

Afprøvning af betoners styrkeudvikling ved forskellige lagringstemperaturer –

Test til eftervisning af prøvningsmetode TI-B 103

Baggrund

Modenhedsbegrebet, som beskriver temperaturens indflydelse på hærdehastigheden, er en af de vigtigste delelementer i hærdeteknologien. Betons modenhed beregnes i Danmark og mange andre lande ud fra følgende formel:

$$M = \sum_{i=1}^n H(\theta_i) \Delta t_i$$

hvor:

Δt_i = varigheden af tidsinterval i

θ_i = middeltemperaturen i tidsinterval i [°C]

$H(\theta)$ = hastighedsfunktionen defineret ved:

$$H(\theta) = \exp \left[\frac{E(\theta)}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + \theta} \right) \right]$$

hvor:

R = gaskonstanten = 8.314 [J/mol K]

θ = er temperaturen [°C]

$E(\theta)$ = betonens aktiveringsenergi [J/mol]

Betonens aktiveringsenergi $E(\theta)$ er, som det fremgår af ovenstående udtryk, den afgørende parameter i beregningen af betons modenhed. Den værdi for $E(\theta)$, som bruges i dag, blev fastlagt i 1970'erne og begyndelsen af 1980'erne på baggrund af en række målinger af styrkeudvikling for forskellige betoner under forskellige temperaturforhold. Analyse af resultaterne viste, at ved temperaturer over 20 °C giver en værdi for $E(\theta)$ på 33.500 J/mol god overensstemmelse, mens $E(\theta)$ for temperaturer under 20 °C afhænger af temperaturen. Ved god overensstemmelse menes fx, at ved at benytte denne værdi af $E(\theta)$ til at bestemme modenheden for en beton og efterfølgende benytte denne modenhed til at estimere styrken for betonen, får man en rimelig god overensstemmelse med målte styrker.

Følgende udtryk for aktiveringsenergien blev introduceret:

$E(\theta) = 33.500 \text{ J/mol for } \theta \geq 20 \text{ °C}$

$E(\theta) = 33.500 + 1.470 (20 - \theta) \text{ J/mol for } \theta < 20 \text{ °C}$

Når der skal beregnes modenhed for en beton, er det ofte angivet, at den anvendte værdi for aktiveringsenergien $E(\theta)$ skal anføres og hvis den korrekte værdi er ukendt, kan ovenstående værdi anvendes. I praksis bliver ovenstående værdi dog stort set altid benyttet.

I det følgende henvises til ovenstående værdi af $E(\theta)$ som den "oprindelige" værdi for $E(\theta)$.

E1 – Måling af aktiveringsenergien for moderne betoner, eftervisning/redigering af prøvningsmetode TI-B 103 og effekt af varmhærdning af beton

Teknologisk Institut har i forbindelse med resultatkontrakten E1 (*Ny teknologi til anlægskonstruktioner*) igangsat en undersøgelse af fire udvalgte betoners styrkeudvikling ved forskellige lagringstemperaturer.

Formålet med undersøgelsen er:

- **At undersøge om der er behov for at justere værdien for aktiveringsenergien.**
Siden start 80'erne er der sket en hel del inden for anvendte bindemidler til beton; nye cementer, anvendelse af pozzulaner, ændrede produktionsmetoder mv. Der har derfor været stillet spørgsmålstejn ved, om ovenstående værdi for $E(\theta)$ stadig er "best practice" eller om værdien bør justeres efter bindersammensætningen.
- **At verificere prøvningsmetoden "TI-B 103 (94) Aktiveringsenergi i den relative hastighedsfunktion".**
Metoden har til formål at bestemme aktiveringsenergien for en given beton, men den er dog, så vidt vides, aldrig blevet benyttet. Desuden er der åbenlyse fejl i enkelte af formlerne i metoden, der som minimum skal rettes. Derudover er metoden foreskrevet i udbudsmaterialet til Femernbælt-forbindelsen, hvorfor en revision af metoden er relevant på nuværende tidspunkt.
- **At undersøge indvirkning af opvarmningsforløbet for laboratorieprøver lagret ved høje temperaturer.**
I store betonkonstruktioner opnår betonen ofte høje temperaturer (50-70 °C) under hærdeprocessen. Mange laboratorieforsøg har samtidig vist, at beton lagret ved høje temperaturer (over 40-50 °C) opnår lavere styrker end beton lagret ved fx 20 °C. Ofte udføres laboratorieforsøg på beton ved konstant temperatur, dvs. prøveemner, der fx skal hærdes ved 60 °C, placeres relativt kort tid efter udstøbningen direkte i et kar med 60 °C varmt vand. I en konstruktion sker denne temperaturændring gradvist og det kan have indflydelse på slutstyrken.

Prøvningsprogram

Der afprøves fire betoner. Betonrecepterne for de fire betoner svarer til recepterne for fire udvalgte betoner, der tidligere er afprøvet i forbindelse med Ekspertcentret, se tabel 1. For mere information om Ekspertcentret se evt. <http://www.concreteexpertcentre.dk/>.

Beton	A	B	D	E
Materiale	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Lavalkalicerment (CEM I 42,5 N)	373	288	-	-
Rapidcement (CEM I 52,5 N)	-	-	288	-
Slaggecement (CEM III/B)	-	-	-	360
Flyveaske	-	96	96	-
RN 0/4	689	670	670	689
Granit 4/8	373	367	367	373
Granit 8/16	702	726	726	702
Amex SB 22	0,7	1,0	1,0	0,7
Glenium SKY 631	2,5	2,4	3,7	2,3
Vand	147	132	131	142
Densitet	2287	2282	2282	2269
Luft (%)	6,0	6,0	6,0	6,0
V/C-tal	0,40	0,40	0,40	0,40
Pastaindhold (%)	27	27	27	27

Tabel 1 Recepter for de fire betoner: beton A med lavalkalicerment (LA), beton B med lavalkalicerment og flyveaske (LA+FA), beton D med rapidcement og flyveaske (Rapid+FA) og beton E med slaggecement (Slagge).

Hver beton afprøves ved 6+2 temperaturscenarier, se tabel 2, og 4 terminer fordelt over det lineære område i en semilogaritmiske afbildning af styrke som funktion af tid. Desuden bestemmes styrken ved 28 døgns modenhed.

For hver temperaturscenarie støbes tre Ø100 x 200 mm cylindre til bestemmelse af trykstyrke.

Lagringen af prøvelegemerne foregår som følger:

- Lagring ved konstant temperatur: Prøverne placeres umiddelbart efter støbning, dvs. mens de stadig er i cylinderformen, i vandkar med den givne temperatur. Ved termin for første prøvning afformes prøvelegemerne og de prøvelegemer, der først skal testes ved senere terminer, placeres i vandkaret.
- Lagring ved gradvist stigende temperatur: Umiddelbart efter støbning placeres prøverne, dvs. mens de stadig er i cylinderformen, i varmeskab, der er programmeret til at følge en given temperaturkurve. Ved termin for første prøvning afformes prøvelegemerne og de prøvelegemer, der først skal testes ved senere terminer, pakkes vådt ind og placeres igen i varmeskabet.

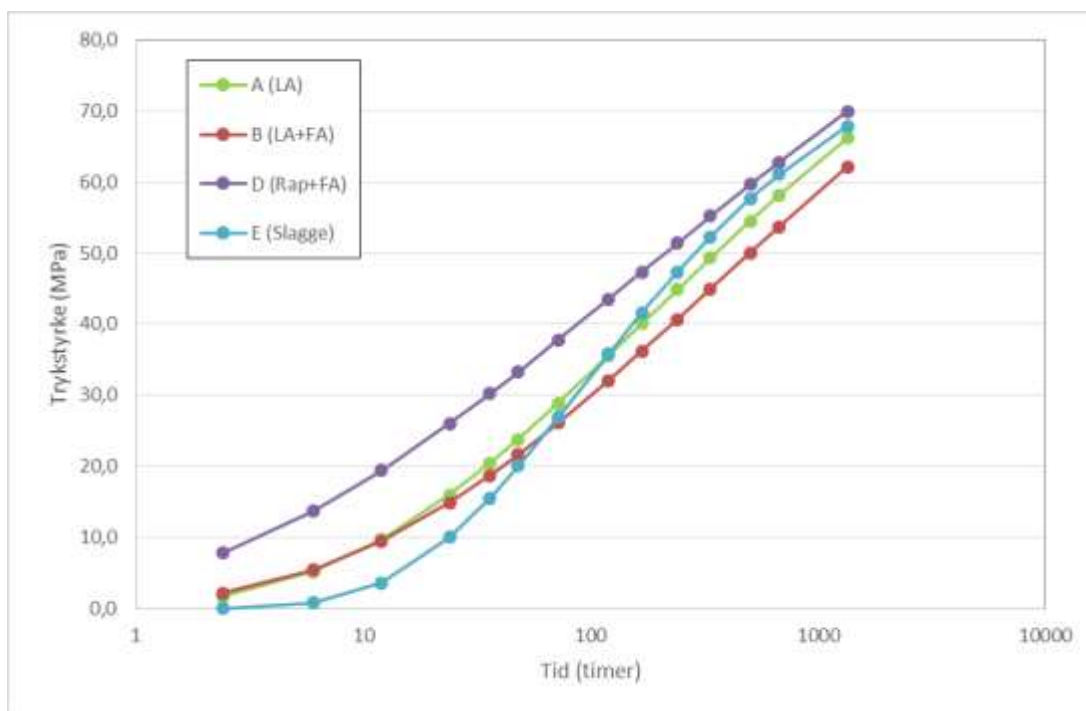
Temperaturen for prøvelegemerne følges for én prøve fra hver temperaturscenarie vha. af en indstøbt varmeføler.

Temperaturscenarier
5°C
10°C
20°C
30°C
45°C
60°C
45°C - gradvis opvarmning
60°C - gradvis opvarmning

Tabel 2 Temperaturscenarier.

Den gradvise opvarmning til hhv. 45 °C og 60 °C er bestemt ud fra en temperatursimulering af centrumtemperaturen i en væg støbt på eksisterende fundament. I simuleringen for de betoner, der skal nå en sluttemperatur på 45 °C, regnes med en vægtykkelse på 40 cm og for de betoner, der skal nå en sluttemperatur på 60 °C, regnes med en vægtykkelse på 60 cm. Som inputparameter i temperatursimuleringen er bl.a. brugt varmeudviklingsdata bestemt i forbindelse med Ekspertcentret for de tilsvarende betoner.

Det lineære område i en semilogaritmisk afbildning af styrke som funktion af tid findes på baggrund af data fra Ekspertcentret som vist i figur 1 og i tabel 3.



Figur 1 Trykstyrker ved 20 °C beregnet ud fra kurvefitparametrene f_{∞} , τ og α , er bestemt på baggrund af data fra Ekspertcentret.

Tid (timer)	Trykstyrke (MPa)			
	A (LA)	B (LA+FA)	D (Rap+FA)	E (Slagge)
2,4	1,7	2,2	7,8	0,0
6	5,2	5,5	13,7	0,8
12	9,7	9,5	19,4	3,6
24	16,0	14,9	26,0	10,1
36	20,4	18,7	30,2	15,6
48	23,8	21,7	33,3	20,1
72	28,9	26,1	37,8	26,9
120	35,6	32,1	43,5	35,8
168	40,1	36,2	47,4	41,6
240	44,9	40,7	51,4	47,3
336	49,3	44,9	55,2	52,3
504	54,5	50,1	59,7	57,7
672	58,1	53,7	62,8	61,1
1344	66,2	62,1	69,9	67,8

Tabel 3 Beregnede trykstyrker i MPa ved 20°C for Beton A, B, D og E. De farvede områder angiver, hvor der er linearitet i den semilogaritmiske afbildning i figur 1 (bedømt visuelt). Området i den røde ramme (0.5 til 2 døgn), er de prøvningsterminer, der er angivet som vejledende i prøvningsmetode TI-B 103.

De valgte prøvningsterminer for de fire betoner er vist i tabel 4. De fire første 4 terminer er valgt, så de dækker det lineære område i den semilogaritmiske afbildning af styrke som funktion af tid i figur 1 (dvs. jævnt fordele over de farvede områder i tabel 3). Den tid i timer, som prøvelegemerne skal lagres for at opnå en ønskede modenhed ved prøvningstidspunktet, er beregnet vha. den "oprindelige" aktiveringsenergi.

A - Lavalkali

Temp. (°C)	Termin for trykprøvning (h)				
5	123	246	575	1150	2300
10	72	145	338	676	1352
20	36	72	168	336	672
30	23	46	107	213	427
45	12	24	57	114	228
60	7	14	32	64	129
45 - gradvist	21	33	71	122	243
60 - gradvist	19	27	47	79	143

B - Lavalkali + flyveaske

Temp. (°C)	Termin for trykprøvning (h)				
5	164	329	575	1150	2300
10	97	193	338	676	1352
20	48	96	168	336	672
30	30	61	107	213	427
45	16	33	57	114	228
60	9	18	32	64	129
45 - gradvist	27	46	70	125	239
60 - gradvist	23	32	49	81	146

D - Rapid+flyveaske

Temp. (°C)	Termin for trykprøvning (h)				
5	82	123	164	246	2300
10	48	72	97	145	1352
20	24	36	48	72	672
30	15	23	30	46	427
45	8	12	16	24	228
60	5	7	9	14	129
45 - gradvist	17	21	26	34	237
60 - gradvist	16	19	22	27	142

E - Slagge cement

Temp. (°C)	Termin for trykprøvning (h)				
5	164	205	246	411	2300
10	97	121	145	241	1352
20	48	60	72	120	672
30	30	38	46	76	427
45	16	20	24	41	228
60	9	12	14	23	129
45 - gradvist	28	32	36	52	240
60 - gradvist	23	26	29	38	145

Tabel 4 Prøvningsterminer.

Et resume af de målte trykstyrker (middelværdi af tre cylindre) er vist i Anneks A.

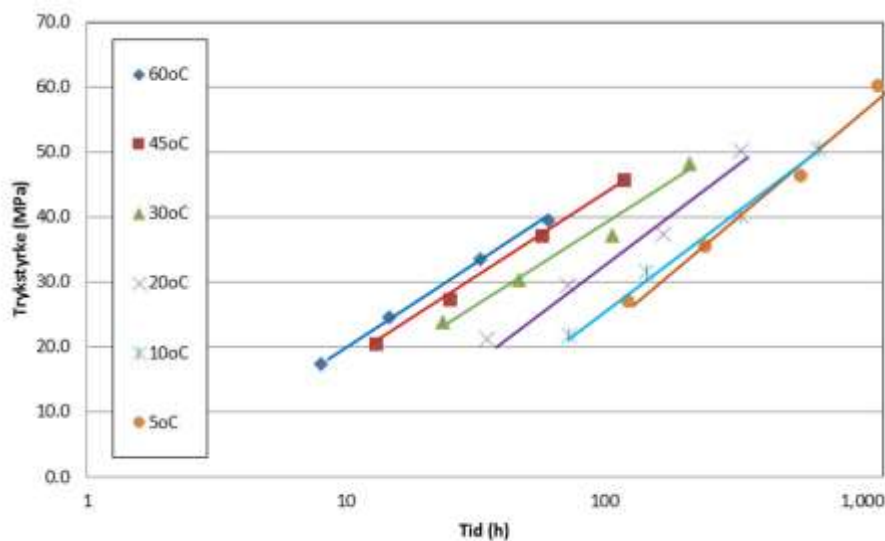
Resultater – Aktiveringsenergien beregnet iht. principperne i TI-B 103 for beton A, B, D og E

Aktiveringsenergien for de fire betoner beregnes på baggrund af principperne i TI-B 103.

I det retlinede område bestemmes hastigheden for egenskabsudviklingen, k_θ , for hvert temperaturniveau, θ , som:

$$k_\theta = \frac{\text{egenskab 1} - \text{egenskab 2}}{\text{tid 1} - \text{tid 2}}$$

Hvor egenskab 1, hhv. egenskab 2 er yderpunkterne i det lineære område i figur 2.



Figur 2 Styrkeresultaterne for beton A (Lavalkali) i semilogaritmiske afbildning af styrke som funktion af tid.

For hvert temperaturniveau, beregnes aktiveringsenergien efter formelen:

$$E(\theta) = (\ln k_\theta - \ln k_{20}) \frac{R}{\left(\frac{1}{T_{20}} - \frac{1}{T_\theta}\right)}, \text{ hvor } \theta \neq 20^\circ\text{C}$$

For temperaturer større end eller lig med 20 °C findes den konstante aktiveringsenergi som middel af værdierne for $E(\theta)$ bestemt for $\theta > 20^\circ\text{C}$, dvs. her som:

$$E(\theta \geq 20) = \frac{E(30) + E(45) + E(60)}{3}$$

For temperaturer mindre end 20 °C findes C_θ , for hvert temperaturniveau som:

$$C_\theta = \frac{E(\theta) - E(\theta \geq 20)}{20 - \theta}$$

Konstanten C findes herefter som middelværdien af C_θ for $\theta < 20^\circ\text{C}$, dvs. her som:

$$C = \frac{C_5 + C_{10}}{2}$$

Mellemregningerne til bestemmelse af aktiveringsenergieerne er vist i tabel 5.

A - Lavalkali

θ , °C	5	10	20	30	45	60
T, K	278	283	293	303	318	333
$k(\theta)$, MPa/h	0,0307	0,0438	0,0895	0,1204	0,2220	0,3928
$E(\theta)$, J/mol	48.347	49.271		21.922	28.149	29.998
C_θ	1.444	2.258				

B - Lavalkali FA

θ , °C	5	10	20	30	45	60
T, K	278	283	293	303	318	333
$k(\theta)$, MPa/h	0,0222	0,0370	0,0721	0,1193	0,2782	0,2539
$E(\theta)$, J/mol	53.097	46.032		37.211	41.853	25.539
C_θ	1.215	1.116				

D - Rapid FA

θ , °C	5	10	20	30	45	60
T, K	278	283	293	303	318	333
$k(\theta)$, MPa/h	0,1157	0,1921	0,3531	0,7832	0,9264	1,6828
$E(\theta)$, J/mol	50.376	41.992		58.791	29.883	31.664
C_θ	684	188				

E - Slagge

θ , °C	5	10	20	30	45	60
T, K	278	283	293	303	318	333
$k(\theta)$, MPa/h	0,0644	0,1103	0,2123	0,3310	0,6778	1,2883
$E(\theta)$, J/mol	53.833	45.143		32.764	35.964	36.564
C_θ	1.249	1.005				

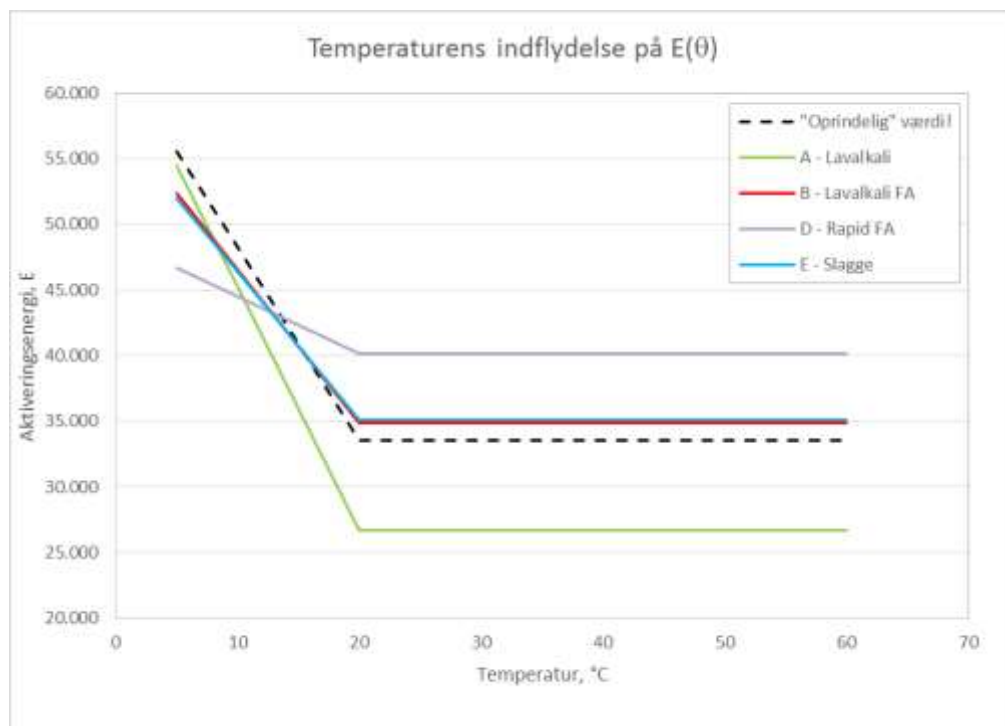
Tabel 5 Parametre til bestemmelse af aktiveringsenergien for de fire betoner: lagringstemperatur, θ , hastighed, $k(\theta)$, aktiveringsenergien for de enkelte temperaturniveauer, $E(\theta)$, og konstanten for de enkelte temperaturniveauer, C_θ

Ud fra data i tabel 5, beregnes den eksperimentelt bestemte aktiveringsenergi for de fire betoner. Disse er vist i tabel 6 sammen med den "oprindelige værdi" for $E(\theta)$.

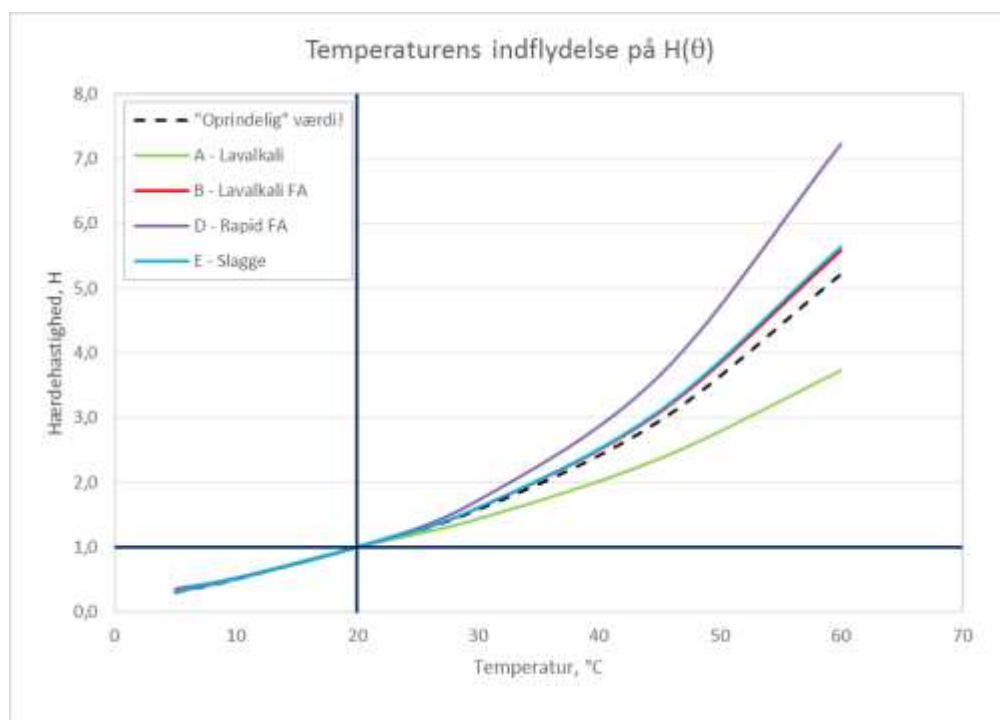
Mix design	Aktiveringsenergi	
	$E(\geq 20)$ [J/mol]	$E(< 20)$ [J/mol]
A - Lavalkali	26.690	$26.690 + 1.851 (20 - \theta)$
B - Lavalkali FA	34.868	$34.868 + 1.166 (20 - \theta)$
D - Rapid FA	40.113	$40.113 + 436 (20 - \theta)$
E - Slagge	35.098	$35.098 + 1.127 (20 - \theta)$
"Oprindelig" værdi	33.500	$33.500 + 1.470 (20 - \theta)$

Tabel 6 De eksperimentelt bestemte værdier for aktiveringsenergien beton A, B, D og E sammen med den "oprindelige værdi".

I figur 3a og 3b er temperaturens indflydelse på hhv. aktiveringsenergien, $E(\theta)$, og hastighedsfunktionen, $H(\theta)$, for de fire betoner afbilledet grafisk.



Figur 3a Aktiveringsenergien, $E(\theta)$, for beton A, B, D og E som funktion af temperaturen sammenlignet med den "oprindelige" værdi (den sorte stiplede linje).



Figur 3b Hastighedsfunktionen, $H(\theta)$, for beton A, B, D og E som funktion af temperaturen sammenlignet med den "oprindelige" værdi (den sorte stiplede linje).

For at illustrere indvirkningen af at bruge den eksperimentelt bestemte værdi af aktiveringsenergien til at bestemme modenhed og styrke ved de forskellige lagringstemperaturer, gøres følgende:

- Ud fra de målte styrkedata ved 20 °C, bestemmes parametrene i modellen for egenskabsudvikling, f_{∞} , τ og α , der beskriver styrkeudviklingen, se tabel 7.

Model for egenskabsudvikling:

$$f_M = f_{\infty} \exp\left(\frac{\tau}{M}\right)^{\alpha}$$

hvor: f_{∞} er trykstyrken efter uendelig lang tid

τ er en tidskonstant

α er en hælnings/krumningskonstant

M er modenheden, hvor f_M er opnået

- Derefter bestemmes modenheden svarende til prøvningsterminerne brugt ved de forskellige lagringsterminer ved brug af hhv. "den oprindelige" E og den eksperimentelt bestemte værdi for E, se kolonne 4 og 5 i tabel 8.
- Når vi har modenheden, kan vi, vha. parametrene, f_{∞} , τ og α , bestemt for den pågældende beton ved 20 °C, estimere styrken med udgangspunkt i hhv. "den oprindelige" E og den eksperimentelt bestemte værdi for E, se kolonne 6 og 7 i tabel 8, der som eksempel viser beregningerne for beton A ved 5 °C.
- Nu kan den målte styrke ved de forskellige lagringsterminer sammenlignes med de beregnede styrker med udgangspunkt i hhv. "den oprindelige" E og den eksperimentelt bestemte værdi for E, se figur 4, 5, 6 og 7.

Mix design	Kurvefit parameter ved 20°C		
	Q [MPa]	τ [days]	α [-]
A - Lavalkali	109	7,08	0,33
B - Lavalkali FA	123	14,31	0,28
D - Rapid FA	125	6,20	0,25
E - Slagge	84	3,80	0,57
"Oprindelig" værdi!			

Tabel 7 Parametrene f_{∞} , τ og α , der beskriver styrkeudviklingen ved 20 °C for beton A, B, D og E.

A5 - Lavalkali

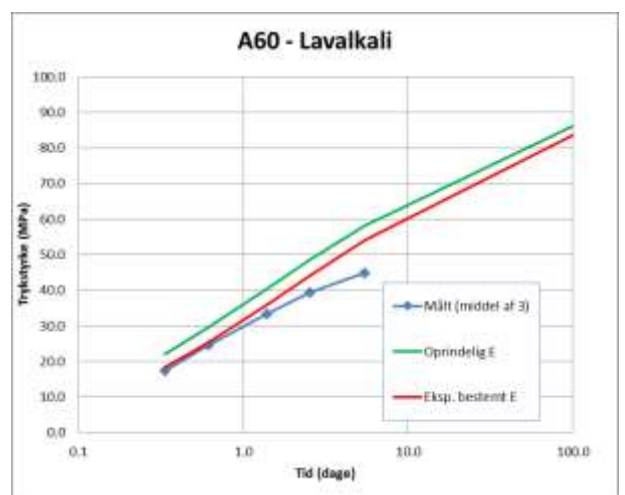
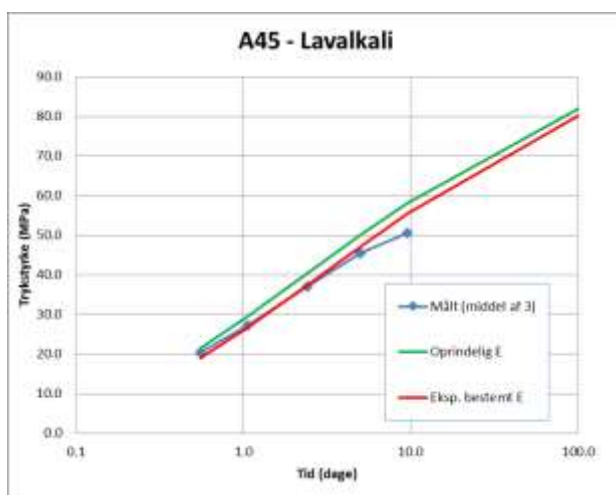
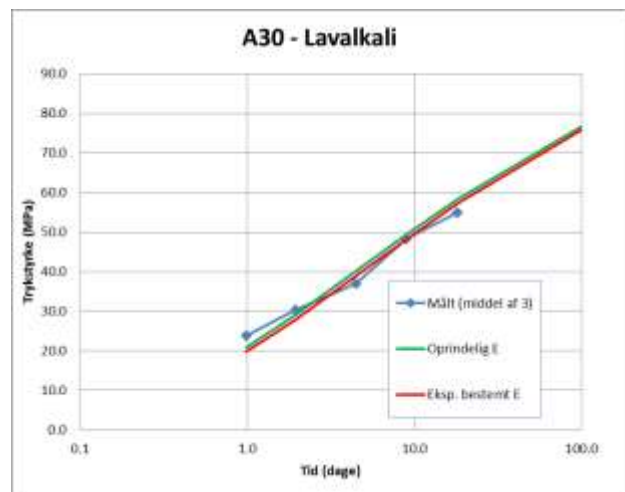
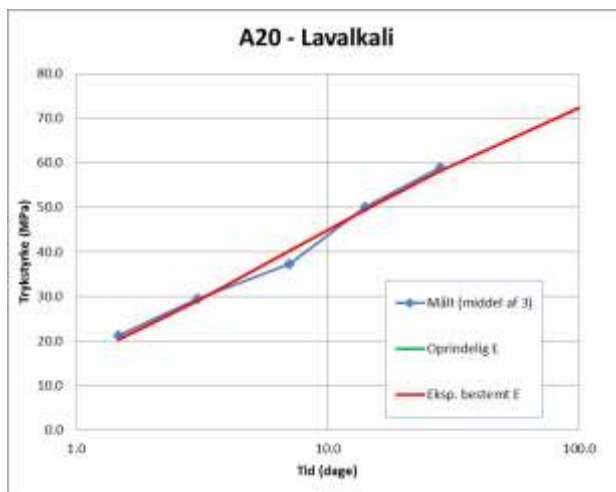
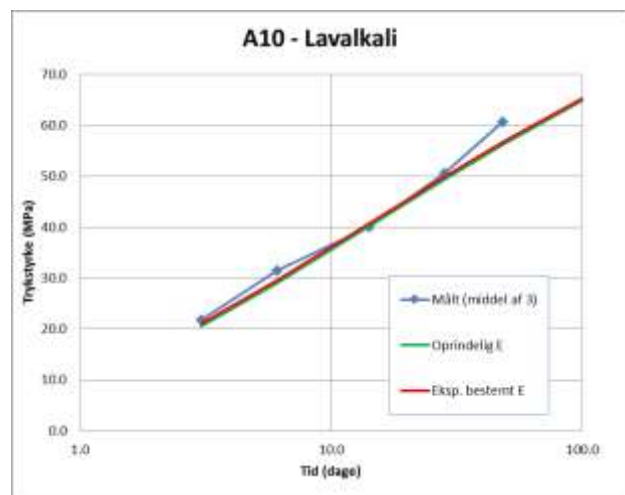
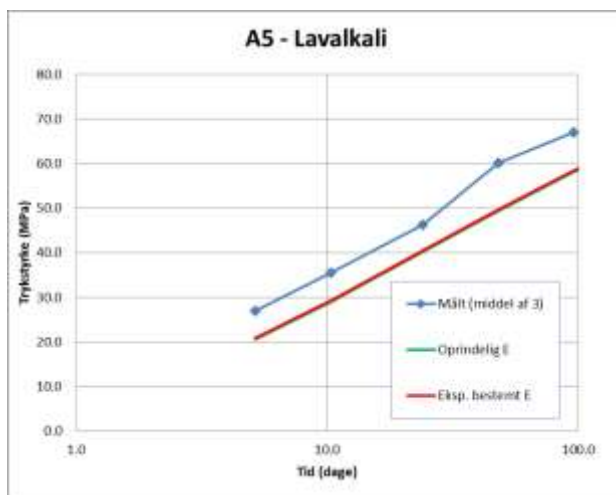
Temp = 5 °C

Målt (middel af 3)			Modenhed		Beregnet styrke	
Tid	Tid	Trykstyrke	[dage]		[MPa]	
[timer]	[dage]	[MPa]	Oprindelig E	Eksp. bestemt E	Oprindelig E	Eksp. bestemt E
124	5,2	26,9	1,5	1,5	20,5	20,8
248	10,3	35,5	3,0	3,1	29,0	29,3
577	24,1	46,3	7,0	7,2	40,1	40,5
1152	48,0	60,1	14,0	14,4	49,3	49,6
2295	95,6	67,0	27,9	28,6	58,1	58,4
2400	100,0		29,2	29,9	58,6	58,9

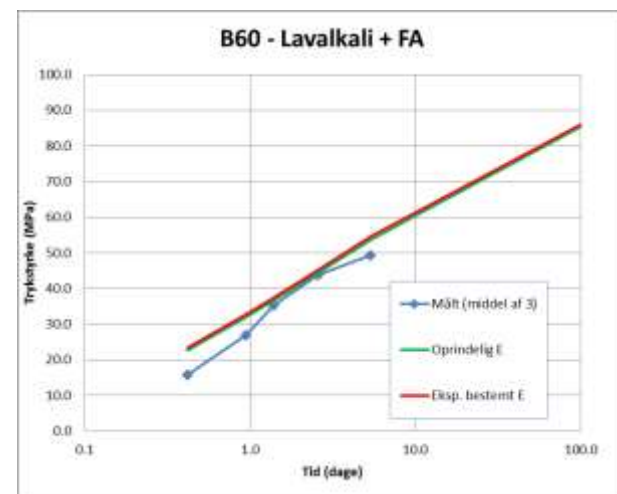
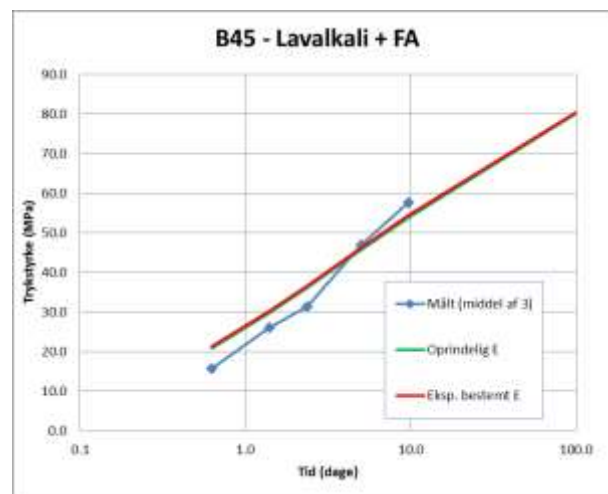
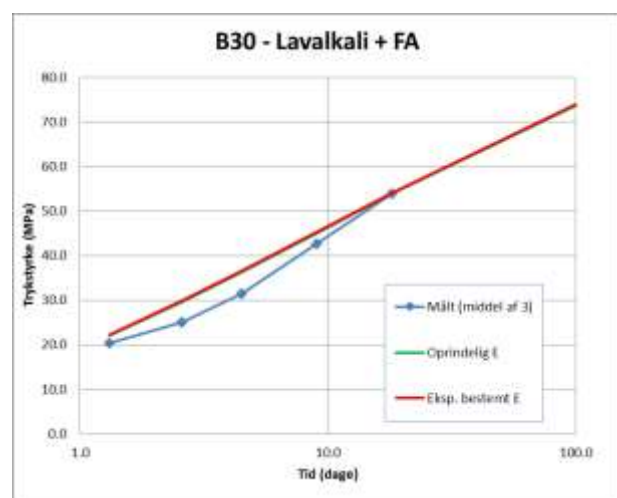
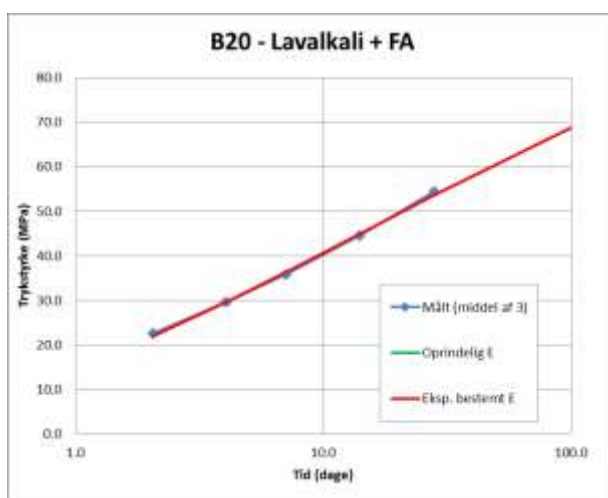
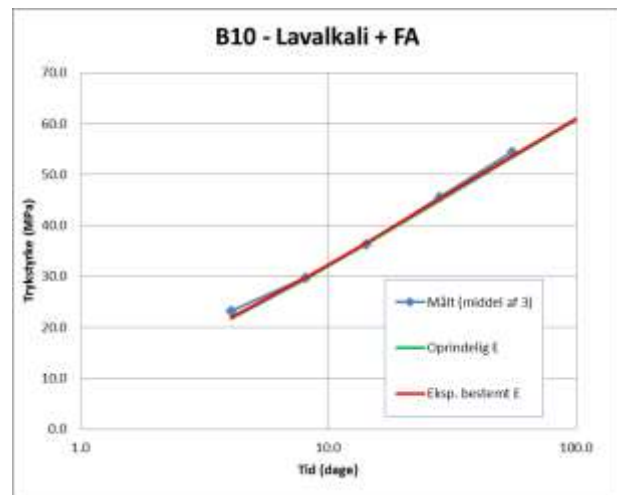
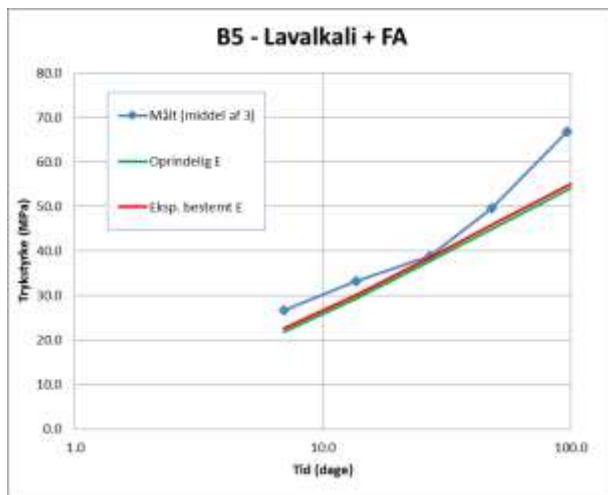
Tabel 8 For Beton A – lavalkali, lagret ved 5 °C er vist sammenhørende værdier af tid, målt trykstyrke, modenhed ved prøvningstidspunktet beregnet vha. hhv. "oprindelig" og eksperimentelt bestemt E, samt beregnet styrke ved de beregnede modenheder.

Figur 4 til 7 viser for hhv. beton A, B, D og E:

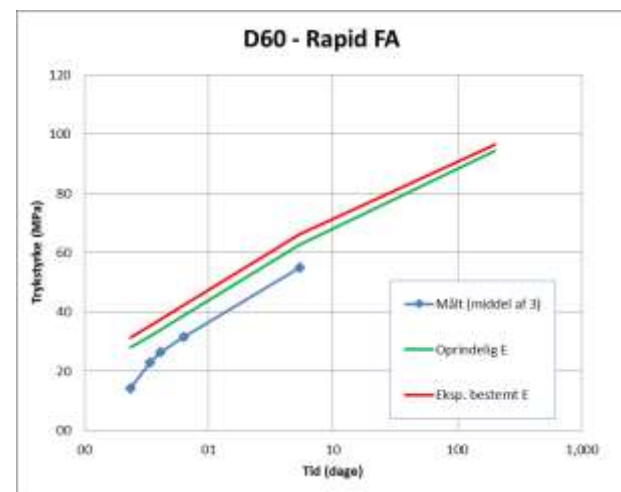
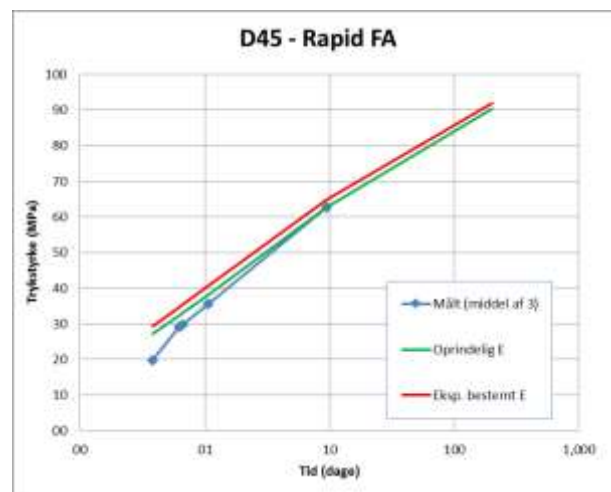
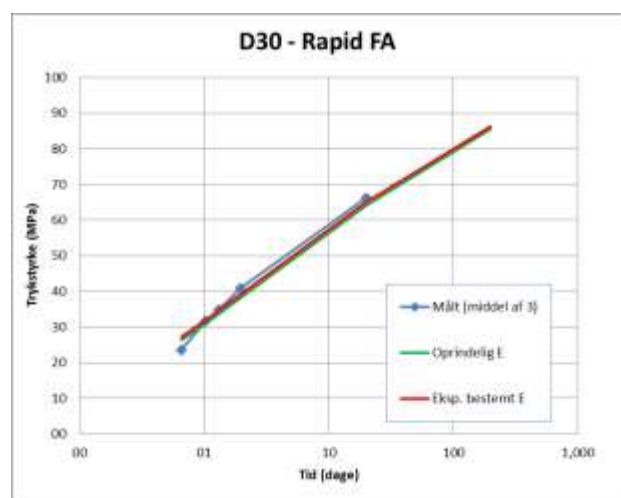
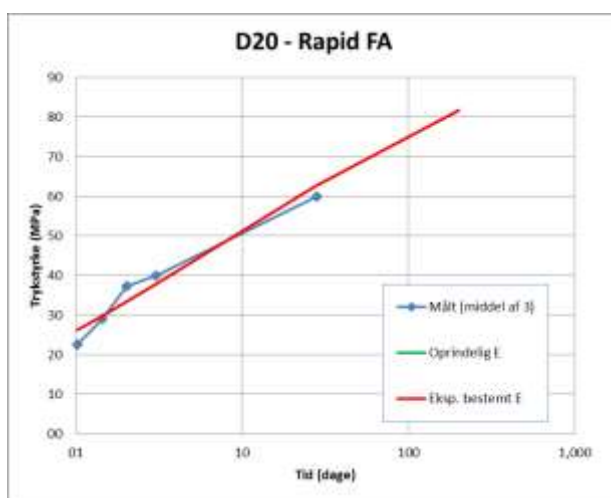
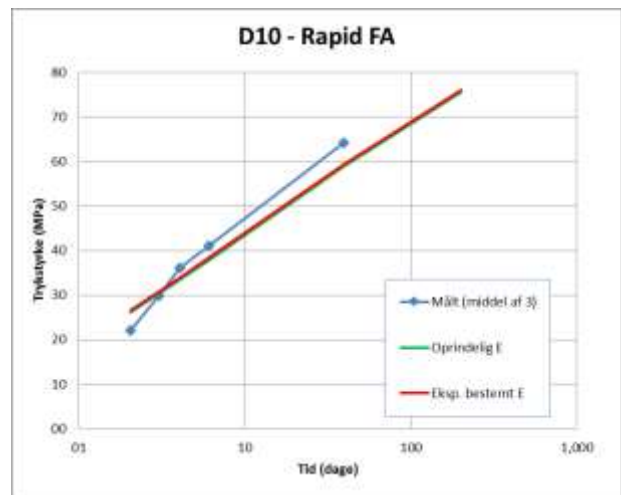
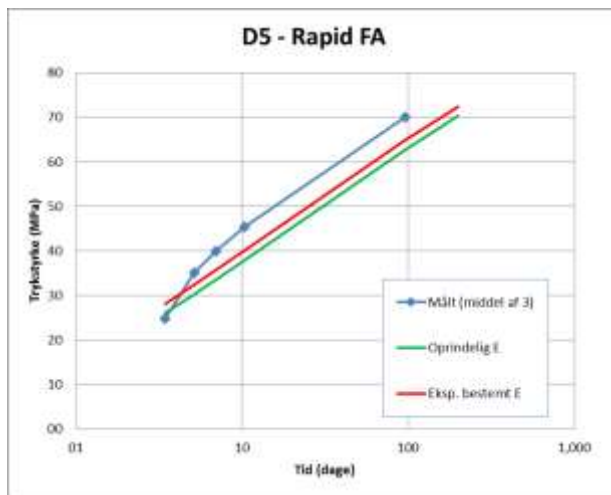
- de målte styrker (med blå)
- styrken beregnet vha. den "oprindelige" værdi for E (med grønt)
- styrken beregnet vha. den eksperimentelt bestemte værdi for E (med rødt)



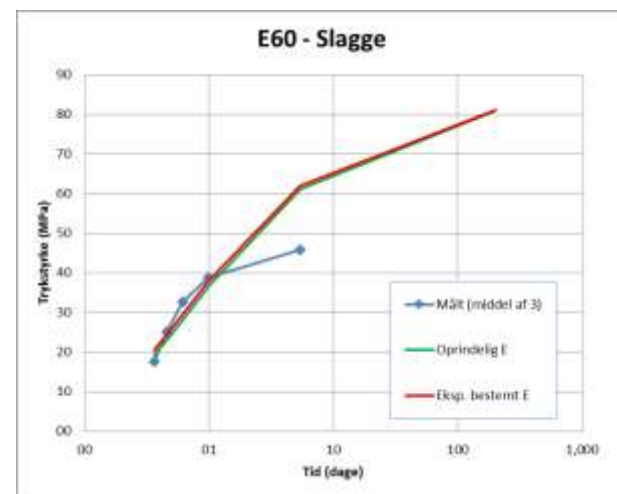
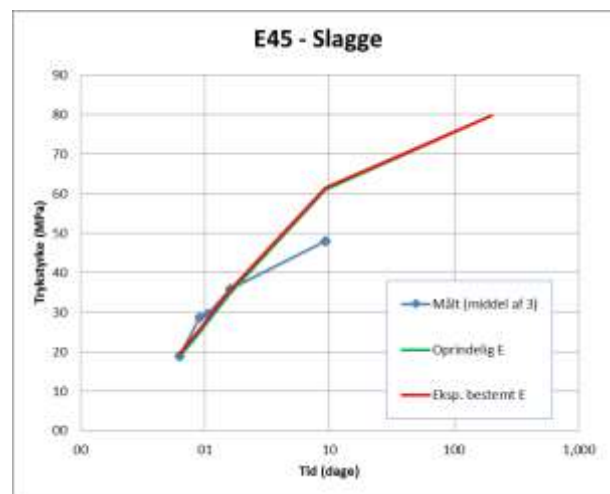
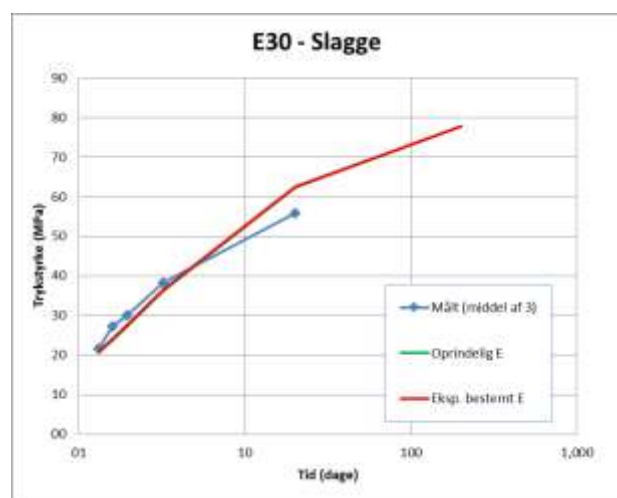
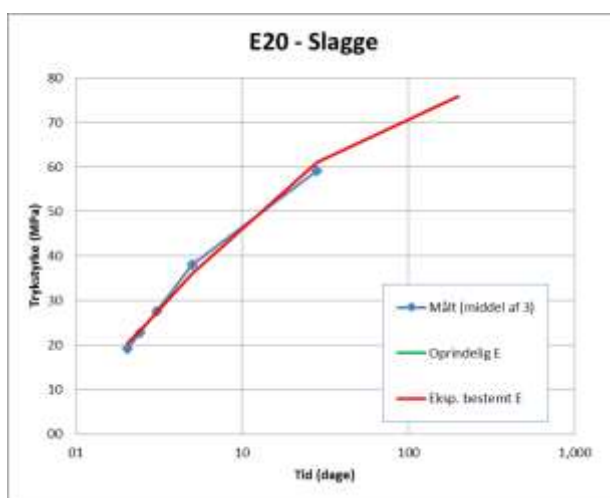
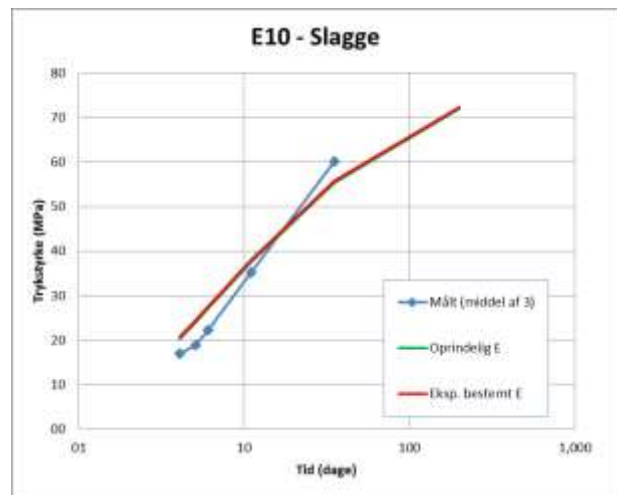
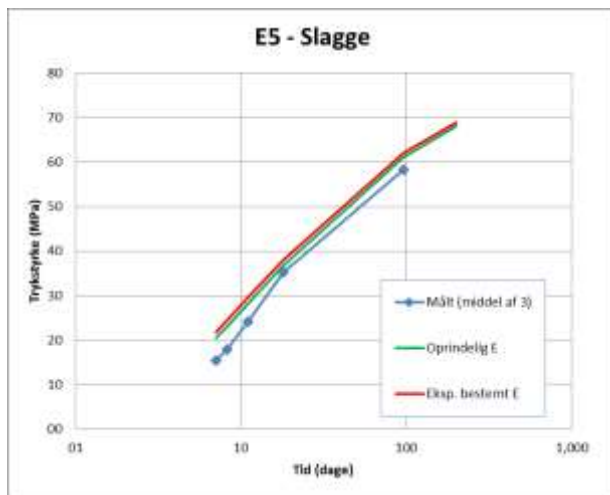
Figur 4 Beton A – Lavalkali: Den målte styrke ved de forskellige lagringsterminer sammenlignet med de beregnede styrker med udgangspunkt i hhv. "den oprindelige" $E(\theta)$ og den eksperimentelt bestemte værdi for $E(\theta)$. Tallet i overskrifterne angiver lagringstemperaturen. Alle ovenstående resultater er for prøver lagret ved konstant lagringstemperatur.



Figur 5 Beton B – Lavalkali+FA: Den målte styrke ved de forskellige lagringsterminer sammenlignet med de beregnede styrker med udgangspunkt i hhv. "den oprindelige" $E(\theta)$ og den eksperimentelt bestemte værdi for $E(\theta)$. Tallet i overskrifterne angiver lagringstemperaturen. Alle ovenstående resultater er for prøver lagret ved konstant lagringstemperatur.



Figur 6 Beton D – Rapid + FA: Den målte styrke ved de forskellige lagringsterminer sammenlignet med de beregnede styrker med udgangspunkt i hhv. "den oprindelige" $E(\theta)$ og den eksperimentelt bestemte værdi for $E(\theta)$. Tallet i overskrifterne angiver lagringstemperaturen. Alle ovenstående resultater er for prøver lagret ved konstant lagringstemperatur.

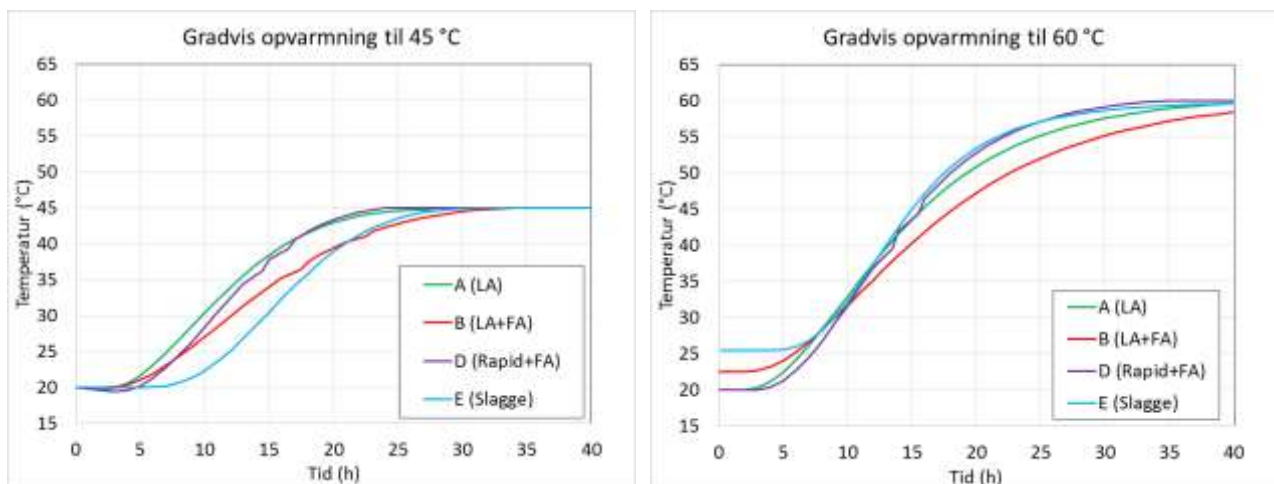


Figur 7 Beton E – Slagge: Den målte styrke ved de forskellige lagringsterminer sammenlignet med de beregnede styrker med udgangspunkt i hhv. "den oprindelige" $E(\theta)$ og den eksperimentelt bestemte værdi for $E(\theta)$. Tallet i overskrifterne angiver lagringstemperaturen. Alle ovenstående resultater er for prøver lagret ved konstant lagringstemperatur.

Resultater – Indvirkning af opvarmningsforløbet for laboratorieprøver lagret ved høje temperaturer.

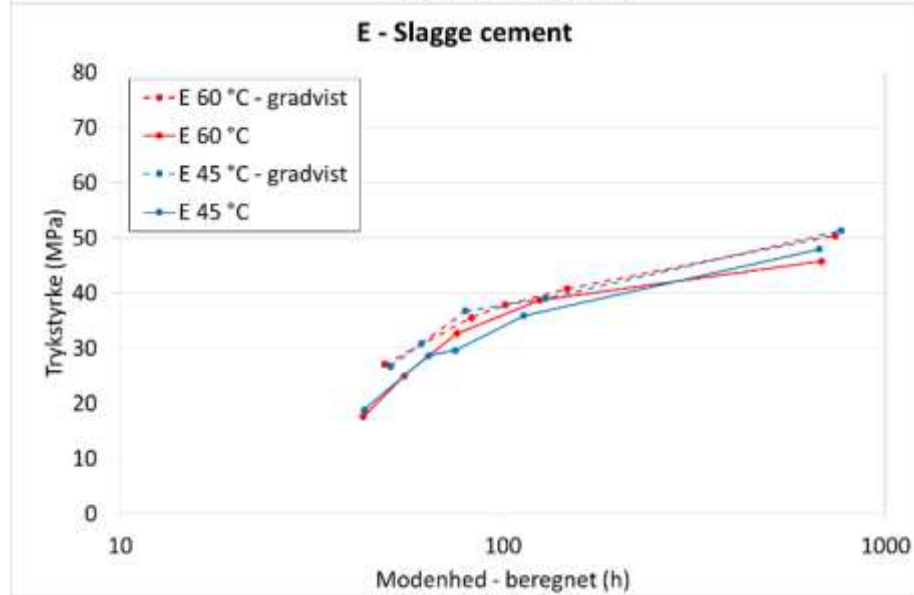
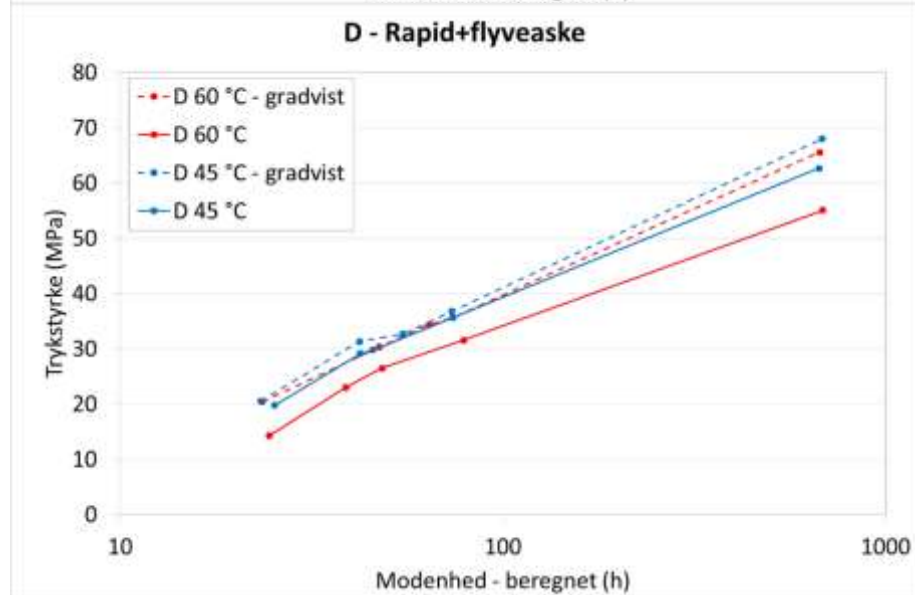
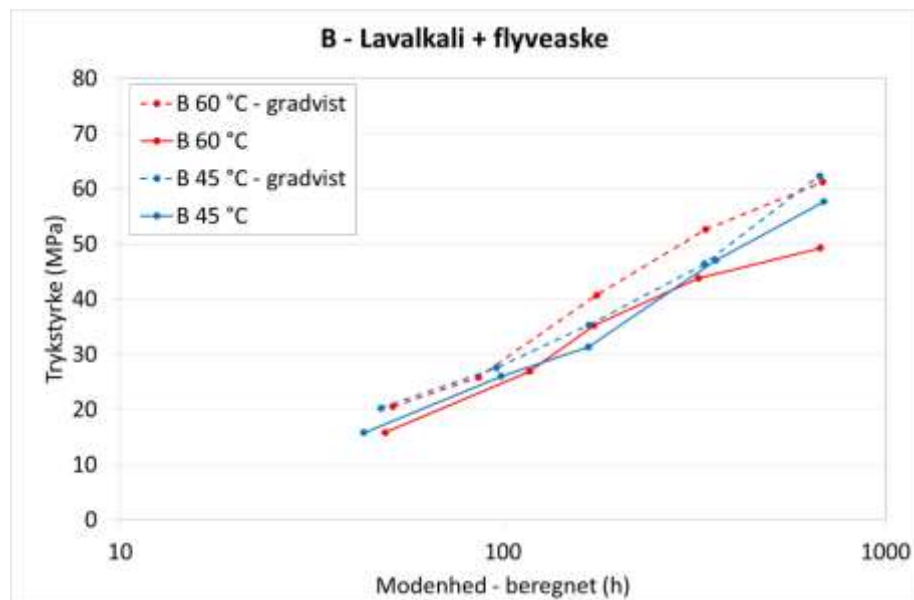
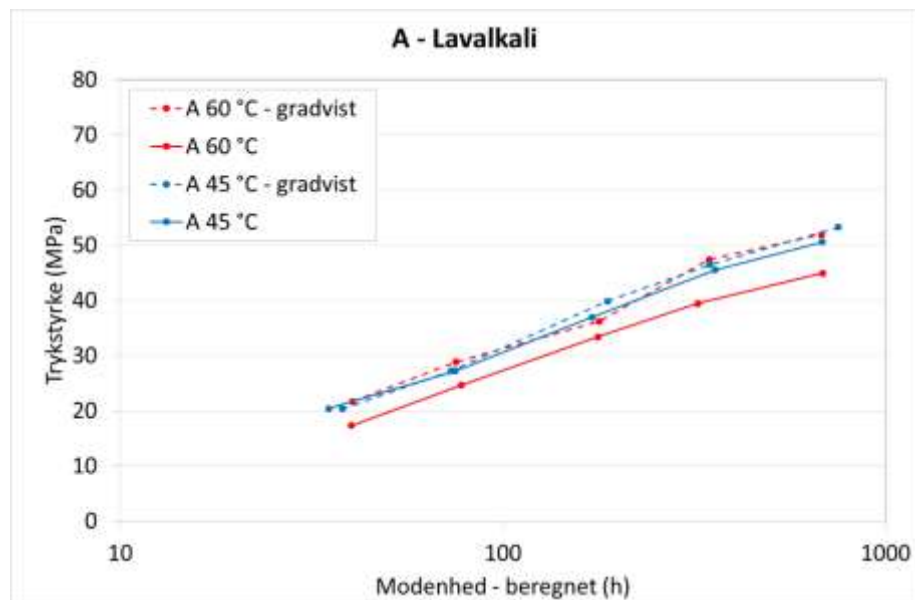
Som beskrevet ovenfor, blev der anvendt to forskellige temperaturscenarier ved lagringstemperaturer på hhv. 45 °C og 60 °C:

1. Umiddelbart efter udstøbningen blev prøverne placeret i vandkar ved hhv. 45 °C og 60 °C. Prøverne blev holdt ved konstant temperatur indtil umiddelbart for prøvning.
2. Hærdetemperaturen øges gradvist over en periode på 30 til 40 timer fra en støbetemperatur på omkring 20 °C til den maksimale temperatur på hhv. 45 °C og 60 °C. Opvarmningskurverne er vist i figur 8.



Figur 8 Opvarmningskurverne for den gradvise opvarmning til hhv. 45 °C og 60 °C. Kurverne er bestemt ud fra en temperatursimulering af centrumtemperaturen i en væg støbt på eksisterende fundament. Ved simuleringen er der gjort brug af varmeudviklingsparametrene for den aktuelle beton.

Udviklingen af trykstyrke blev testet fra én til 28 døgn's modenhed. De målte styrker er vist i Anneks A og resultaterne for 45 °C og 60 °C er summeret i figur 9.



Figur 9 Målte trykstyrker som funktion af modenhed ved lagring ved konstant temperatur og gradvist stigende temperatur ved hhv. 45 °C og 60 °C.

Kommentarer til resultaterne

Aktiveringsenergi og TI-B 103

Som det fremgår af figur 3b, er der, for temperaturer mindre end 20 °C, ikke nogen væsentlig forskel på hastighedsfunktionen bestemt for de forskellige betoner. For temperaturer større end 20 °C, ses følgende:

- For beton B (LA+FA) og E(Slagge) svarer hastighedsfunktionen bestemt ud fra de eksperimentelt bestemte værdier for E, dvs. E_{exp} , til hastigheds funktionen bestemt ud fra den "oprindelige" værdi for E, dvs. E_{opr} .
- For beton A (LA) og D (Rapid+FA) er hastighedsfunktionen bestemt ud fra E_{exp} ved temperaturer større end 20 °C, henholdsvis lavere og højere end hastigheds funktionen bestemt ud fra E_{opr} .

Ud fra en sammenligning af de målte og de estimerede styrker afbilledet i figur 4 til 7, fremgår det, at der - generelt - ikke opnås et signifikant bedre estimat af styrken for en beton ved brug af de eksperimentelt bestemte værdier for $E(\theta)$ frem for at benytte den oprindelige værdi for $E(\theta)$.

For enkelte af betonerne og enkelte lagringstemperaturer (fx Beton A, 60 °C og Beton D, 5 °C), forbedres styrkeestimatet ved brug af E_{exp} hvorimod det for beton D, 60 °C ses, at styrkeestimatet beregnet vha. E_{opr} giver bedre overensstemmelse med de målte værdier.

Som nævnt i indledningen, er formålet med denne del af undersøgelsen:

- **At undersøge om der er behov for at justere værdien for aktiveringsenergien ved anvendelse af nutidens bindersammensætninger eller om E_{opr} stadig er "best practice".**

På baggrund af ovenstående resultater og taget i regning, at det er et ganske omfattende prøvningsprogram, der skal til for at bestemme aktiveringsenergien for en beton, må det konkluderes, at den oprindelige værdi for $E(\theta)$:

$$E(\theta) = 33.500 \text{ J/mol for } \theta \geq 20 \text{ °C}$$

$$E(\theta) = 33.500 + 1.470 (20 - \theta) \text{ J/mol for } \theta < 20 \text{ °C}$$

stadig er "best practice".

- **At verificere prøvningsmetoden "TI-B 103 (94) Aktiveringsenergi i den relative hastighedsfunktion".**

Metoden kan, når enkelte fejl i formler er rettet, benyttes til at bestemme aktiveringsenergien for en beton. Metoden kan være relevant, hvis en beton tænkes udført med en "markant anderledes" bindersammensætning.

Indvirkning af opvarmningsforløbet for laboratorieprøver lagret ved høje temperaturer

Denne del af undersøgelsen sigter på at undersøge om opvarmningsforløbet for prøvelegemer, der lagres ved høje temperaturer (her 45 og 60 °C) har indflydelse på styrken. Samtlige målte styrker er vist i Anneks A. I tabel 9 er vist ændringen i styrken i % ved sammenligning af styrker opnået ved forskellige lagrings-scenarier ved 28 modenhedsdøgn. Tabel 9 viser:

- sammenligning af styrker for prøvelegemer, der har lagret ved gradvist stigende temperatur med styrker for prøvelegemer, der har lagret ved konstant temperatur.
- sammenligning af styrker for prøvelegemer, der har lagret ved hhv. konstant og gradvist stigende temperatur ved hhv. 45 og 60 °C med styrker for prøvelegemer, der har lagret ved 20 °C.

	A	B	D	E
	LA	LA+FA	Rapid + FA	Slagge
$(f_{45}^{\circ\text{C gradv}} - f_{45}^{\circ\text{C}}) / f_{45}^{\circ\text{C}} * 100\%$	5	8	8	7
$(f_{60}^{\circ\text{C gradv}} - f_{60}^{\circ\text{C}}) / f_{60}^{\circ\text{C}} * 100\%$	16	24	19	10
$(f_{45}^{\text{gradv }^{\circ\text{C}}} - f_{20}^{\circ\text{C}}) / f_{20}^{\circ\text{C}} * 100\%$	-10	14	13	-13
$(f_{45}^{\circ\text{C}} - f_{20}^{\circ\text{C}}) / f_{20}^{\circ\text{C}} * 100\%$	-14	6	4	-19
$(f_{60}^{\circ\text{C gradv}} - f_{20}^{\circ\text{C}}) / f_{20}^{\circ\text{C}} * 100\%$	-12	12	9	-15
$(f_{60}^{\circ\text{C}} - f_{20}^{\circ\text{C}}) / f_{20}^{\circ\text{C}} * 100\%$	-24	-10	-8	-23

Tabel 9 Sammenligning af styrker målt ved 28 modenhedsdøgn ved forskellige lagringstemperaturer og temperaturforløb. Forskellen på de sammenlignede styrker er vist i %.

På baggrund af resultaterne i Anneks A, figur 9 og tabel 9, kan følgende iagttagelser gøres vedrørende lagringstemperaturens indflydelse på styrken ved 28 døgns modenhed for de fire betoner A, B, D og E:

Lagring ved 60 °C:

- Styrken af betonerne lagret ved konstant temperatur på 60 °C er signifikant lavere (10-24%) end styrken af de tilsvarende betoner lagret ved gradvist stigende temperatur.
- Styrken af betonerne lagret ved konstant temperatur på 60 °C er signifikant lavere (8-24%) end styrken af de tilsvarende betoner lagret ved 20 °C.
- Betoner med flyveaske (B og D) opnår en højere styrke (9-12%) ved lagring ved gradvist stigende temperatur til 60 °C sammenlignet med styrken af de tilsvarende betoner lagret ved 20 °C.
- Betoner uden flyveaske (A og E) opnår en lavere styrke (12-15%) ved lagring ved gradvist stigende temperatur til 60 °C sammenlignet med styrken af de tilsvarende betoner lagret ved 20 °C.

Lagring ved 45 °C:

- Der kan iagttages samme tendens, dog mindre udtalt, ved lagring ved "45 °C / 45 °C grad" som for lagring ved "60 °C / 60 °C grad".

Som nævnt i indledningen, er formålet med denne del af undersøgelsen:

- **At undersøge indvirkning af opvarmningsforløbet for laboratorieprøver lagret ved høje temperaturer.**

På baggrund af ovenstående resultater kan det konkluderes, at temperaturforløbet under betonens lagring ved høje temperaturer har en markant indflydelse på styrken af beton. Ved en gradvis opvarmning af betonen til en høj temperatur, som det foregår i en virkelig konstruktion, opnås en signifikant højere styrke, end hvis lagringen foregår ved en konstant høj temperatur.

Dette bør tage i regning i fremtidige laboratorieforsøg, hvor indvirkningen på betonens styrke af mulig høj temperatur i en konstruktion ønskes undersøgt.

Anneks A

Målte trykstyrker (middelværdi af tre cylindre) for beton A, B, D og E

(Bemærk – de angivne modenheder i anneks A er beregnet ud fra den ”oprindelige” værdi af $E(\theta)$)

A Lavalkali

Resumé af resultater

A 5 °C			A 10 °C			A 20 °C			A 30 °C		
Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]
124	38	27	73	35	22	35	38	21	24	40	24
248	74	35	146	69	32	73	75	29	47	76	30
577	169	46	340	163	40	169	172	37	108	173	37
1152	344	60	677	330	51	338	347	50	214	344	48
2295	681	67	1156	726	61	673	686	59	432	687	55

A 45 °C			A 45 °C - gradvist			A 60 °C			A 60 °C - gradvist		
Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]
13	35	20	22	38	20	8	40	17	20	41	22
26	75	27	34	73	27	15	78	25	28	75	29
58	171	37	72	188	40	33	177	33	48	179	36
120	358	46	123	347	47	61	323	39	80	346	47
229	683	51	248	752	53	130	684	45	144	679	52

B Lavalkali + flyveaske

Resumé af resultater

B 5 °C			B 10 °C			B 20 °C			B 30 °C		
Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]
167	50	27	98	49	23	49	55	23	32	53	20
327	95	33	194	95	30	97	106	30	62	100	25
649	192	39	340	166	36	170	180	36	108	172	31
1152	339	50	677	341	46	337	349	45	215	343	43
2304	676	67	1323	981	54	673	689	54	433	685	54

B 45 °C			B 45 °C - gradvist			B 60 °C			B 60 °C - gradvist		
Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]
15	43	16	28	48	20	10	49	16	24	52	21
34	99	26	47	96	28	23	117	27	32	86	26
56	168	31	71	168	35	33	173	35	50	176	41
121	359	47	128	336	46	62	324	44	81	338	53
232	689	58	240	672	62	129	675	49	147	684	61

D Rapid+flyveaske

D 5 °C			D 10 °C			D 20 °C			D 30 °C		
Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]
83	25	25	49	26	22	24	26	23	16	25	24
124	37	35	73	39	30	35	36	29	24	40	32
167	48	40	97	50	36	49	50	37	32	51	35
249	74	45	145	72	41	73	75	40	47	75	41
2304	675	70	940	688	64	674	680	60	481	757	66

D 45 °C			D 45 °C - gradvist			D 60 °C			D 60 °C - gradvist		
Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]
9	25	20	16	23	21	6	25	14	16	24	20
15	42	29	23	42	31	8	39	23	22	48	30
16	46	30	27	55	33	10	48	26	26	64	34
25	74	36	33	74	37	15	79	32	28	74	36
225	669	63	240	682	68	129	685	55	143	672	66

E Slagge cement

E 5 °C			E 10 °C			E 20 °C			E 30 °C		
Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]
169	50	15	98	50	17	49	50	19	32	50	22
198	58	18	122	62	19	58	60	23	38	60	27
265	78	24	146	74	22	74	77	28	47	74	30
432	127	35	265	133	35	121	124	38	77	122	38
2304	674	58	847	677	60	673	677	59	480	756	56

E 45 °C			E 45 °C - gradvist			E 60 °C			E 60 °C - gradvist		
Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]	Alder [h]	Beregnet modenhed [h]	Trykstyrke [MPa]
15	43	19	29	51	27	9	43	18	21	49	27
22	64	29	32	61	31	11	55	25	27	83	36
25	75	30	38	80	37	15	76	33	30	101	38
38	113	36	53	129	39	24	125	39	39	147	41
224	671	48	241	765	51	130	681	46	146	738	50