{m}^2/\text{kg}$  med Blaines metod. (Neville 2011, s.85)

Egenskaperna på flygaskan bestäms av kolsorten som förbränns, byts kolsorten ut så blir askans sammansättning annorlunda. En förbränningstemperatur på  $1500\text{-}1700^\circ\text{C}$  ger en rundare kornform på askan och en högre glashalt. Lägre förbränningstemperatur ger flygaskapartiklar med kantigare form med delvis kristallint, inert material(kan inte ingå kemiska föreningar)

Glashalten ligger normalt på  $60\text{-}90\%$ , vilket är ett mått på reaktiviteten. Inert är det kristalliniska aska. Flygaskans huvudkomponent är aluminiumsilikatglas. Den kristallina delen innehåller mullit, kvarts, magnetit och hämatit. På kornens ytor kan det även finnas små partiklar av kalium- och kalciumsulfat. Den väsentligaste reaktionen sker då flygaskans  $\text{SiO}_2$  reagerar med cementets  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Reaktionsprodukten är samma typ av cementpasta som med portlandscement. (Ljungkranz m.fl. 1994, s. 134-137)

Flygaskan är en biprodukt som har ett brett användningsändamål. I betongproduktion kan man i grova drag ersätta  $30\text{kg}$  cement med  $100\text{kg}$  flygaska. Med flygaska kan man även ersätta dyrbara jord- och stenmaterial som i t.ex. asfaltproduktion och grundkonstruktioner i väg och markbyggnad.(Rudus, lentotuhkan kierrätys u.å.)

Inblandning av flygaska ger en förbättrad flytbarhet i massan med samma v/c tal. Vattenseparationen minskar med detta tillsatsmedel. Flygaska lindrar effekten på luftpor bildande, plasticerande och vattenreducerande tillsatsmedel, vilket bör beaktas vid dosering. Betong med flygaska har lägre värmeutveckling, dock minskar inte risken för temperatursprickor eftersom draghållfastheten utvecklas långsamt med flygaska. (Ljungkranz m.fl. 1994, s. 137-138)

### 3.5.2 Masugnsslagg

Mald och granulerad masugnsslagg som uppfyller SFS-EN 15167-1 standarden får användas i betongtillverkningen. Masugnsslagg kan användas som bindemedel tillsammans med byggcement om man tar i beaktande dess inverkan på betongmassans och hårdnade betongens egenskaper. Då bör man fästa hänsyn till:

- Masugnsslaggens bindemedelsegenskaper beroende av dess konsistens, kylningssätt och malning.
- Betongens arbetbarhet och vattenseparering.
- Betongens hållfasthetsutveckling speciellt vid låga temperaturer
- Masugnsslaggens inverkan på tillsatsmedlens användning
- Betongens efterbehandling med tanke på åldersbeständighet.(BY 50 2012, s. 175)

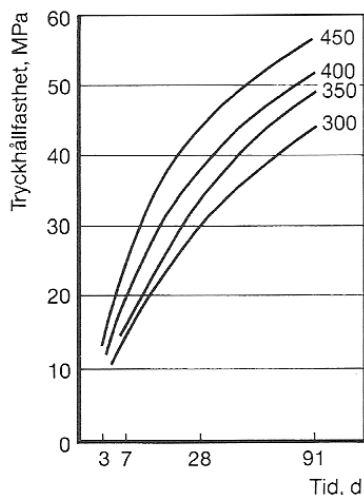
#### 3.5.2.1 Masugnsslaggens sammansättning och egenskaper

Vid järnframställningen uppkommer masugnsslagget som en restprodukt. Ovanpå det smälta järnet flyter slagget som tappas ut och kyls snabbt med luft eller vatten. Då man kyler snabbt med vatten fås ett material som liknar grus, som kallas granulerad masugnsslagg. Den uppkomna produkten mals till ungefär samma grovlek som cement.

Vid snabb nedkylning hinner slaggen inte kristallisera utan den får en glasig (amorf) struktur, det glasiga slagget är ett latent hydrauliskt material, med vilket menas att slagget och vattnet behöver en aktivator för att reagera.

Förhållandena i masugnen bestämmer långt slaggens kemiska sammansättning. Slaggers sammansättning kan ofta skilja sig från den optimala för betong. Jämnaste kvalitén fås från samma järnverk med konstanta råmaterial. Den kemiska sammansättningen av slagget ger inte en exakt uppfattning av reaktiviteten. Med hjälp av hydrauliska moduler kan man bedöma slaggets kvalitet, då används en formel för att räkna ut förhållandet mellan CaO och SiO<sub>2</sub>. Ett större förhållande mellan CaO/SiO<sub>2</sub> ökar slaggets reaktivitet. (Ljungkrantz m.fl. 1994, s. 133-140) Enligt de finska betongnormerna är slaggets reaktivitet 0,80 av cementets reaktivitet.

Till formen är slaggekornen kantiga och kan likna krossat glas. Kornen kan innehålla luftporer eller inneslutningar av kristallint material. Slaggen mals oftast med 1-3 % gips eller anhydrit för att optimera sulfathalten samt att öka reaktiviteten i blandningen med portlandscement. Vanligaste specifika ytan ligger på 300 till 500m<sup>2</sup>/kg. (Ljungkrantz m.fl. 1994, s. 141)Fasta densiteten ligger mellan 2900...3100kg/m<sup>3</sup>.(BY 201 2004, s. 60)

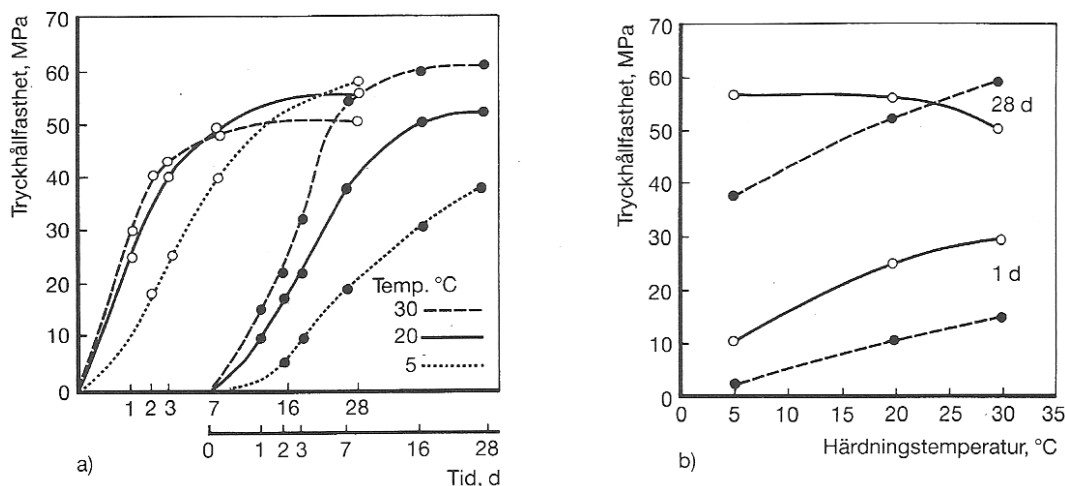


Figur 3. Slaggens finhets inverkan på hållfastheten i 75/25 slaggbetong. Cementets specifika yta  $300\text{m}^2/\text{kg}$ . (Ljungkrantz m.fl. 1994, figur 6.4:1)

Cementets alkali och sulfater aktiverar slagget. De erhållna reaktionsprodukterna är av samma modell som med portlands cement, dock är förhållandet mellan  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  lägre, samt cementpastan innehåller mer aluminium- och magnesiumoxid. Kristaller med samma struktur som ettringit och monosulfat bildas då aluminiumoxiden reagerar med kalk och gips eller kalciumhydroxid.

Vid inblandning av slagg med samma v/c tal minskar vattenseparationen och betongmassan erhåller en bättre arbetbarhet. Värmeutvecklingen är låg under de första dygnen vilket är en fördel vid gjutning av större konstruktioner. (Ljungkrantz m.fl. 1994, s. 141-143) Sulfatbeständigheten förbättras vid inblandning av slagg. Om slaggets andel är över 70 % i bindemedlet, räknas bindemedlet som sulfatbeständigt. (BY 201 2004, s. 60)

Under de 7 första dagarna ger slaggen en nedsatt hållfasthet i betongen eftersom den reagerar långsammare än cement. Mellan 7 och 28 dagar har slagginblandningen ingen betydelse på hållfastheten. Vid 28 dagar och högre ålder ökar slaggen oftast betongens hållfasthet. (Ljungkrantz m.fl. 1994, s. 142-143)

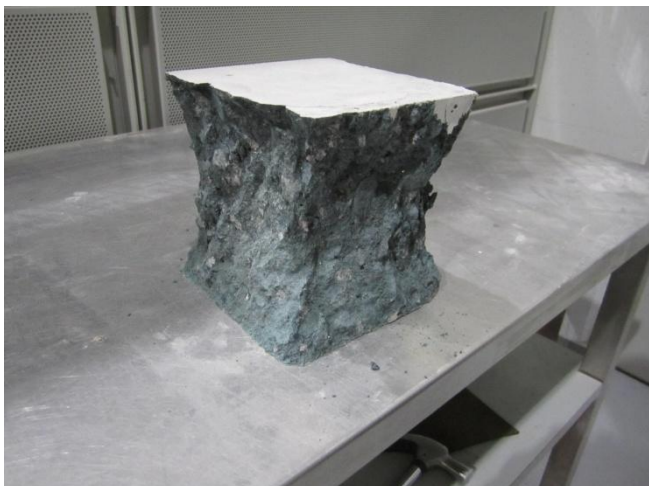


Figur 4. Härdningstemperaturens inverkan på hållfastheten för betong med och utan slagg, cementhalt  $360\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $v_{ct}=0,40$  (Lagerkrantz m.fl. 1994, figur 6.4:2)

- Hållfasthetsutveckling (slaggbetong kurvorna är förskjutna)
- Hållfasthet vid 1 och 28d som funktion av härdningstemperaturen.

### 3.5.2.2 Färg

Betong som innehåller slagg har ljusare grå nyans i ytan än normal Portlandscement. Vid provtryckning av slaggbetongkuber ser man den inre färgen i betongen. Färgen har en djup blå-grön nyans som ljusnar med tiden då det utsätts för syre. Färgens nyans uppkommer i reaktionen mellan slaggets sulfider och cementets olika sammansättningar. Nyansen varierar beroende på slagg/cement förhållande, härdningsförhållanden och oxidationsgrad. (Nawy 1997, s. 2-19-2-20)



*Figur 5. Tydlig färgvariation mellan betongens yttre och inre yta i 60/40 slaggbetong. (Ralf Wasberg)*

### 3.5.3 Silikastoft

Silikastoft som används i betong bör uppfylla standarden SFS-EN 13263-1. Silikastoft kan användas som bindemedel tillsammans med byggcement om dess inverkan på betongens egenskaper är kända. Vid användning av silikatstoft bör man fästa uppmärksamhet vid följande aspekter:

- Kvalitetsvariationernas inverkan på betongens egenskaper
- Silikastofts finhet inverkar på konsistensen, vilket kräver användning av mera flytbarhetsmedel.
- Tillräcklig mängd cement med hänsyn till åldersbeständighet då konstruktionen utsätts för olika miljöförhållanden
- Silikastoftet skall inte påverka höjande på tidiga hållfasthetsutvecklingen i rums- eller lägre temperatur.
- Vid användning av tillsatsmedel, speciellt porbildande skall reaktionen mellan medlet och det kolhaltiga silikatstoftet kännas till eftersom det har inverkan på doseringen av tillsatsmedlet. (BY 50 2012, s. 176)

#### 3.5.3.1 Silikastoft sammansättning och egenskaper

Silikastoft uppkommer vid framställning av ferrokisel och kiselmetall, vilka är legeringsämnen till stål. Då man sammansmälter kvarts och kol i ugn, bildas det rökavgas. (Lagerkrantz m.fl. 1994, s. 128) Enligt American concrete institute innehåller rökavgaserna SiO som oxiderar och kondenseras

till mycket fina sfäriska partiklar av amorf (glasig) silika (SiO<sub>2</sub>), därav kommer namnet. Silika är mycket reaktivt med dess finhet som snabbar upp reaktions processen med kalciumhydroxid som uppkommit från Portlands cement hydratation. Silikastoft partiklarna tränger sig mellan cement partiklarna, vilket hjälper att få högre densitet. (Neville 1997, s.86)

Vid reaktionen i betongen bildas CSH- gel, kalciumsilikathydrater. CSH- gelens uppbyggnad skiljer sig mellan betong med enbart cement. Vid beräkning av mängden silikastoft som teoretiskt kan reagera med kalciumhydroxid skall förhållandet mellan kalciumoxid och silika tas i beaktande. Förhållandet mellan kalciumoxid/ silika är 1,1 jämfört med 1,5, som cement har.

Betongens sammanhållning (kohesion) och stabilitet förbättras med silikastoftinblandning men risken för vattenseparation ökar. Vattenbehovet ökar kraftigt med inblandning av silikastoft, då är det nödvändigt att blanda in flyt- eller vattenreducerandetillsatsmedel för att silikastoftets inverkan kan utnyttjas. Vid förhöjda härdnings temperaturer, 40-50°C har det en accelererande verkan på hållfasthetsutvecklingen. Silikastoft används för framställning av höghållfastbetong. (Lagerkrantz m.fl. 1994, s.130-132)

## 4 Cementets hydratation

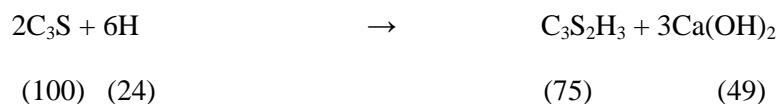
Då vatten blandas tillsammans med cement, uppkommer cementpasta, som är bindemedlet i betong. D.v.s. vattnet får silikaterna och aluminaterna att producera en massa som hårdnar med tiden. Slutprodukten är hydratiserad cementpasta. (Neville 2011, s. 13)

De två huvudföreningarna i cement är calcium silikaterna C<sub>3</sub>S och C<sub>2</sub>S. C<sub>3</sub>S som kallas för *alit*, som hydratiserar mycket snabbare än C<sub>2</sub>S som kallas för *belit*. I kommersiellt använda cement sorter finns det små mängder av föroreningar som uppkommer från klinker. Dessa föroreningar har stor inverkan på de hydratiserande silikaterna.

### 4.1 Kalciumsilikatreaktion

Hydratations produkten av C<sub>3</sub>S är mikrokristallinhydrat C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub> med en del separerande kalk som blir till kalciumhydroxid Ca(OH)<sub>2</sub>. C<sub>2</sub>S uppför sig likadant men frigör avsevärt mindre kalciumhydroxid. Nuförtiden är kalciumsilikathydrat förloppet betecknat C-S-H. De ungefärliga hydratations reaktionerna kan skrivas:

För C<sub>3</sub>S:



För C<sub>2</sub>S:



Talen som är inom parentes visar mängdförhållandena. Av den kemiska förklaringen kan man se att båda silikaterna kräver ungefär samma mängd vatten för hydratationen men C<sub>3</sub>A producerar mer



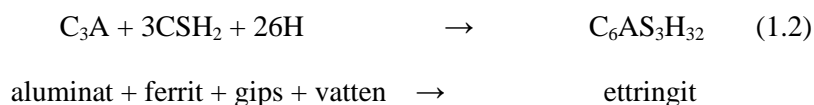
än dubbelt så mycket kalciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) som bildas genom hydratisering av  $\text{C}_2\text{S}$ . (Neville & Brooks 1990, s. 12-13)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  gör betongen mycket alkalisk,  $\text{pH} \approx 12,5$ . Cementen innehåller alkali, vilket ytterligare höjer  $\text{pH}$  värdet till ca 13. Cement som har hydratiserat innehåller ca 25 %  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . (Ljungkrantz m.fl. 1994, s. 49)

I verkligheten är kalcium silikat hydratation processen väldigt oregelbunden, den kan inte ha en korrekt samman sättnings formel. Därför kallas det oftast bara för C-S-H (kalcium silikat hydration), så att ingen formel är nämnd. Reaktionerna i formlerna ovan är mycket exotermiska. Dessa reaktioner och andra som är beskrivna här till nästa, reagerar först i ytan av den finfördelade cementen, när ytlagrena reagerar måste vatten vandra genom hydratations produkterna för att nå ohydratiserat material så att processen kan framskrida. Reaktionen kommer att fortgå med en ständigt minskande hastighet, antingen tills all vatten som är tillgängligt för hydrationen är använt eller tills all fri rum som är tillför hydrations produkten är fylld. (Nawy 1997, s. 1-5)

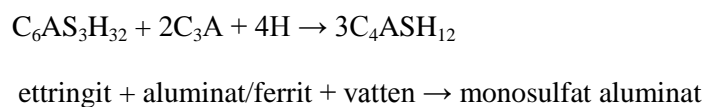
## 4.2 Aluminatreaktion

Om inte gips skulle blandas in med Portland cement klinker skulle  $\text{C}_3\text{A}$ (aluminat) omedelbart reagera med vatten och bilda kalciumaluminathydrater (CAH) (Ljungkrantz m.fl. 1944, s. 49), som skulle bidra till en tidig härdning. Gipset bildar ett lager på  $\text{C}_3\text{A}$  partiklarna som retarderar hydratationsprocessen, lagret kallas för ettringit. Den kemiska reaktionen kan förklaras:

När  $\text{C}_3\text{A}$  reagerar med gips ( $\text{CaSO}_4$ ) bildas ettringit:



Efter vattentillsättningen tar det några minuter så har en liten del av  $\text{C}_3\text{A}$  reagerat och ettringit belagts på cementkornen. Det är en långsam reaktion. Efter ett dygn är ettringit innehållet som störst. Efter detta omvandlas ettringiten till monosulfat.(BHBs49) Gipset försvinner i denna reaktion, ettringit och  $\text{C}_3\text{A}$  fortsätter reagera:



Därmed är monosulfat aluminat den stabiliserande processen i betongen.(Nawy 1997, s. 1-5) Det är tillgången på lösligt gips som bestämmer vilken mineral som bildas eller är stabilt. En stund efter vattentillsättningen, när sulfathalten i cementet är högt, bildas ettringit. När sulfaterna förbrukas så sjunker koncentrationen och monosulfat uppkommer

Lösligheten för  $\text{C}_3\text{A}$  ökar kraftigt vid förhöjda temperaturer, vilket innebär att monosulfat bildas lättare. Vid höga härdningstemperaturer bildas monosulfat istället för ettringit. Processen börjar vid ca  $40^\circ\text{C}$  och ökar vid högre temperaturer. Ettringiten kan återbildas vid avkylning och ge svällning, vilket kallas sekundär ettringitbildning. För att förebygga skadlig sprickbildning och svällning bör man undvika temperaturer över  $60\text{-}70^\circ\text{C}$ . (Lagerkrantz m.fl. 1994, s. 49)

### 4.3 Ferritreaktion

Ferritfasen är mycket mindre reaktiv än aluminatreaktionen ( $C_3A$ ) så den reagerar inte så mycket med gips. (CCEHB1-5) I reaktionen bildas nålformiga kristaller, vilkas sammansättning beror på mängden tillgänglig sulfat. (BHBs49) Reaktionen kan skrivas:



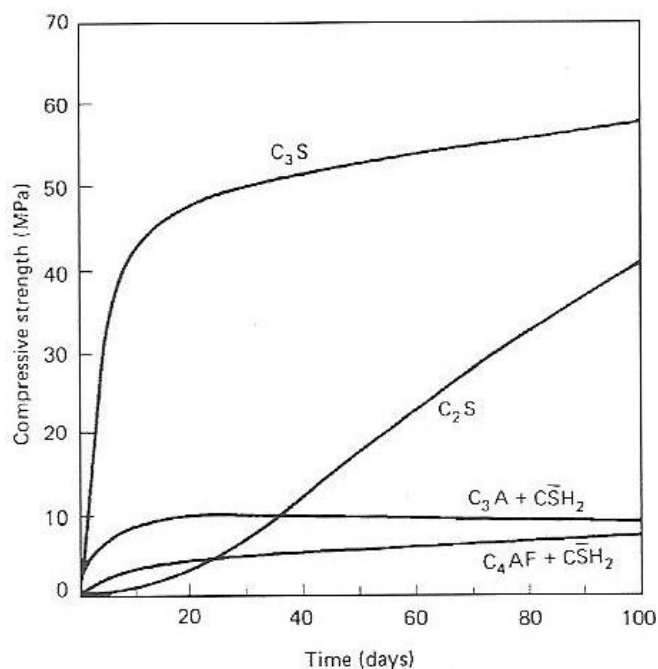
ferrit + kalciim hydroxid + vatten  $\rightarrow$  aluminat/ferrit + ferritaluminat hydroxid

(A, F) betyder att bildningen av A och F kan variera i hexagonala hydraterna. Men förhållandet skall vara samma i moderföreningarna. Dessa hydraters namn erhålls från att de brukar uppkomma i tunna hexagonala skivor. Tetrakalcium aluminat hydrat är strukturellt relaterad till monosulfoaluminat; ferritaluminat hydroxid är formlös.

Det bör betonas att de kemiska formlerna som presenterats är ungefärliga. Det kan förekomma upp till 5 % föroreningar i råmaterialen som används vid tillverkningen av ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $MgO$  mm.) dessa atomer hänger med ända till hydratarens sammansättning, så kemiska förklaringarna är inte alltid den samma som ovan nämnda. Föroreningarna har betydelse på betongens hållbarhet samt den kemiska motståndskraften.

## 5 Hydratarens utveckling

Hydratarens reaktionerna i Portlands cement sker olika i olika faser som nämnts ovan. Hållfasthetsutvecklingsgraden i olika hydratarens produkter varierar kraftigt. Största delen av tryckhållfastheten kommer från kalcium silikaterna.  $C_3S$  hydrataren sker snabbare än  $C_2S$ , därmed är den viktig för den tidiga hållfasthetsutvecklingen. Aluminat och ferrit fasernas hydrataren är tidig men bidrar lite till hållfasthetsutvecklingen.

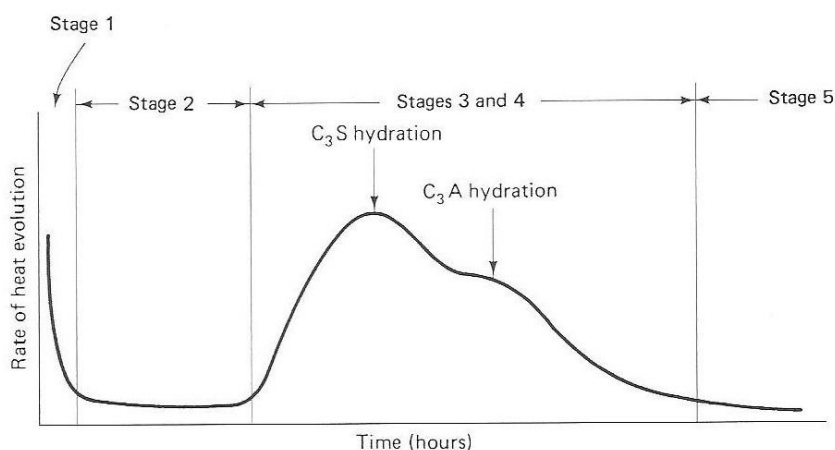


Figur 6. Tryckhållfasthetsutveckling av de olika komponenterna som funktion av tiden. (Navy 1997 figur 1.3)

Hydratationsförloppet för Portlandcement kan delas in i fem olika faser på basen av mängden frigjord temperatur. I första skedet av värmefrigivning väts material+ cementkornen, vilket pågår i några minuter.

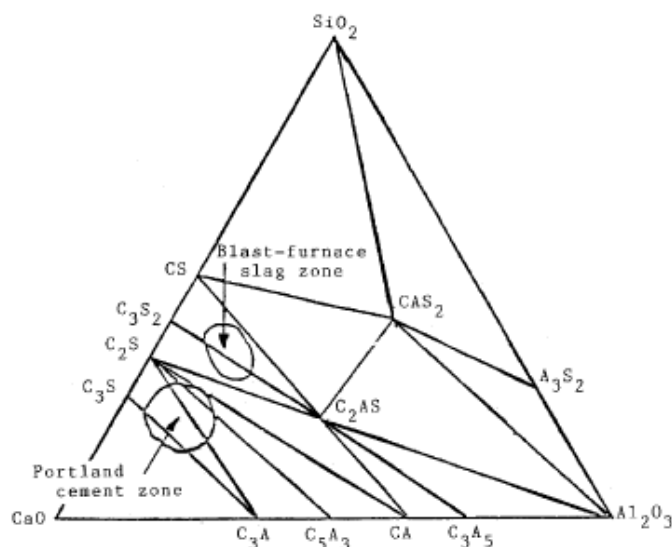
Andra skedet som kan pågå i flera timmar har liten hydratationsaktivitet, cementpastan återstår som vätska. I tredje skedet börjar  $C_3S$  hydrataionen, under detta skede kommer initial och slutliga sättningen uppkomma, detta på grund av de utvecklade hydratationsprodukterna och mikrostrukturella skelett.

Fjärde fasen kan kännetecknas med  $C_3A$  hydrataionen, efter reduceringen av gips. I femte och slutliga skedet avtar reaktionshastigheten, så länge det finns vatten i porerna tätas de med ytterligare hydratationsprodukter. (Nawy 1997, s. 1-5-1-6)



Figur 7. Värmeutvecklingsförloppet i olika skeden med Portlands cement. (Nawy 1997, figur 1.4)

Forskningar tyder på att hydratationens utveckling är ungefärligt lika då en del av portlandscementen byts ut mot slagg. Som ternära diagrammet nedan visar kan man se hur portlands cement och slagg (Blast-furnace slag) ligger i samma huvudgrupp, fastän portlands cement befinner sig huvudsakligen i trikalciumsilikat ( $C_3S$ ) fältet och slagget befinner sig till största delen i dikalciumsilikat ( $C_2S$ ) området. För att uppnå en snabbare hydratation i slaggbetong skall portlands cement, alkali salters eller kalkets andel ökas. (American Concrete Institute 2000, s. 4-5)



Figur 8. Ternära diagrammet visar sammansättning av portlands cement och slagg i komponenterna  $CaO-SiO_2-Al_2O_3$  American Concrete Institute 2000 (figur 1.3).

## 5.1 Hydratationsproduktens mekaniska egenskaper

Vad som bestämmer de mekaniska egenskaperna hos härdad cement beror inte mycket på kemiska detaljers hydrationsreaktioner, utan den fysiska mikrostrukturen som är utvecklad som resultatet av dessa reaktioner. Av en kontinuerlig matris är C-S-H producerat, uppkommer det en reduktion av porositeten. Det är denna porositet som i huvudsak är ansvarig för ökningen i tryckhållfasthet med en ökad grad av hydratation. Härdade C-S-H matrisen innehåller också ohydraterade rester av cementkorn, relativt stora kristaller av kalcium hydroxid och monosulfoaluminat kristaller. De två senare nämnda är viktigare för slitstyrka än tryckhållfasthets hänsyn. (Nawy 1997, s. 1-7) Porer uppkommer i Portlands cement i varierande mängd och storlek. Generellt brukar de klassas i följande storlekar:

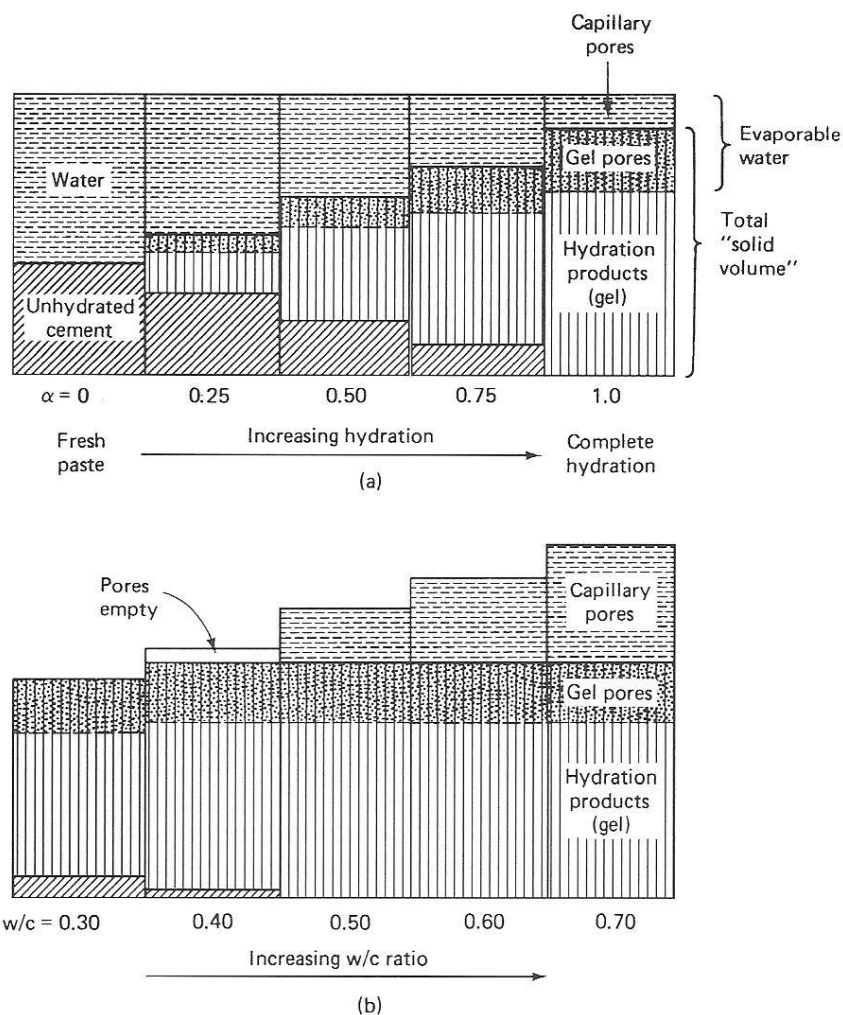
- mikroporer: <2,5nm
- mesoporer: 2,5nm till 100nm (0,1µm)
- makroporer: > 100nm

Det är möjligt att relatera tryckhållfastheten i den härdnade pastan till porositeten. Man kan dela porerna i två olika storlekar. Gelporer med en diameter på < 10 nm som är en väsentlig del av mikrostrukturen i härdnade massan. Kapillärporer (>10nm i diameter) har uppkommit då det inblandade vattnet inte har tillverkat olika hydrationsprodukter i porerna. Ju mera vatten man använder till blandningen desto större kapillärporer bildas. Storleken på gel porerna är i stort sett oberoende av mängden inblandat vatten. Det är möjligt att räkna ut volymfraktionen av porerna och fast fraktion med hjälp av två faktorer: vatten/cement (v/c) tal och hydratiseringsgrad ( $\alpha$ ) som betecknas med skala 0 till 1. Följande formler är empiriskt framtagna av T. C Power (1958). Volym av totala hydrationsprodukten =  $0,68\alpha \text{ cm}^3/$  av cementen mängden (inkl. gel porer)

- volym av ohydraterad cement =  $0,32(1-\alpha) \text{ cm}^3/\text{g}$  av cement mängden
- volymen av kapillärporerna =  $[w/c-0,36\alpha] \text{ cm}^3/ \text{g}$  av cementmängden
- volymen av gel porer =  $0,16\alpha \text{ cm}^3/ \text{g}$  av cementmängden

$$\text{kapillär porositet (relativa kapillärpors volym)} = \frac{\frac{v}{c} - 0,36\alpha}{\frac{v}{c} + 0,32}$$

Från ovanstående formler kan man se hur v/c talet i huvudsak reglerar den kapillära porositeten, som i sin tur reglerar permeabiliteten och hållfastheten i härdnade pastan. Detta är grunden till v/c förhållandets ”lag” som de flesta blandningars förhållanden är baserade på. För att producera höghållfasthets, lågpermeabilitets betong är det därmed nödvändigt att använda lågt v/c tal för att säkra en hög grad av hydratation. (Nawy 1997, s. 1-7)

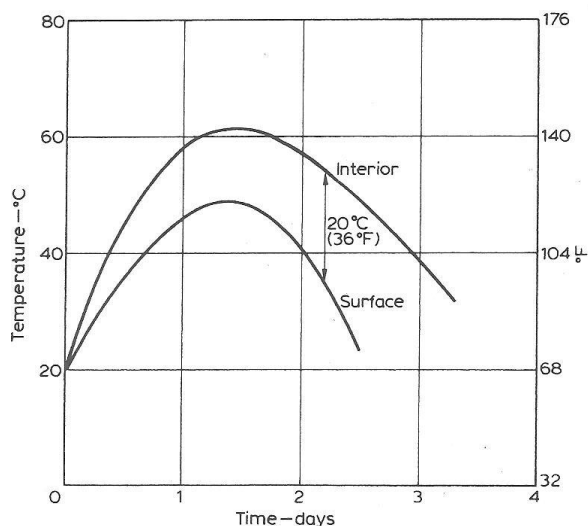


Figur 9. Volymrelationer bland hydratationsprodukterna i hydraterande Portlands cementpasta. (Nawy 1997 figur 1.5)

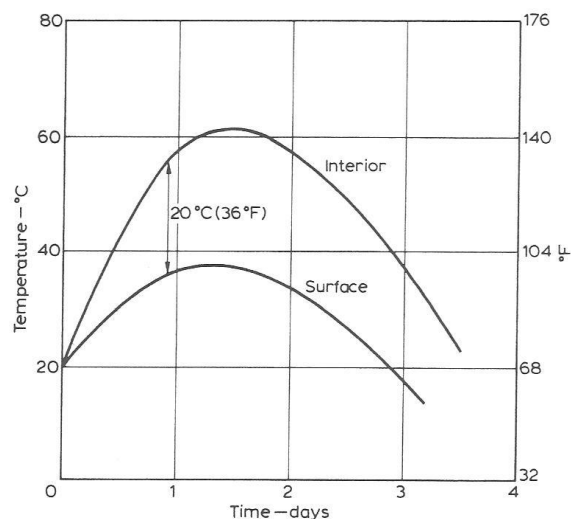
- a) Konstant  $v/c$  tal = 0,50
- b) Ökande  $v/c$  tal ( $\alpha = 1,0$ )

## 5.2 Hydratationens värmeutveckling

Som flera andra kemiska reaktioner så är hydratationsprocessen exotermisk, upptill 500J/g energi kan frigöras i processen (Neville 2011, s. 37). Betongens värmeledningsförmåga är relativt låg vilket bidrar till högre hydratationstemperatur i kärnan.

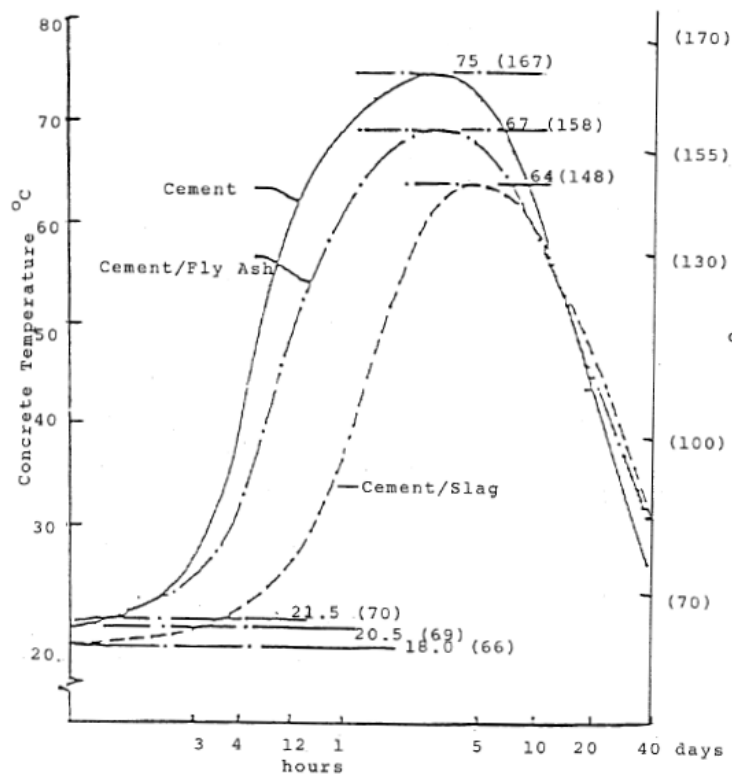


Figur 10. Exempel på ytans och kärnans värmeutvecklingskillnad som orsakar externa sprickor. Den kritiska 20°C temperaturskillnaden uppkommer vid avsvälning. (Neville 2011 figur 8.24)



Figur 11. Exempel på ytans och kärnans värmeutveckling som orsakar interna sprickor. Den kritiska 20°C skillnaden uppkommer i uppvärmningsskedet. Sprickorna uppkommer först när kärnan kylts ner till lägre temperatur än omgivningen. ((Neville 2011 figur 8.25)

Speciellt i massiva gjutningar kan hydratationens temperaturutveckling styras med olika tillsatsmaterial. Då masugnsslagg blandas in i betong, minskar den tidiga hydratationens värmeutveckling direkt proportionellt mot mängden inblandad slagg. American Concrete Institute 2000, s. 11)



Figur 12. En jämförelse av den utvecklade hydratationsvärmens vid användning av olika bindemedelsblandningar. (American Concrete Institute 2000 figur 5.7)

### 5.3 Tvångskrafter

Hydratations värmen expanderar betongen, på grund av detta bildas dragspänningar i konstruktionen som kan utveckla sprickor ifall då dragspänningarna överskrider draghållfastheten. Tvångskrafterna uppkommer av temperaturskillnaderna, det finns två olika modeller av tvångskrafter, interna och externa.

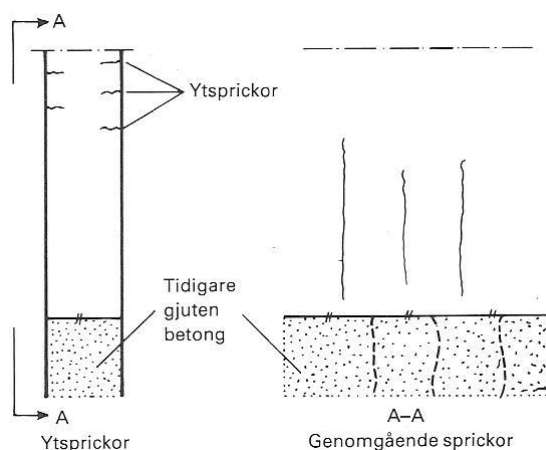
#### 5.3.1 Interna tvångskrafter

*Interna tvångskrafter* uppkommer då betongens yta kyls ner fortare än kärnan. (Neville 2011, s. 395) Detta fenomen uppkommer när den varma inre betongen hindrar ytans avsvälning(krympning) . (BY 112 1981, s. 256) Eftersom betongen sväller vid högre temperatur bildas det drag- och tryckspänningar mellan den varma och kalla delen. Den verkliga händelsen är komplicerad då en stor del av betongens krypning bidrar med dragspänningar, vilket sker i samma skede. (Neville 2011, s. 395)

Uppkomst av sprickbildning i betongkonstruktionens yta är ett tecken på att en konstruktion har blivit utsatt för interna tvångskrafter. Sprickorna brukar inte vara så djupa, vanligtvis några tiotal mm. (Ljungkrantz & Möller & Petersons 1992, s. 639) För att undvika sprickbildning skall inte temperaturskillnaderna överstiga 20°C (BY 112 1981 s256). Interna tvångskrafter kan även uppkomma då betongen gjuts mot en kall yta. Då härdar vissa delar av betongen i olika temperaturer, vilket kan bidra till intern sprickbildning.

#### 5.3.2 Externa tvångskrafter

*Externa tvångskrafter* av termiska rörelser kan resultera i sprickor av armerade konstruktioner, även i tunna konstruktioner. Detta händer då väggar gjuts in i befintliga konstruktioner som förhindrar de termiska rörelserna som uppkommer i den nygjutna väggen. I sådana fall uppkommer vertikala sprickor som går genom hela väggens tjocklek. Dessa sprickningsproblem kan undvikas med en korrekt planering av armering. (Neville 2011, s. 395-399)



Figur 13. Sprickor kan uppkomma som yt- eller genomgående sprickor i en konstruktion (Lagerkrantz m.fl. 1992 figur 27.1:1)

## 5.4 Plastiska ytsprickor

När nygjuten betong som ännu är plastiskt utsätts för uttorkning dras ytan ihop p.g.a. sammandragningar som kallas plastisk krympning. Detta kallas plastiska krympsprickor eller torksprickor, vilket kan leda till omfattande sprickbildning.

Betong som har flygaska eller silikastoft som tillsatsmaterial är speciellt benägna för plastiska krympsprickor. Ytsprickor kan undvikas med rätt efterbehandling. (Lagerkrantz m.fl. 1992, s. 349)



Figur 14. Ytsprickor tätas i vissa fall med tätningfärg (Ralf Wasberg)

## 5.5 Beräkning av hydratationsvärme

Den frigjorda värmen i en betongkonstruktion anses vara direkt proportionell till mängden cement. Vid planering av betongkonstruktioner kan hydratationstemperaturer beräknas manuellt för hand eller med dataprogram

### 5.5.1 Manuell beräkning av hydratationstemperatur

Hydratationsvärmen som frigörs betraktas vara direkt proportionell till cementmängden. Den utvecklade värmemängden vid en bestämd tidpunkt kan beskrivas:

$$Q_c = q_{cem} * C \quad (16.2:1)$$

där

$Q_c$  = totala mängden utvecklad hydratationsvärme per betongvolym,  $J/m^3$

$q_{cem}$  = totala mängden utvecklad hydratationsvärme per cementmängd,  $J/kg$

$C$  = cementhalten i betongen,  $kg/m^3$  (bhb s548)



Hydratationstemperaturen uttrycks som inre genererad energi vid beräkning av temperaturförlopp för ung betong. Den genererade värmeeffekten kan räknas ut genom tidsderivering av föregående formel. (bhb s548)

$$P_c = \frac{dQ_c}{dt} = \frac{dq_{cem}}{dt} * C \quad (16.2:2)$$

$P_c$  = genererad värmeeffekt per betongvolym, W/m<sup>3</sup>

Hydratationstemperaturen anses vara proportionell mot cementets hydratationsgrad som kan beskrivas med formeln:

$$q_{cem} = \alpha * q_u \quad (16.2:3)$$

$\alpha$  = cementets hydratationsgrad

$q_u$  = cementets hydratationsvärme efter fullständig hydratation ( $\alpha = 1$ ), J/kg.

Ur följande matematiska uttryck fås  $\alpha$ :

$$\alpha = e^{-\lambda_1 \left[ \ln \left( 1 + \frac{t_e}{t_1} \right) \right]^{-k_1}} \quad (16.2:4)$$

$t_e$  = ekvivalent mognadsålder, fås ut vid beräkning av ekvivalent mognadsålder.

$\lambda_1, t_1, k_1$  = matematiska anpassningsparametrar.

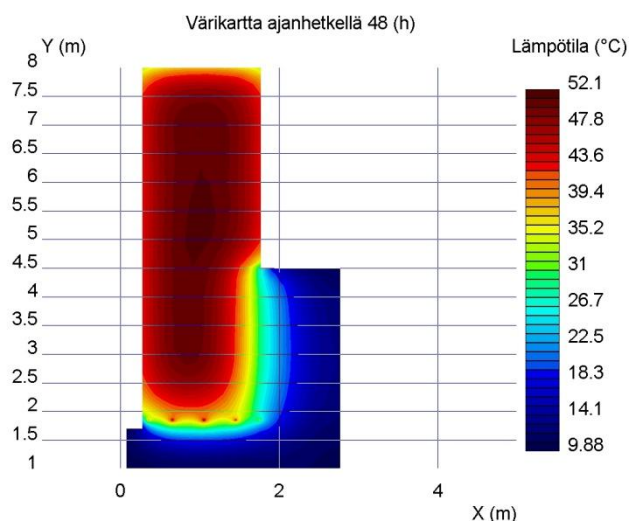
I princip kan det finnas flera olika sammansättningar av parametrarna  $\lambda_1, t_1$  och  $k_1$  som har likvärdiga beskrivningar av hydratationsgraden. Därför skall dessa parametrar endast ses som matematiska verktyg. I detta fall är den verkliga materialegenskapen hydratationsgraden  $\alpha$ . (bhb s548)

Utan materialteknisk koppling till hydratationsgrad, kan formlerna (16.2:3) och (16.2:4) användas direkt för anpassning till hydratationsvärmen. Anpassningsprocessen inkluderar fyra oberoende parametrar,  $\lambda_1, t_1, k_1$  och  $q_u$ . Dessa formler kan användas för databaser i betongtemperatur beräkningsprogram. (Ljungkrantz 1994, s. 548-549)

### 5.5.2 Temperaturberäkningsprogram

Det finns flera beräkningsprogram för betongkonstruktioners temperatur och mognadsutveckling. Vissa program är mera exakta än andra, detta beror på hur många olika påverkande faktorer som tas med i beräkningen. Det bör noteras att förhandsberäkningarna är ungefärliga och kan variera.

För 25 år sedan lanserade Rudus BetoBlus beräkningsprogrammet för betongkonstruktioner. Med programmet kan man räkna ut i förväg bl.a. ut hållfasthetstillväxt och temperaturutveckling. Med denna simulering kan den lämpligaste betong blandningen framtas för en specifik konstruktion. (Rudus, Betoplus- ohjelmasta apua betonivalujen suunnitteluun ja seurantaan u.å.)



*Figur 15. Temperaturutvecklingsprognos vid 48h efter gjutning. Utfört med Betoplus beräkningsprogram. (Rudus, Betoplus- ohjelmasta apua betonivalujen suunnitteluun ja seurantaan u.å.)*

Lunds tekniska högskola samt Vattenfall AB har i tillsammans tagit fram ett dataprogram för simulering av härdande betong. Detta program heter Hacon och kan laddas ner gratis från internet. För att beräkningen skall ge trovärdiga resultat bör man ha bra kunskap om materialegenskaperna för den använda betongen. (Lunds Tekniska Högskola, Hacon – Ett program för simulering av härdande betong 2004)

NCC AB har med bidrag av SBUF tagit fram ett program i samarbete med Cementa AB, JEJMS Concrete AB och Svenska Fabriksbetongföreningen. Programmet heter Hett97 och har utvecklats av JEJMS Concrete AB. Detta program har 13 inprogrammerade typkonstruktioner efter vilket det räknar ut temperaturutvecklingen i konstruktionen. Tilläggsfaktorer finns bl.a. olika arbetssätt så som isolering, täckning och uppvärmning kan tilläggas i räkningen. (Svenska Byggbranschens Utvecklingsförbund, Informerar nr 97:31 u.å.)

År 2014 har SBUF tagit fram ett nytt modulbaserat verktyg, Produktionsplanering Betong. Programmet har vidareutvecklats från Hett97. Detta program stöder planering samt produktion av betongkonstruktioner. Programmet har inprogrammerade typfall men ett fritt och mer avancerat läge kan väljas. I programmet ingår en modul av materialparametrar med vilka man kan utvärdera temperatur- och hållfasthetsutveckling med olika betongblandningar. (SBUF, Produktionsplanering Betong 2014)

Cementtillverkaren Finnsementti erbjuder kunder en kostnadsfri planeringstjänst med Betometri-programmet. Detta program kan preliminärt räkna ut temperatur- och hållfasthetsutveckling. För beräkningen behövs mått på konstruktion, betongrecept, form- och isoleringsmaterial samt arbetsplatsens uppskattade väder. Programmet kan även använda dataloggerens temperaturdata för uppskattning av hållfasthetsutveckling. (Finnsementti, Betometri u.å.)

## 5.6 Försenad ettrignit bildning

Försenad ettrignit bildning uppkommer då betongen i härdningskedje blir utsatt för hög temperatur. Då temperaturen överstiger 70°C upphör vanliga uppkomsten av ettrignit i den ohärdade betongmassan vilket bidrar till att överflödigt sulfat lämnar i porlösningen. Denna sulfatlösning börjar senare reagera med den härdade betongen vilket ger uppkomst av ettrignit, därför kallas fenomenet för försenad ettrignit bildning. (West 1996, s. 74)

Detta fenomen uppkommer då ettrignit bildas efter att betongen härdat fullständigt, då ingen sulfat tillförs från utsidan av cementpastan. Detta kan orsaka skador som syns efter flera månader eller år. Med undantag av högt översulfata cement har denna skada endast upptäckts på betong som varit utsatt för temperaturer över ca 70°C. (Bensted & Barnes 2002, s. 282)

Den mineraliska ettrigniten är en calcium sulfataluminat som har den kemiska sammansättningen  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$  den uppkommer naturligt men kan även uppkomma i betong då sulfater är tillgängliga.

Det är känt att försenad ettrignit bildning kan orsaka expansion och splittring av betongen. I praktiken uppkommer skadorna först när konstruktionen har varit utsatt för väder i flera år. Detta tyder på att det behövs en yttre fuktbelastning för att få reaktionen att nå en skadlig grad. Om både en alkalisilika reaktion och försenad ettrignit bildning ägt rum i en konstruktion, kan båda faktorerna påverka svällning samt sprickbildning av betongen. (West 1996, s. 74)



*Figur 16. Sprickbildning på en sula som orsakats av försenad ettrignit bildning (Nanayakkara Anura u.å.)*

## 5.7 Förebyggande av temperatur problem

Enligt ACI 207.1R-96 Mass Concrete kan man med fyra olika faktorer påverka temperaturen i massiva gjutningar: (1) Bindemedelsblandningen, eftersom vissa bindemedel avger mindre värme kan man blanda in olika bindemedel som har lägre hydratationsvärme. (2) Förkylning av betongens delmaterial, som tar ner betongmassans temperatur under gjutningsarbetet. (3) Efterkylning av konstruktion med hjälp av ingjutna kylkällor. (4) Planering av arbetsutförande. (American Concrete Institute 1996, s. 12)

Med val av rätt betongblandning kan man undvika höga härdningstemperaturer, vilket leder till lägre temperaturskillnad i konstruktionen. I Finland tillverkas inte byggcement som skulle vara klassat som långsamt härdnande (LH-cement). Därför bör man blanda in masugns slagg, vilket har lägre reaktionsvärme. (BY 201 2004, s. 548)

Vanligtvis anses en slagghalt på 65 till 80 % av bindemedlet vara optimalt i större massiva gjutningar. En hög slaggmängd bidrar till betydlig reducering av temperaturutvecklingen på samma gång som betongen erhåller högre hållfasthet. Slaggmängder på 50 till 65 % har använts i mindre massiva gjutningar med god framgång. (Slagcement.org, reducing stress u.å.)

Delmaterial kan kylas ner, effektivaste inverkan fås genom nerkyllning av vatten. Då tillsätts is vid blandningen av betongen. I sådan process är det viktigt att säkerställa isens fullständiga smältning innan satsen är färdig blandad. Ballasten kan förvaras i skugga och kylas med vattenbesprutning men detta är inte en effektiv lösning. (Neville & Brooks 1990, s. 165-166)

I varma klimat kan gjutningsarbetet begränsas till nattetid eller kallare perioder då omgivningens temperatur samt luftfuktighet hindrar uppvärmning av betongmassan under gjutningsarbetet. (American Concrete Institute 1996, s.12)



*Figur 17. Gjutning nattetid medför flera fördelar bl.a. fungerar logistiken smidigare (Ralf Wasberg)*

Kylrör kan gutas in i tjocka konstruktioner där begränsningen av hydratationstemperatur är mycket viktig. Då skall man eftersträva att montera kylrören så att kylvattnet kan inkopplas redan några timmar efter att röret täckts med betong. I kända projekt har man använt 25mm plaströr med 0,5...0,6m avstånd vilkas rörlängder har varit 100...200m. Med ett korrekt planerat rörkyllningssystem är det möjligt att få ner temperaturförhöjningen med 10...15°C, beroende på förhållanden. (BY 112 1981, s. 259)

Betongens konsistens kan aldrig väljas så att sprickor från temperaturskillnaderna skulle undvikas. Man kan även isolera betongen för att minska temperaturskillnader. Vid isolering av betongkonstruktionen skall isoleringen avlägsnas först då när konstruktionen närmar sig samma temperatur som omgivningen, annars kan sprickor uppkomma. (BY 201 2004, s. 548)

Efterbehandling med vatten eller efterbehandlings medel förhindrar en för tidig torkning av ytan. Skydd av ytan i form av tunn plastfilm hindrar en för tidig avdunstning.(BY 50 2012, s. 128).



*Figur 18. Exempel på ett värme- och fuktisolerat vindkraftverksfundament från EPV: s projekt i Vasa(Ralf Wasberg)*

## 6 Massiva betongkonstruktioner

Förr användes termen ”massivbetongkonstruktion” för konstruktioner som hade stora dimensioner så som t.ex. gravitationsdammar. Nuförtiden skall betongkonstruktioner beaktas som massiva om dess temperaturutveckling kan leda till sprickbildning som bör förhindras och uppföljas.(Neville 2011, s. 395) Enligt Betongteknikens lärobok BY201 kan man som tumregel hålla över en meter tjocka konstruktioner som massiva.(BY 201 2004, s. 546)

### 6.1 Projektering av massiva betongkonstruktioner

Ansvariga huvudplaneraren av en betongkonstruktion bör ha ett kompetens utlåtande av FISE (Byggnads-, VVS- och fastighetsbranschens personkompetenser FISE Ab). Om den ansvariga konstruktionsplaneraren inte har ett kompetensutlåtande av FISE som krävs för projektets kompetensklass, bör en annan planerare anställas, som innehar det krävda kompetensutlåtande. (BY47 2013, s. 41)

#### 6.1.1 Konstruktionsklasser

Planeraren och byggherren har möjlighet att välja lämplig konstruktionsklass efter betong- och arbetsutförandets kvalitet. (BY 201 2004, s. 155) Konstruktionen får klassificeras i valfri klass då den planerade klassens planerings- och arbetsutförandes krav uppfylls. (Finlands byggnadsbestämmelsesamling B4 2001, s. 5) Betongkonstruktioner delas upp i tre klasser:

- 1-klass associeras med krävande betongkonstruktioner
- 2-klass tangerar normala betongkonstruktioner
- 3-klass är avsett för enkla småarbeten.

På basen av konstruktionsklass bestäms

- planerarens kvalifikation
- arbetsledningens kvalifikation
- betongtillverkningsapparaturens precision
- arbetsutförandets noggrannhet

Konstruktionsklassen betecknas efter hållfasthetsklassen, då blir t.ex. beteckningen i 2-klassens konstruktioner K35-2. Konstruktionsklassen ställer krav på användningen av hållfasthetsklass:

- 3 klassens arbeten får högst innehålla K20 betong
- 2 klassens arbeten får högst innehålla K40 betong. (BY 201 2004, s. 156)
- 1 klassens arbeten skall utföras med betong som blandats på en fabrik som är granskad på ett sätt som är godkänt av miljöministeriet. Konstruktioner och byggnadsdelar som kräver särskild kompetens för planering eller konstruktioner som kräver särskild försiktighet vid tillverkning klassificeras räknas till 1-konstruktionsklass. Som krävande ses förspända konstruktioner och onormalt stora konstruktioner eller flerskiktselement.

### 6.1.2 Planering och ledning av 1-klass betongarbete

Planeraren av en 1-klass betongkonstruktion bör ha utfört en byggnadsteknisk utbildning på högskola eller universitets nivå, som innehåller fördjupningskurser inom betongkonstruktion. Om byggprojektet har flera konstruktörer, bör en utses som huvudplanerare som ser till att delplaneringarna bildar en helhet som uppfyller kraven. (Finlands byggnadsbestämmelsesamling B4 2001, s. 5)

En ny markanvändnings- och bygglag har trätt i kraft 1.9.2014. Planerings- och arbetslednings kravklasser presenteras i lagen. I lagförordningarna samt i kompletterande delar kommer kravklassernas beslutsamhet och duglighetskrav presenteras. Lagförordningarnas publicerings datum är ännu oklart. (Fise, ajankohtaista 2014)

Gjutplan samt protokoll över betongarbetet är en viktig del av produktionsplanering i platsgjutna konstruktioner, eftersom de används som granskningslistor under gjutningarnas olika skeden. Gjutplanens planeringsdel görs före gjutningsarbetet, protokollet fylls i under och efter gjutarbetet. Som blankett kan by 401 användas, som är en färdigt framtagen hjälpblankett för produktions och kvalitetsdokumentering av betongarbeten. (BY 201 2004, s. 210) I gjutplanen fästs uppmärksamhet till:

- Formar och dess stödkonstruktioner
- Armering
- Uppdelningen av gjutningsskeden
- Den gjutna betongens egenskaper
- Gjutningsutförande, betongförflyttningar, vibrering, gjutningshastighet, arbetsfogar
- Tidsplan, betong åtgång, arbetsledning, arbetsstyrka, arbetsskift, förberedelse för störningar, de krävda provtagningarna av betongmassan
- Efterbehandling, hållfasthets och andra egenskapers efterföljning, rivning av formar
- Värmebehandling och isolering i vinterförhållanden. (BY 50 2012, s. 123)

## 7 Kvalitetskontroll av betongkonstruktioner

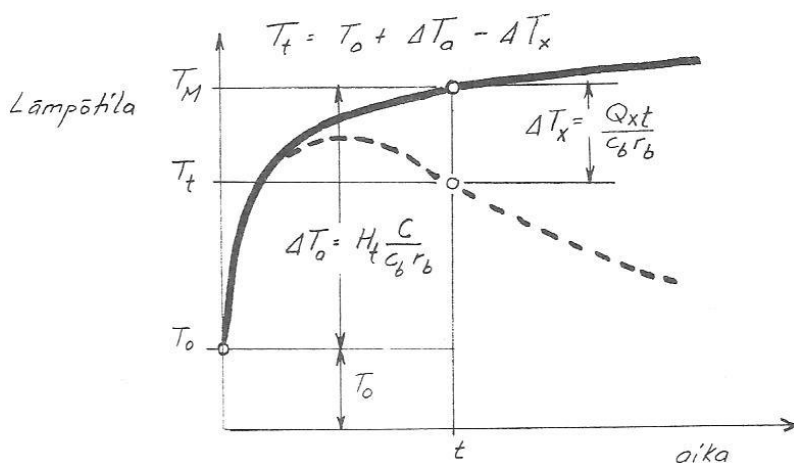
För att kunna bevisa att betongkvalitén inne i en konstruktion uppfyller den planerade kvalitén, bör vissa kontroller och uppföljningar göras. Speciellt i massiva konstruktioner bör man rikta uppmärksamhet på temperaturutvecklingen.

### 7.1 Temperatur kontroll

I massiva betongkonstruktioner är det nödvändigt att mäta betongens hydratationstemperaturer i början av härdningsprocessen (2...4 veckor) efter gjutning. Om arbetsbeskrivningen innehåller krav gällande temperaturer är temperaturmätningen obligatoriskt. Antalet mätpunkter och deras position väljs målmedvetet, i huvudsak för att klargöra topptemperaturer samt största temperaturskillnader. (BY 112 1981, s. 257) Enligt BY50 rekommenderas inte temperaturer över 60°C. (BY 50 2012, s. 130)

Massiva betongkonstruktioner löper risk för intern sprickbildning under avsvälning. Detta beror på inre spänningar som uppkommer i svalningskedet. För att förhindra detta fenomen bör temperaturskillnaden hållas under 20°C mellan den varmare och svalare delen i konstruktionen. (BY 112 1981, s. 256) Temperaturerna mäts antingen ur ingjutna rör med traditionella mätare eller elektroniskt med ingjutna givare. Vid temperaturmätning bör tiden noteras eftersom mognadsålderns beräkning kräver tidsdata. (BY 201 2004, s. 350-351)

Flera olika saker inverkar på värmeutvecklingen i en massivbetongkonstruktion. De utvecklade temperaturerna kan förklaras i nedanstående figur. Betongens utgångstemperatur ( $T_0$ ), temperaturökning som orsakas av hydratationen ( $\Delta T_a$ ) och svalnings beroende ( $\Delta T_x$ ) bestämmer temperaturen ( $T_t$ ) vid tidpunkten  $t$ .



Figur 19. Temperaturutveckling som funktion av tid. (BY 122 figur 1)

$T_0$  = betongens utgångstemperatur i gjutform, °C

$H_t$  = hydratationstemperatur under tiden 0... $t$ , kJ/kg

$C$  = betongens cementinnehåll, kg/m<sup>3</sup>

$Q_{xt}$  = avgiven värme i specifik punkt under tiden 0... $t$ , kJ/m<sup>3</sup>

$c_b$  = betongens specifika värmekapacitet, kJ/°C

$r_b$  = betongens densitet, kg/m<sup>3</sup>

Den avgivna värmen under ett tidsintervall beror på temperaturskillnader och konfektionskoefficienter mellan betongens yta och omgivning med beaktande till eventuell vattenkylning. Värmetransporten inne i konstruktionen är beroende av temperaturskillnader (gradienter) och värmekonduktiviteten. Om ingen värme släpps ut ( $Q_{xt} = 0$ ) lagras all producerad värme och höjer konstruktionens temperatur. Ju tjockare en konstruktion är desto längre tid följer temperaturökningen detta s.k. adiabatiska tillstånd. (BY 112 1981, s. 256)

## 7.2 Beräkning av hållfasthetsutveckling

Med Sadgroves formel räknar man ut på basen av temperatur och tidsintervall en summa som beskriver betongens mognadsålder. Mognadsåldern beskriver hur betongens hållfasthet har utvecklats i varierande temperatur tidsintervaller i förhållande till betong som härdat i normal 20°C. Sadgroves formel ser ut som följande:

$$t_{20} = ((T + 16^{\circ}\text{C})/36^{\circ}\text{C})^2 \times t$$

var T är betongens temperatur under tiden t [°C]

t är härdningstid [d]

Om betongens temperatur T är konstant under hela härdningstiden, fås  $t_{20}$  direkt ur formeln. Oftast bör  $t_{20}$  bestämmas som summa av flera olika tidsintervall. I temperaturer över 50°C räknas betongen som värmebehandlad, då bör betongens hållfasthet konstateras på annat sätt. (BY 201 2004, s. 351-353)

## 7.3 Betongens hållfasthet

Med en betongkonstruktions duglighet menar man att en konstruktion uppfyller kraven som samhällets byggnadstillsyn ställer på konstruktionen, gällande bärighet och beständighet. Dugligheten konstateras med; att hänvisa till de använda materialens kvalitet, granskning av konstruktion samt säkerställning av att de krävda granskningarna under arbetets gång är godkänt utfört.

Anvisningarna fäster mycket uppmärksamhet vid arbetsutförandets kvalitet, som i praktiken utförs med granskningar, mottagningsgranskningar, anteckningar osv. Betongens kvalitet anses som den väsentligaste delen vid konstaterande av konstruktionens hållfasthet.

Betongens kvalitet kan konstateras på två olika sätt, antingen med normprov eller med konstruktionsprov. Förutom tryckhållfasthet kan man vid behov undersöka frostbeständighet eller vattentäthet. (BY 112 2004, s. 380-381)



### 7.3.1 Normprov

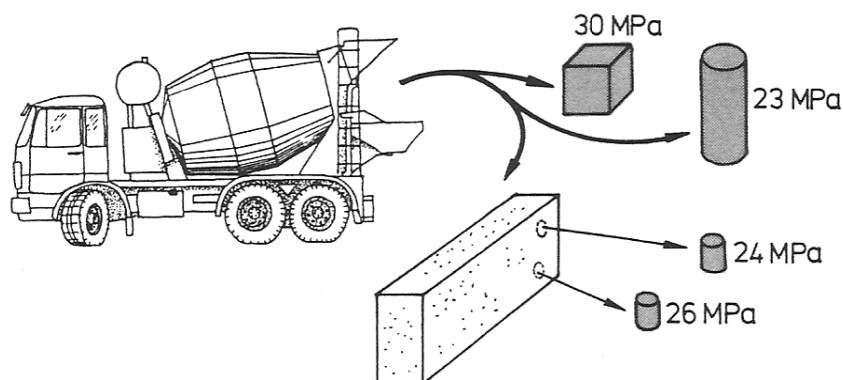
För att säkerställa betongens hållfasthet görs s.k. normprov av den färska betongmassan. Betongnormernas tryckhållfasthetsklassning baserar sig på en betongkubs hållfasthet vars sidlängd är 150mm. Jämförelsehållfastheten som räknats på basen av normprovkropparnas tryckhållfastheter bör minst uppfylla hållfastheten i den angivna hållfasthetsklassen.

Tabell 4. Provkroppar samt deras koefficienter som används vid provtryckning av betong.

provkropp	kub	kub	cylinder
mått	100x100x100mm <sup>2</sup>	150x150x150mm <sup>2</sup>	h = 300, d = 150mm
relativ hållfasthet	1,03	1,00	0,78..0,85
faktor	0,97	1,00	tabell 3.2

Källa: (BY 201 2004, figur 3.10)

Vid beräkning av cylinderhållfasthet till 150mm kubtryckhållfasthet används värden tabell 3.2 i BY201. Den uträknade tryckhållfastheten skall enligt SFS-EN 12390-3 standarden avrundas med noggrannheten 0,5 MPa. (BY 201 2004, s. 79)



Figur 20. Tryckhållfastheter som gjorts av K-30 betong (BY 201 2004, figur 3.11)

### 7.3.2 Konstruktionsprov

Bestämning av tryckhållfastheten med ett borrprov av en färdig konstruktion kan behövas i två olika fall. I samband med vanlig kvalitetsövervakning samt ifall om man misstänker bristfällig betongkvalité i konstruktionen. (BY 201 2004, s. 184) Provtagning, undersökning samt provtryckning görs enligt SFS-EN 12504-1 standarden.

Borrproven väljs slumpmässigt på sådana ställen i konstruktionen var borrhålen inte påverkar negativt på konstruktionens funktion. Vanligtvis används konstruktionsprovkroppar med en diameter på 100mm, vid behov kan andra diametrar användas. Provkropparnas diameter/höjd förhållande är  $1 \pm 0,05$ . Man bör ta minst tre stycken borrprov ur en konstruktion.

Vid bestämning av tryckhållfasthet för en färdigkonstruktion räknas borrprovets tryckhållfasthet om till 150mm:s kubhållfasthet. Omräkningen görs med följande korrigeringsfaktorer:

- Borrprov med diametern 100...150mm, multipliceras det enskilda tryckhållfasthetsresultatet med faktor 1,05
- Borrprov med diametern 50...80mm, multipliceras det enskilda tryckhållfasthetsresultatet med faktor 1,1
- Mellanvärden 80...100mm interpoleras linjärt
- Provkroppar som är limmade av två delar multipliceras med faktor 1,05.

I en 1-klass konstruktion får det godkända tryckhållfasthetsresultatet i en provkropp som lägst vara 0,85 \*hållfasthetsklassen och 0,80\* hållfasthetsklassen i en 2-klass konstruktion. (BY 50 2012, s. 161)

#### 7.4 Åtgärder vid otillfredsställande kvalitet

Om konstruktionen eller en del av den avviker från planerarens instruktioner eller uppfyller inte kvalitetskraven som har angetts i byggdokumentet, anses dess kvalitet vara otillfredsställande. I sådana fall när konstruktionens kvalitet är otillfredsställande, bör en skild undersökning göras angående konstruktionens duglighet.

I enkla fall kan en kontrollberäkning göras på konstruktionen. I andra fall bör man rekognosera områdena där otillfredsställande kvalitet uppkommer. Då betongens kvalitet är otillfredsställande, bör den färdiga konstruktionens egenskaper undersökas med borrprov ur konstruktionen.

På basen av de erhållna undersökningsmaterialen, görs en utredning om vilka åtgärder som krävs för att få konstruktionen i godkänt skick. Alla undersökningar som görs p.g.a. otillfredsställande kvalitet bör göras av ett godkänt testverk.

Konstruktionens reparationer får inte påbörjas förrän byggnadskontrollanten har godkänt reparationsplanen. Om en begränsning på konstruktionens användning kommer på fråga, skall den alltid basera sig på en undersökning som gjorts av ett godkänt undersökningsverk. Användningsbegränsningen skall även godkännas av den myndighet som utgett byggnadslov.(BY50s169)

## 8 Kvalitetsuppföljning av vindkraftverksfundament

Information som tangerar EPV: s vindkraftverksfundament sparas i en projektdatbas tillsammans med andra dokument. Information som lagras gällande grunder är bl.a. gjutplaner, temperatur data och provtryckningsresultat från betongprov som tagits på fabrik och arbetsplats.

### 8.1 Temperaturer

Temperaturutvecklingen i grunden har mätts av både betongproducenten och EPV. Temperatur dataloggern som användes var en Testo 176T4 som har minne dvs. inga realtids temperaturer kunde läsas online. Tillverkaren uppger en noggrannhet på  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  i intervallet (-100 till  $+70^{\circ}\text{C}$ ). Temperatur data importerades till datorn via en programvara.(Testo, 176 T4 temperature data logger u.å) Mätta temperaturer har behandlats i Microsoft Excel till grafer efter EPV: s behov med min/max temperaturer samt skillnaden mellan dem.



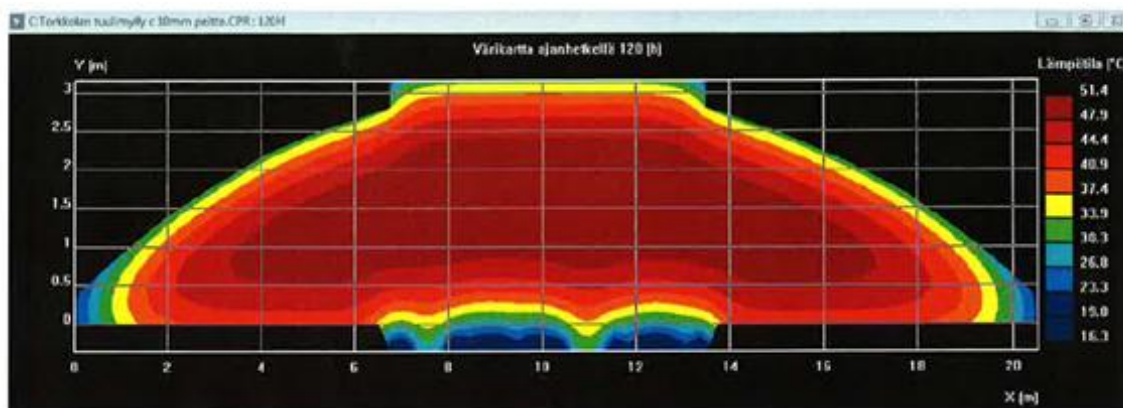
Figur 21. I EPV: s projekt i Vasa användes en datalogger av märket Testo(Ralf Wasberg)



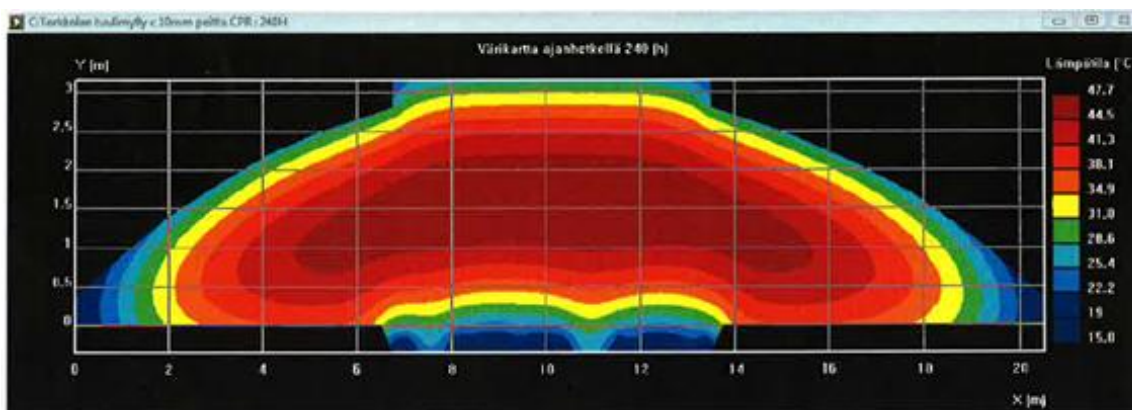
Figur 22. Till dataloggern kopplas en termoelementkabel som fungerar som givare(Ralf Wasberg)

Betongproducentens förhandsberäkningar på ungefärlig temperaturutveckling stämde inte överens med de verkliga temperaturerna som uppmättes i grunden. (Detta kan bero på flera olika faktorer som givarens position, luftfuktighet, omgivningens temperatur under gjutarbetet och efterbehandlings kvalitét osv.).

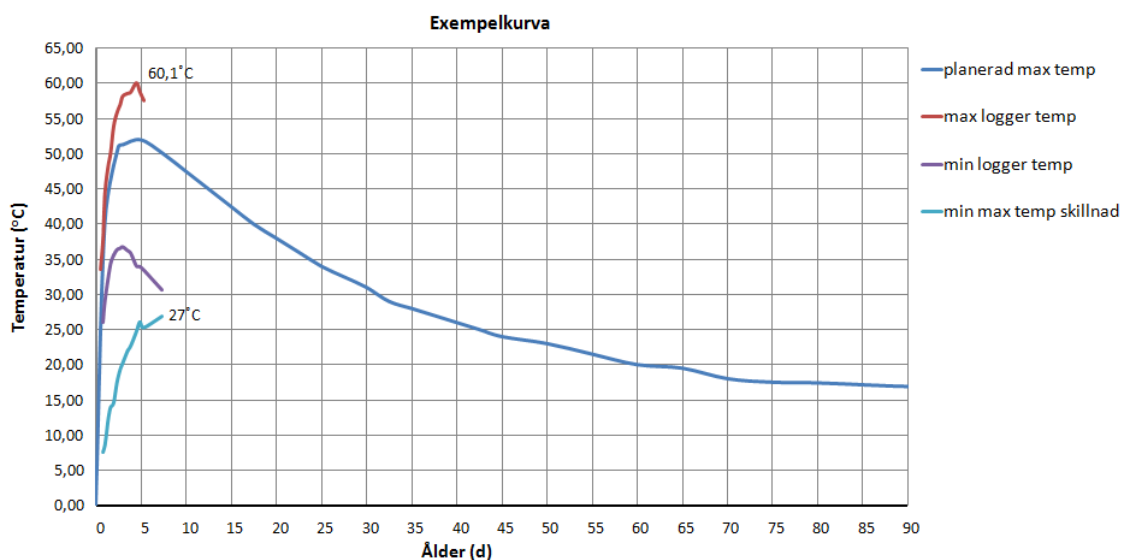
Temperaturen i fundamenten mättes av flera parter. Kvalitetsuppföljningen visade att EPV: s temperaturmätningstid borde förlängas till ca tre veckor för att få uppmätt den maximala temperatur skillnaden som uppkommer under betongens svalning.



Figur 23. Förhandsberäkningar på temperaturutvecklingen 120h efter gjutningen, slagg/cement förhållande 50/50. (taget ur betongplan D5 från EPV: s projekt i Vasa)



Figur 24. Förhandsberäkningar på temperaturutvecklingen 240h efter gjutning, slagg/cement förhållande 50/50. (taget ut betongplan D5 från EPV: s projekt i Vasa)



Figur 25. Exempel på hur de uppmätta temperaturerna jämförs med varandra. Denna information sparas i en projektbas. (Ralf Wasberg)

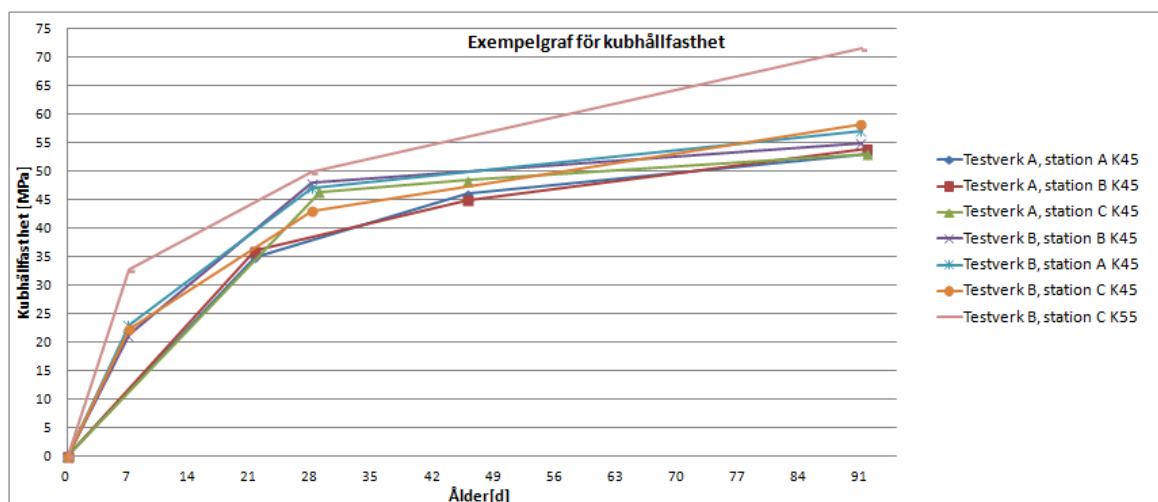
## 8.2 Hållfastheter

Betongprov har tagits på fabriken av betongleverantören. På arbetsplatsen har EPV samt betongleverantören tagit arbetsplatsprov. För att säkerställa sig om kvalitén i konstruktionen har även provborrningar gjorts i konstruktioner. Proven har varit i cylinder- och kubform. Betongprov har tryckts i betongleverantörens laboratorium. EPV: s betongkuber har provtryckts av en tredje part. Betongen har provtryckts vid en ålder på 28 och 91 dygn, även 7 och 14 dygns tryckhållfastheter har framkommit. Alla provtryckningsresultat har räknats om till kubhållfasthet.



Figur 26. Före borrning rekognoserades armeringsjärnets position. Provborrningar gjordes för att säkerställa sig om betongens kvalitet i konstruktionen. (Ralf Wasberg)

Tryckhållfasthetsresultat som uppgetts av betongleverantören och EPV behandlades i Microsoft Excel. Resultaten har redigerats till Excel-format samt modifierats till data som kan sättas in i grafer. Betongprovtryckningsresultat hade färdigt räknats ut till kubhållfasthet. Av hållfasthetsresultaten har ett medeltal räknats, som sätts in i en graf. Graferna ställdes upp enligt EPV: s behov. För att kunna hantera informationen smidigt, gjordes alla grafer till pdf-format.



Figur 27. Exempel på hur tryckhållfastheterna dokumenterades. Två olika testverk (A, B) har provtryckt betong från tre olika betongstationer (A, B, C). (Ralf Wasberg)

Tryckhållfastheten inne i konstruktionen är beroende av arbetsutförandets kvalitet. För att säkerställa sig om att gjutarbetet utförs enligt överrenskommen plan, övervakades gjutarbetet av EPV samt byggentreprenören.

Speciellt i massiva konstruktioner är det viktigt att lägga stor vikt på vibreringsteknik samt ordningsföljden på betongmassans placering. Betongmassan får inte ”flyttas” med hjälp av vibrering. Massan skall placeras och vibreras så att inga gjutfogar uppstår inne i konstruktionen.

I dessa fundament påbörjades gjutningen med att stabilisera bultkorgen. Detta gjordes med att placera betongmassa på bultkorgens in och utsida. Efter stabiliseringen placerades betongmassa ca fyra meter utanför bultkorgen samt i kärnan. Från kärnan gick man ut med ett nytt skikt för att täcka föregående skikt som låg på mark. Arbetet fortsatte likadant med fokus på att möta överkantsarmeringen på jämt avstånd till gjutkakan.

Ordningsföljden på placering av färskbetongmassa styrs av vilket område som väntat längst på att få färsk massa, detta för att undvika hårdnade betong områden vilket kan leda till gjutfogar. Därför bör kontinuerlig övervakning upprätthållas under hela gjutarbetet. I denna modell av vindkraftverksfundament är det mycket utmanade att vibrera ytan eftersom betongen söker sig nedåt vid vibrering av ytan.



*Figur 28. Här kan noteras hur betongmassan byggs upp till ett berg i kärnan som täcks lagervis ut mot fundamentets ytterkant. Tekniken går ut på att möta överkantsarmeringen på jämt avstånd till betongmassan. (Ralf Wasberg)*

### 8.3 Slutsatser av kvalitetsuppföljningen

EPV har fått en användbar kvalitetsuppföljning gällande betongkvalité och härdningstemperaturer. Kvalitetsuppföljningen gav tips på hur EPV kan utveckla sin kvalitets- granskning och uppföljning till nästa projekt.

Normprovets tryckhållfasthet jämfördes med borrprovets tryckhållfasthet. Borrproven visade sig ha lägre tryckhållfasthet i vissa konstruktionsdelar, vilket bl.a. kan bero på konstruktionens utmanade form med tanke på vibrering av betongmassan. Det finns ett visst utvecklingsbehov av ytans vibreringsteknik i denna utmanade konstruktionsmodell.

## 9 Laboratorieundersökning på härdningstemperaturens inverkan på sluthållfastheten

Undersökningen är i sin helhet utförd i Yrkeshögskolan Novias betonglaboratorium. Betonglaborationen har utförts i forskningssyfte d.v.s. inga resultat jämförs med verkliga konstruktioner eftersom betongen mognat i laboratorieförhållanden.

### 9.1 Syfte

Vindkraftverksfundament är massiva betongkonstruktioner som vid härdningen får höga temperaturer i konstruktionens kärna. Dessa temperaturer uppkommer av den exotermiska hydrationsprocessen, som avger värme i betongen. Avsikten med denna laboration är att undersöka hydrationsstemperaturens inverkan på sluthållfastheten. Denna laboration är gjord på uppdrag av EPV Tuulivoima. Undersökningens tryckhållfasthetsresultat är sekretess belagda.

### 9.2 Teori

Betongen mognar snabbare i högre värme, en för hög härdningstemperatur kan ta ner sluthållfastheten. Hållfasthetstapp kan räknas som en korrigering  $\Delta f$  till hållfastheten vid 20°C härdningstemperatur:

$$f_{HT} = f - \Delta f$$

där:

$f_{HT}$  = hållfasthet efter härdning vid förhöjd temperatur

$f$  = utgångshållfasthet enligt tendenskurvor eller försök vid härdningstemperaturen 20°C  
 $\Delta f$  = hållfasthetsförlust, orsakad av förhöjd härdningstemperatur. (kopierat BHBm s.565)

Storleken av hållfasthetsförlusten kan beskrivas som ett formellt slutvärde efter oändlig tid, t.ex. bestämt genom försök vid 28d ekvivalent ålder,  $\Delta f_{HT}$ , kopplat till en tidsfunktion i ekvivalent ålder enligt

$$\Delta f = e^{-\left(\frac{t_2}{t_e}\right)^{k_2}} \times \Delta f_{HT}$$

där  $t_2$ ,  $k_2$  = anpassningsparametrar för tidsförloppet.

Hållfasthetsförlusten efter oändlig tid görs beroende av de förhöjda härdningstemperaturernas tidsförlopp enligt:

$$\Delta f_{HT} = v_2 \Delta f_{max}$$

där

$$v_2 = \begin{cases} \frac{t_{HT}}{t_3} \text{ för } t_{HT} \leq t_3 \\ 1 \text{ för } t_{HT} > t_3 \end{cases}$$

$$t_{HT} = \int_0^t \beta_{HT} \beta_{add} dt$$

$$\beta_{HT} = \begin{cases} [\beta_T(T) - \beta_T(T_{HT})]^2 \text{ för } T > T_{HT} \\ 0 \text{ för } T \leq T_{HT} \end{cases}$$

där

$\Delta f_{\max}$  = maximal hållfasthetsförlust, orsakad av förhöjd härdningstemperatur för aktuellt cement

$\beta_{add}$  = en separat effekt enligt tidigare, fås ur formeln för ekvivalent mognadsålder

$\beta_{HT}$  = faktor som anger inverkan av förhöjd härdningstemperatur

$t_{HT}$  = ekvivalent härdningstid med förhöjd härdningstemperatur

$t_3$  = anpassningsparameter för aktuellt cement(kopierat BHBm s.565-566)

### 9.3 Material & apparatur

Laborationsförsöket är utfört i Yrkeshögskolan Novias betonglaboratorium med följande medel:

- Ballast material enligt SFS-EN 12620+A1
- Mindre våg: Precisa 24000G
- Större våg: Lahden vaaka 50g noggrannhet
- Värmeskåp: Genlag oven
- Frifalls betongblandare: esko- sekoitin 170L
- Formor: stål 150x150x150
- Vibratorbord: Elektro-Rutteltisch
- Klimatskåp: Labtester klimatskåp
- Temperaturmätning: Fluke datalogger
- Skjutmått
- Slipsten
- Amsler hydraulpress VTT kalibrerad 19.6.2014



## 9.4 Recept

Laboratorieundersökningens blandnings recept är taget ur en betongplan för en vindkraftverksgrund som är byggt av EPV. Blandningen har ett slagg/cement förhållande på 60/40. Mängderna i receptet räknades ner till ca 16st betongkuber med måtten 150x150x150. Specifika uppgifter om blandningen finns i bilaga 1. I bilagorna 5-6 hittas vidare specifikationer på den använda cementens samt slaggets egenskaper.

## 9.5 Utförande

Denna laboration är utförd i tre olika blandningstillfällen med 28 dagars mellanrum. Alla tre blandningar är utförda på samma sätt, d.v.s. vägning av delmaterial, blandning och vibrering motsvarar varandra. Endast härdningstemperaturen skiljer sig mellan ugnskuberna. Normkuber har gjorts av alla blandningar.

### 9.5.1 Delmaterial

Först undersöktes ballastmaterialens fuktprocent med stöd av SFS-EN 1097-5. Ballastmaterialen vägdes och sattes i värmeskåp i 110°C under tre dygn. Efter undersökningen konstaterades att fuktprocenten i alla delmaterial är obetydlig, se bilaga 2. Vid undersökning av ballastmaterialets siktkurva konstaterades att en viss mängd filler bör tillsättas för att efterlikna den siktkurva som finns betongplanens recept. Siktkurvan kan hittas i bilaga2.3.



Figur 29. Siktmåtten med ballast placerade på vibratorapparaten (Ralf Wasberg)

Materialen vägdes upp enligt receptet med en reduceringskoefficient på 0,0612 vilket räcker för 16st kuber. Ballastmaterialen vägdes upp med våg som hade 50g avläsningsskala. Cement, slagg och filler vägdes med en mindre våg med måttnoggrannheten 0,1g. Sista blandningens (67°C) masugnsslagg togs ur ny säck. Alla blandningar blandades med ljummet vatten från vattennätet. I varje blandning doserades vattnet enligt dess volym. Inget flyttillsatsmedel tillsattes eftersom man konstaterat att det inte inverkar negativt på vibreringsgraden vid framställning av kuber.



Figur 30. Masugnsslagg samt cement som användes i laborationerna (Ralf Wasberg)



Figur 31. Vågen som användes för proportionering av slagg och cement (Ralf Wasberg)



Figur 32. Vågen som användes för proportionering av ballast (Ralf Wasberg)



*Figur 33. Färdigt doserade delmaterial i väntan på blandning (Ralf Wasberg)*

### 9.5.2 Blandning

Blandningen utfördes med frifallsblandare med en volym på 170l och roterhastighet på 28 varv per minut. Före varje blandning granskades blandarens renhet. Betongens delmaterial blandades 3minuter i alla blandningstillfällen. Mitt under blandningen stoppades blandaren för rengöring av fasttagen massa i blandningsplåtarna.



*Figur 34. Frifallsblandaren som användes i laborationen (Ralf Wasberg)*

### 9.5.3 Gjutning

Betongkuberna tillverkades med stöd av EN 12390-2 standarden. Gjutningen förbereddes med rengöring/ inoljning av formar samt renheten på förflyttningsskärlet granskades. Betongblandaren skrapades ren från färsk betong, så att inga större mängder lämnade i blandaren.



*Figur 35. Inoljade formor för 150mm kuber (Ralf Wasberg)*

Formorna fylldes på ett vibratorbord. Först fylldes de till hälften med lätt packning med murslev. Därefter vibrerades de i 7 sekunder. Efter detta fylldes andra hälften med lätt packning med murslev och därefter ytterligare 7 sekunder vibrering. Formorna tyngdes ner i vibratorbordet under den tiden då vibratorbordet var igång. Ytan revs av på vibratorbordet samt ytterligare en gång till efter att formorna flyttats till sin torkningsplats.



*Figur 36. Färdigt vibrerade formor med avriven yta (Ralf Wasberg)*

Formorna täcktes in med plastfilm för att undvika en snabb dunstning av ytan. För att undvika större måttavvikelser på kuberna ställdes torkningsplatsens underlag in med vattenpass. I alla tre gjutningstillfällen torkade kuberna i ca 24h före formrivning.



Figur 37. Formorna ställdes på plant underlag för att undvika större måttavvikelser (Ralf Wasberg)

#### 9.5.4 Lagring av kuber

Efter formrivning märktes kuberna och lades i vattenbad inom en timme. Kuberna lagrades på två olika sätt, i programmerbar ugn (27d) eller normvattenbad i 20°C. För att få veta blandningens kvalitet var 28 och 91dagars normkuber en nödvändighet för alla blandningstillfällen.



Figur 38. Lagring av kuber i 20°C normvattenbad (Ralf Wasberg)

##### 9.5.4.1 Ugnskuber

Ugnskuberna lades i ämbar som fylldes helt med ca 50°C vatten. Ett klimatskåp programmerades med värmekurvor som är speciellt framtagna för denna undersökning. Temperaturkurvorna har i stort sett samma form som de verkliga temperaturerna som utvecklas under mognadstiden i kärnan av massiva betongkonstruktioner, men med högre topptemperaturer.

7 dygns ugnskuber lagrades 6 dygn i klimatskåpet före provtryckning. Efter att klimatskåpet varit igång 27 dygn, togs alla kuber ut. Då provtrycktes 28 dygns kuber och 91 dygns kuber lades i 20°C normvattenbad i väntan på 91 dygns ålder.



*Figur 39. Vattenfyllda ämbar med kuber som är färdiga för mognad i klimatskåp (Ralf Wasberg)*



*Figur 40. Klimatskåpet med ugnskuber, här kan givarnas placering noteras (Ralf Wasberg)*

Eftersom det är en viss skillnad mellan den programmerade temperaturkurvan och den verkliga temperaturen i ämbarets vatten, lades en givare i ett ämbar under alla undersökningar. Även klimatskåpets lufttemperatur mättes av en givare. Dessa kopplades till en datalogger. Logger utrustningen sköttes av Yrkeshögskolan Novias laboratorieingenjör. Uppmätta vatten temperaturer kan noteras i bilaga 6.



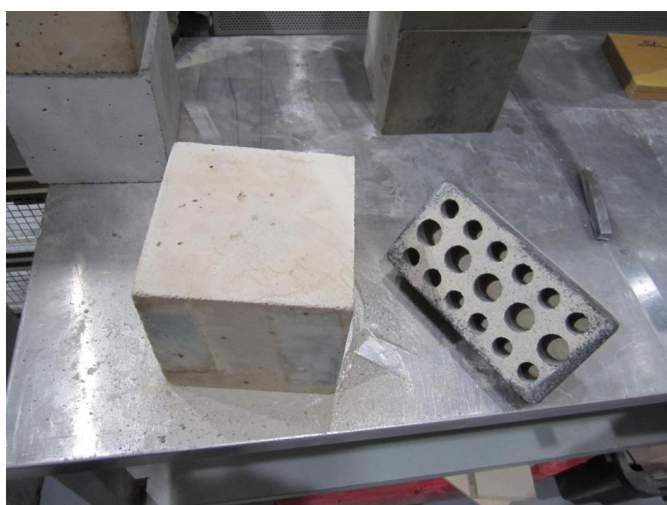
*Figur 41. Temperaturlogger utrustning med inkopplad bärbar dator kan noteras till höger om klimatskåpet (Ralf Wasberg)*

#### 9.5.5 Mognade kuber

Då kuberna nått sin eftersträvade mognadsålder har de tagits upp ur vattnet samt bearbetats. Vid alla provtryckningstillfällen har de torkat i rumstemperatur i ca två timmar.

##### 9.5.5.1 Förberedande arbete

Alla kuber har planats och mätts inför provtryckningen på samma sätt med stöd av SFS-EN 12390-3 standarden. Trycknings ytor har planats för hand med slipsten. Den planade ytan har granskats med ställinjal och 0,1mm bladmått.

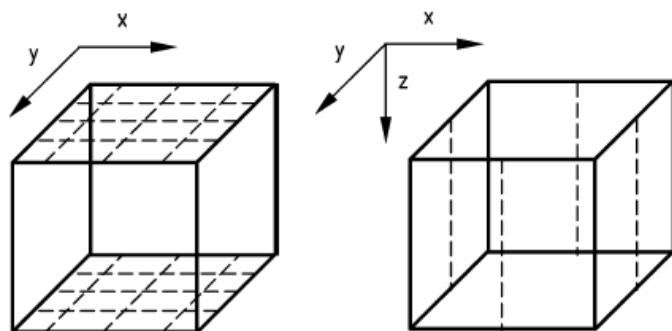


*Figur 42. Planing av trycktor förverkligades med handslipsten. Efter planingen togs måtten på kuberna (Ralf Wasberg)*

Måtten på betongkuberna har mätts enligt den gällande SFS standarden. Provtryckningen skall alltid ske vinkelrätt mot gjutriktningen. Bredden (X) och djupet (Y) har mätts på övre och undre tryckytorna med tre mått. Tryckytans area har räknas som ett medeltal på följande sätt:

$$A_c = X_m \cdot Y_m$$

Höjden (Z) har mätts på mitten av alla sidor. Av dessa mått beräknas ett medelvärde för kubens höjd. Alla kuber har vägts med 0,1g noggrannhet.



Figur 43. Illustration på hur måtten tagits på kuberna (SFS-EN 12390-3 figur B.1, B.2)

#### 9.5.5.2 Provtryckning

Provtryckningen av kuberna har skett i Yrkehögskolans Novias betonglaboratorium. Den använda hydraulpressen är av märket Amster. Provtryckningsutrustningen har kalibrerats av Finska statens teknologiska forskningscentral VTT 19.06.2014. Pressen sköts av Yrkehögskolan Novias laboratorieingenjör.

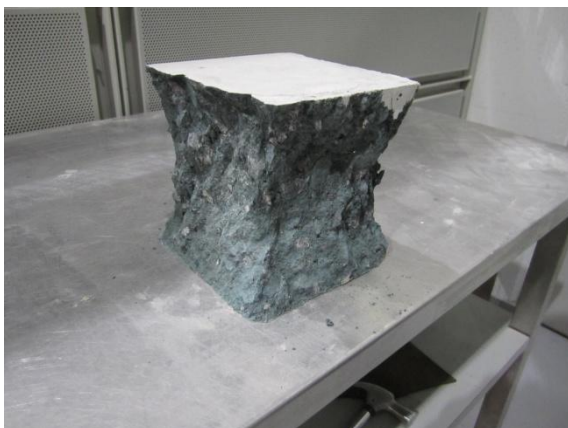


Figur 44. Hydraulpressen som användes vid alla provtrycknings tillfällen (Ralf Wasberg)





*Figur 45. Kuberna skall tryckas centriskt enligt de frästa märkena i tryckningsbordet (Ralf Wasberg)*



*Figur 46. Exempel på hur ett korrekt brott skall se ut. Under alla provtryckningstillfällen har kubernas brott varit korrekta (Ralf Wasberg)*

#### 9.5.6 Utvärdering av hållfasthets resultat

Resultat är som väntat. En lagom hög härdnings temperatur inverkar positivt både på den tidiga och slutliga hållfastheten, däremot inverkar en tidig hög härdnings temperatur positivt på 7d hållfastheten men reducerar 91d sluthållfastheten. Tryckhållfasthetsresultaten visar hur hållfastheten reduceras proportionellt mot förhöjd härdningstemperatur.

Kubernas hållfasthet kan ha blivit sämre av att de endast torkat 2h före provtryckning. Fukt som ligger i porer inverkar negativt på tryckhållfastheten. Alla kuber har varit utsatta för 100 % fuktighet under hela mognadstiden, vilket har inverkat positivt på hydrationsprocessen.

Denna laboration har gjorts i forskningssyfte. Hydrationsprocessen har haft tillgång till vatten under hela mognadstiden vilket innebär att forskningsresultaten inte kan jämföras med verkliga konstruktioner eftersom de inte är utsatta för 100 % fuktighet. Därför bör inga långtgående slutsatser dras av denna laboration.

Alla arbetsutföranden i laboratoriet har utförts av samma person med lika arbetsutförande under alla blandnings, gjutnings och provtrycknings tillfällen. Därmed är forskningens resultat jämförbara med varandra.

### 9.5.7 Beräkningar

Kubernas volymvikt samt tryckta yta har räknats ut av medeltal som av de uppmätta värdena har gett. Provtryckningsutrustningen har kalibrerats och kräver en korrigeringsfaktor, som tagits med i beräkningarna. Provtryckningarnas brottslast fås i ton, vilket räknas om till Newton. Den räknas om till MN/m<sup>2</sup> då kubens tryckta medel areal är uträknad. Tryckhållfastheten fås ur formeln:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

var

$f_c$  = tryckhållfasthet, MPa (N/mm<sup>2</sup>)

F = brottslast, N

$A_c$  = tryckta ytans beräknade medelareal

## 10 Resultat

Under kvalitetsuppföljningen har jag arbetat mycket med Microsoft Excel, vilket har varit lärorikt. För att kunna förstå betongens egenskaper har jag gjort litteraturstudier som har visat sig vara mycket intressanta och lärorika.

Uppdragsgivaren har fått en kvalitetsuppföljning på 16st vindkraftverkfundaments betongkvalité i deras vindkraftverkspark som befinner sig i Lillkyro, Vasa. Detta har innefattat sammanställning och bearbetning av tryckhållfasthetsresultat från betongkuber som gjorts och provtryckts av betongproducenten. EPV har även gjort arbetsplatsprov och borrhprov som har tagits med i kvalitetsuppföljningen. Temperaturdata som EPV och betongproducenten noterat har behandlats och gjorts till lättförståeliga grafer som jämförts med varandra.

Resultatet av detta arbete är en användbar kvalitetsuppföljning på betongens kvalité samt temperaturutveckling, som uppdragsgivaren har använt sig av. Kvalitetsuppföljningen har nu dokumenterats i EPV: s projektbas. Under kvalitetsuppföljningen uppkom flera utvecklingsidéer som kommer att hjälpa av EPV att utveckla deras vindkraftverksfundaments produktion i framtiden.

Laboratorieundersökningen har gett uppdragsgivaren en uppfattning om hur den specifika slaggbetong blandningen uppför sig i olika härdningstemperaturer. Tryckhållfasthetsresultaten av undersökningen är sekretessbelagda.

## 11 Källförteckning

American Concrete Institute (1996): Mass Concrete ACI 207.1R-96.

American Concrete Institute (2000): Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent In Concrete ACI 233R-95.

Burström, Per Gunnar (2007): Byggnadsmaterial, Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper; upplaga 2. ISBN: 978-91-44-02738-8.

EPV Vindkraft, företaget (u.å). <http://www.epvtuulivoima.fi> (hämtat 11.01.2015).

Finlands byggnadsbestämmelsesamling B4 (2001). <http://www.finlex.fi/data/normit/6364-B4.pdf> (hämtat: 20.11.2014).

Finnish Standards Association SFS (2009): Testing hardened concrete. Part 2: Making and curing specimens for strength tests. SFS-EN 12390-2.

Finnish Standards Association SFS (2009): Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. SFS-EN 12390-3.

Finnsementti, betometri (u.å). <http://www.finnsementti.fi/sementti/tekninen-neuvonta/betometri> (hämtat: 12.01.2015)

Finnsementti, Kotimaista laatua heti 1910-luvulla (u.å)  
<http://www.finnsementti.fi/yritys/historia/kotimaista-laatua-heti-1910-luvulla>  
(hämtat: 23.10.2014).

Finnsementti, Suomalainen sementti (u.å)  
[http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS\\_Suomalainen\\_sementti\\_kirjanen\\_071112.pdf](http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS_Suomalainen_sementti_kirjanen_071112.pdf)  
(hämtat: 23.10.2014).

Fise, ajankohtaista (2014)  
[http://www.fise.fi/default/www/suomi/ajankohtaista/fise\\_jatkaa\\_lakisaateisia\\_patevyyksia/](http://www.fise.fi/default/www/suomi/ajankohtaista/fise_jatkaa_lakisaateisia_patevyyksia/)  
(hämtat: 01.02.2015)

Graham West (1996): Alkali-aggregate reaction I concrete roads and bridges. ISBN: 0 7277 2069 4.

Huges, B.P (1989): PFA fineness and its use in concrete, Mag. Concr.Res., 41 no. 147, s. 99-105.

J. Bensted och P. Barnes (2002): Structure and performance of cements. ISBN: 0-203-47778-2.

Lunds Tekniska Högskola, HACON – Ett program för simulering av härdande betong (2004)  
<http://www.byggmek.lth.se/resurser/programvara/hacon-ett-program-foer-simulering-av-haerdande-betong/>  
(hämtat: 20.11.2014).

Nanayakkara Anura, (u.å) Importance of controlling temperature rise due to heat of hydration in massive concrete elements  
[http://management.kochi-tech.ac.jp/ssms\\_papers/sms11-5801\\_71087f81bc09e38f1eeb2dc45a5ce5da.pdf](http://management.kochi-tech.ac.jp/ssms_papers/sms11-5801_71087f81bc09e38f1eeb2dc45a5ce5da.pdf)  
(hämtat: 21.11.2014).

Navy Edward G. (1997): Concrete Construction Engineering Handbook. ISBN: 0-8493-2666-4.

Neville A.M (2011): Properties of Concrete 5<sup>th</sup> edition. ISBN: 978-0-273-75580-7.

Neville A.M & Brooks J.J (1990): Concrete Technology, uppdaterad version. ISBN: 0-582- 98859-4.

Rudus, Betoplus- ohjelmasta apua betonivalujen suunnitteluun ja seurantaan (u.å)  
<http://www.rudus.fi/ajankohtaista/2011/03/14/betoplus-ohjelmasta-apua-betonivalujen-suunnitteluun-ja-seurantaan>  
(hämtat: 20.11.2014).

Rudus, Lentotuhkan kierrätys  
<http://www.rudus.fi/tuotteet/kierratys/lentotuhka>  
(hämtat: 25.01.2015).

SBUF, Produktionsplanering Betong (2014)  
<http://www.sbuf.se/Nyheter-och-publikationer/Aktuellt/2014/PPB/>  
(hämtat: 15.02.2015)

Semtu, sementit ja seosaineet (u.å)  
<http://www.semtu.fi/fi/tuotteet/sementit-ja-seosaineet/>  
(hämtat: 15.03.2015)

Slagcement.org, reducing stress (u.å)  
[http://www.slagcement.org/News/pdf/No9\\_Reducing\\_Stress.pdf](http://www.slagcement.org/News/pdf/No9_Reducing_Stress.pdf)  
(hämtat: 12.01.2015)

Suomen betoniyhdistys r.y (1981): 1-Luokan Betonityönjohtaja BY112. ISBN: 951- 95381-0-0.

Suomen betoniyhdistys r.y (2004): Betonitekniiikan oppikirja BY201 2004. ISBN: 978-952-67169-6-1.

Suomen betoniyhdistys r.y (2012): Betoninormit BY50 2012. ISBN: 978- 952-67169-5-4.

Suomen betoniyhdistys r.y (2013): Betonirakentamisen Laatuohjeet BY47 2013. ISBN: 978-952-67169-7-8.

Svensk byggtjänst, Christer Ljungkrantz, Göran Möller, Nils Petersons (1992) Betonghandbok *Arbetsutförande, projektering och byggande*, utgåva 2. ISBN: 91-7332-586-4.

Svensk byggtjänst, Christer Ljungkrantz, Göran Möller, Nils Petersons (1994) Betonghanbok *Material*, utgåva 2. ISBN: 91- 7332-709-3.

Svenska Byggbranschens Utvecklingsförbund, Informerar nr 97:31  
<http://vpp.sbuf.se/Public/Documents/InfoSheets/PublishedInfoSheet/1B1446C3-4D0F-4305-A457-209B7CB97546/97-31%20Härtningsprognoser%20för%20betong%20-%20programvara.pdf>  
(hämtat: 02.02.2015)

Testo, 176 T4 temperature data logger (u.å)  
[http://www.testo.com.cn/product\\_detail/0572+1764/testo-176-T4-Temperature-data-logger#skip\\_1001](http://www.testo.com.cn/product_detail/0572+1764/testo-176-T4-Temperature-data-logger#skip_1001)  
(hämtat: 16.02.2015)

K45-1 60/40	kuona 60% / cementti 40%	Jälkihoito: Mastercure 111
Rasitusluokka XC2		
Max rae #16mm		
Massan notkeus: S2/S3		

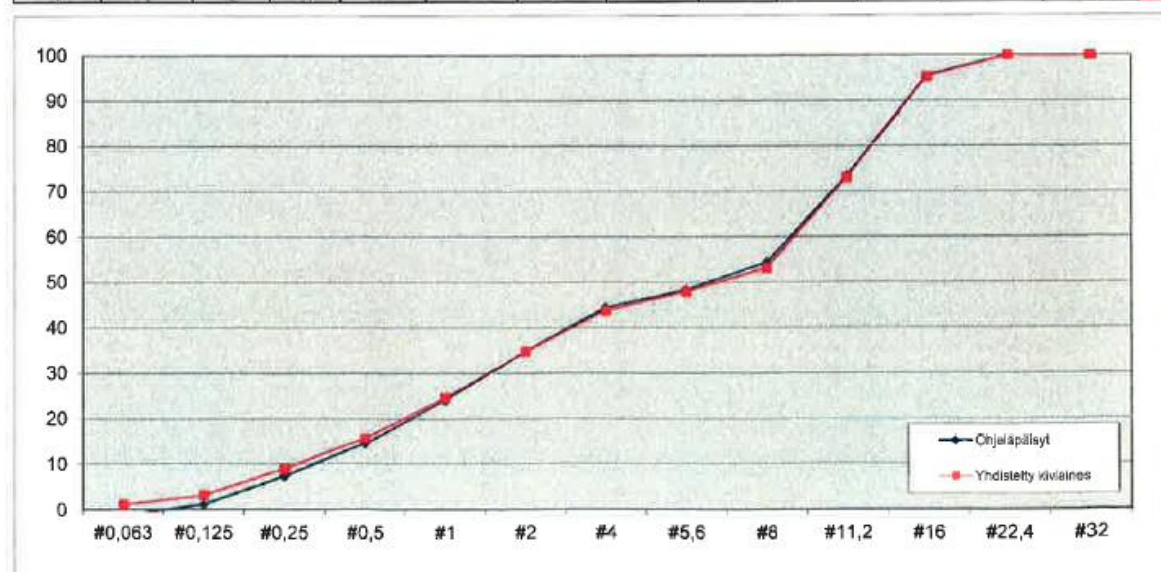
Suhteutettu betonilaatu (tavoiteominaisuudet)	
Nimellislujuus/sementtimääräinen	S45
Betonilaatu	MK: Hitasti kovettava betoni
Maksimiraekoko	16mm
Notkeusluokka	S3 / 1-2sVb
Ilmamäärä	15
Pakkasenkestävä	Kyllä

Suhteutuksen tunnusluvut			
Tehollinen vesi (l/m <sup>3</sup> )	188	P-luku arvo	
Tehollinen V/S	0,613	Jälkihoitoaika (d)	
Tehollinen V/CEM I	0,613	F-luku	
Tehollinen V/sideaine	0,54	Hienoainemäärä (kg/m <sup>3</sup> )	534
Ilma/vesisuhde	0,08	Hienoainepasta (l/m <sup>3</sup> )	345
Sulfaatinkestävä	kyllä	Sideainepasta (l/m <sup>3</sup> )	320
Lämpötila/ Celcius	18	H-arvo	510
Kloridiarvo (%)	0	Kiviaineosuus	68

#### Suhteutuksen annosmäärät 1m<sup>3</sup>

Sideaineet	kg/m <sup>3</sup>	Kiviaineet			Lisäaineet		
		Yhteensä	100 %	kg/m <sup>3</sup>	Lisäaineen tuotemerkki	osuus	kg
KJ 400	209	SrM 0/8	61,50 %	1118	Pantrahit TB 100	0,25 %	0,87
CEM II/B-M(S-LL)42,5N	139	KaS 8/16	38,50 %	701			
Sideainemäärä	348						
Kokonaissement.	306						

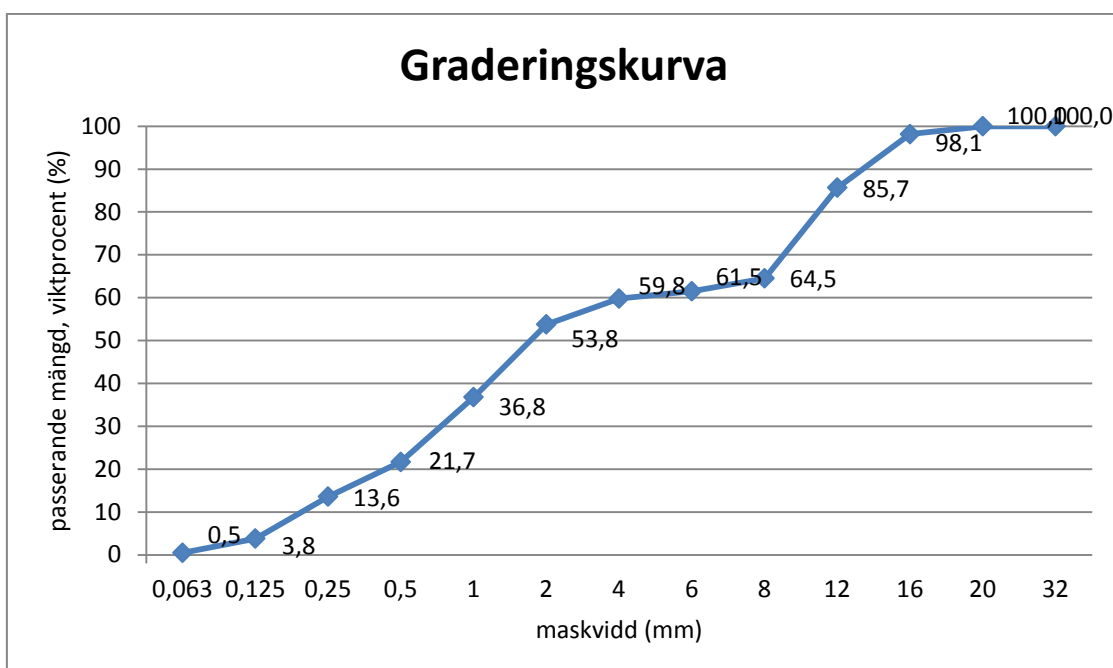
#0,063	#0,125	#0,25	#0,5	#1	#2	#4	#5,6	#8	#11,2	#16	#22,4	#32	slit.
-1,2	1,1	7,2	14,5	24	35	44	48	54	73	95	100	100	slit.
1,1	3,2	8,9	15,8	25	35	44	48	53	73	95	100	100	vlo.



## Bilaga 2

Fukt i ballast (%)			
material	våt vikt kg	torr vikt kg	fukt %
SrM 0/8	8,591	8,556	0,995926
KaS 8/16	5,354	5,348	0,998879

## Bilaga 2.1



**Plussementti**

CEMENT

CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N

JULY 2013



The cement has the CE mark and complies with the standard SFS-EN 197-1: 2011.

EC-certificate of conformity. Certificate no.

Paraisten Plussementti

0416-CPD-5483

Lappeenrannan Plussementti

0416-CPD-5482

Typical properties of cement and clinker:

Property of cement	Typical values	Requirement EN 197-1:2011
1d strength	10...14 MPa	none
2d strength	21...26 MPa	>= 10 MPa
7d strength	34...39 MPa	none
28d strength	46...52 MPa	>= 42,5 MPa ja <= 62,5 MPa
Initial setting time	150...210	>= 60 min
Soundness	0...1,5 mm	none
Fineness (Blaine)	420...470 m <sup>2</sup> /kg	none
Loss of ignition	-	none
Insoluble residue	-	none
Sulfate content SO <sub>3</sub>	3,0...3,3 %	<= 3,5 %
Chloride Cl <sup>-</sup>	<= 0,08%	<= 0,10 %
Cr <sup>6+</sup>	0...2 mg/kg	<= 2 mg/kg

Chemical properties of clinker	%	Requirement EN 197-1:2011
CaO	63...65 %	
SiO <sub>2</sub>	20...22%	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,0...5,4 %	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8...3,3 %	
MgO	2,5...3,2 %	
C <sub>3</sub> A	-	none

Other main constituents	%	Requirement EN 197-1
Sum of other main constituents	21...35 %	>= 21 % ja <= 35 %
Limestone	6...15 %	
Blast furnace slag	15...25%	

**FINNSEMENTTI**

Finnsementti Oy • FI-21600 Parainen • Tel. +358 201 206 200 • Fax +358 201 206 311

[www.finnsementti.fi](http://www.finnsementti.fi)

**KJ400**

Masuunikuonajauhe

Seosaineet

TAMMIKUU 2009



Masuunikuonajauhe on betonissa käytettävä hydraulisia ominaisuuksia omaava seosaine. Tuote on CE-merkitty.

**OMINAISUUDET**

Sementillä aktivoituna masuunikuonajauhe reagoi veden kanssa muodostaen pysyvän ja lujan reaktiotuotteen. Käytettäessä sementin ja masuunikuonajauheen seosta sideaineena saadaan betonille monia hyviä ominaisuuksia:

- Kuonajauhe alentaa ja tasaannuttaa betonin lämmönkehitystä, joten se sopii hyvin massiivisiin rakenteisiin.
- Kuonajauhe vähentää lämpökäsittelystä aiheutuvaa betonin lujuuuskatoa.
- Kuonajauheen kovettumisreaktiot jatkuvat pitkään ja antavat betonille korkeat loppulujuudet.
- Kuonajauhe vaalentaa betonin väriä.
- Kuonajauhe tiivistää betonia ja hidastaa näin vieraiden aineiden tunkeutumista betonin sisään.
- Kuonajauhe parantaa betonin pakkassuolakestävyyttä.
- Kuonajauhe parantaa betonin kestävyyttä sulfaattikorroosiota vastaan.
- Kuonajauhe on edullinen sideainevaihtoehto.

Masuunikuonajauhetta käytettäessä on kuitenkin otettava huomioon, että:

- betonin alkulujuudenkehitys hidastuu erityisesti alhaisissa lämpötiloissa ja
- betoni vaatii pidemmän jälkihoidon.

**PÄÄKÄYTTÖALUEET**

Kuonajauhetta käytetään massiivisten rakenteiden valmistuksessa tai kun betonilta vaaditaan sulfaatinkestävyyttä. Kuonajauheen käyttö on perusteltua myös silloin, kun betonilta toivotaan korkeaa loppulujuutta ilman, että varhaislujuudelle on asetettu vaatimuksia.

Kuonajauhe sopii hyvin myös lämpökäsiteltäviin betoneihin, sillä kuonajauhetta sisältävän betonin lujuuuskato on tavanomaista betonia pienempi.

**ANNOSTUS**

Masuunikuonajauheen käytön sallitut enimmäismäärät riippuvat käytettävästä sementistä ja betonirakenteen rasitusluokasta (ks.betoninormit). Tavallisesti kuonajauheen käyttömäärät ovat 10 % - 70 % sideaineen määrästä. Sulfaatinkestävyyttä vaativissa rakenteissa masuunikuonajauheen osuuden tulee olla vähintään 70 % sideaineseoksen määrästä.

**TEKNISET TIEDOT**

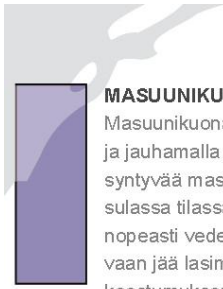
Väri 52-56 % (ISO4270)  
Olomuoto jauhe

**FINNSEMENTTI**

Finnsementti Oy • 21600 Parainen • Puh. 0201 206 200 • Fax 0201 206 311

www.finnsementti.fi





#### MASUUNIKUONAN VALMISTUS

Masuunikuonajauhe valmistetaan granuloimalla ja jauhamalla raakaraudan valmistuksessa syntyvää masuunikuonaa. Granuloinnissa sulassa tilassa oleva kuona jäädytetään nopeasti vedellä, jolloin kuona ei ehdi kiteytyä vaan jää lasimaiseen tilaan. Kemiallisen koostumuksen ja jauhatushienouden lisäksi kuonan lasimaisuusaste on oleellinen tekijä sen reaktiivisuuden kannalta.

#### KEMIALLINEN KOOSTUMUS

Masuunikuona muodostuu kalsiumin ja magnesiumin silikaateista ja aluminosilikaateista. Suomalaisen masuunikuonan koostumus on keskimäärin seuraava:

CaO	36-42 %
SiO <sub>2</sub>	36-40 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8-10 %
MgO	10-12 %
S	1,5-2 %
Ti	0,9-1,3%
K <sub>2</sub> O	0,5-1,0%
Na <sub>2</sub> O	0,5-1,0%

#### LUJUUDENKEHITYS

Sementin korvaaminen kuonajauheella laskee varhaislujuuksia jo +20°C:n lämpötilassa selvästi. Kuonapitoisuuden ollessa pienempi kuin 25 % saavutetaan 28 vuorokauden iässä vertailubetonin lujuus. Kun sementistä korvataan 60 % kuonajauheella, betonin puristuslujuus 91 vuorokauden iässä ohittaa vertailubetonin lujuuden.

#### LÄMPÖTILAN VAIKUTUS LUJUUDENKEHITYKSEEN

Kuonajauheen hidastava vaikutus korostuu alhaisissa lämpötiloissa. Toisaalta nuoren kuonabetonin lämpökäsittely nostaa varhaislujuuksia ja lisäksi loppulujuuksissa näkyvä lujuuskato on vastaavan lämpökäsittelyn saaneen vertailubetonin lujuuskatoa selvästi pienempi.

#### HYDRATAATIOLÄMPÖ

Massiivisissa rakenteissa kuonajauhetta käytetään sideaineena sen alhaisen hydrataatiolämmöntuoton vuoksi. Mikäli sideaine tuottaa hydratoituessaan runsaasti lämpöenergiaa, nousee betonin lämpötila, jolloin rakenteen eri kohtiin voi syntyä suuriakin lämpötilaeroja erilaisista lämpöhäviöistä johtuen. Lämpötilaerojen aiheuttamat jännitykset saattavat tällöin johtaa betonipinnan halkeiluun.

Lisätietoja teknisestä neuvonnastamme: 0201 206 200



## FINNSEMENTTI

Finnsementti Oy • 21600 Parainen • Puh. 0201 206 200 • Fax 0201 206 311

[www.finnsementti.fi](http://www.finnsementti.fi)



