

Herdeteknologi – modellering av betongens temperatur- og fasthetsutvikling

Dokumentering av nye betongparametere til HETT²²



Baryalay Shah Mahmoud



Jawid Miri



Mohammad Hassan Karimi

VEILEDERE

Rein Terje Thorstensen
Tom Ivar Fredvik

Universitetet i Agder, 2023
Fakultet for teknologi og realfag
Institutt for ingeniørvitenskap



Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none"> - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse. 	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller tausehetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?
(Båndleggingsavtale må fylles ut)

JA NEI

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

JA NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Ingeniørvitenskap som en del av masterprogrammet for Byggkonstruksjon ved Universitetet i Agder (UiA). Oppgaven utgjør den avsluttende delen av emnet BYG508 og ble gjennomført i løpet av vårsemesteret 2023. Vi vil benytte anledningen til å uttrykke vår takknemlighet overfor våre veiledere i dette prosjektet. Først og fremst ønsker vi å takke vår interne veileder, Rein Terje Thorstensen ved Universitetet i Agder, samt vår eksterne veileder, Teknisk sjef Dr. Tom Ivar Fredvik ved Heidelberg Materials Sement Norge, for deres engasjement, oppfølging og ekspertise. Vi setter stor pris på deres dedikasjon, tilgjengelighet og profesjonalitet gjennom hele prosjektet.

Videre ønsker vi å rette en stor takk til laboratoriesjef Anette Gautestad og laborant Dag Erik Knutsen ved laboratoriet i Brevik. Deres hjelp og veiledning under det omfattende laboratoriearbeidet har vært uvurderlig for oss.

Vi vil også uttrykke vår takknemlighet overfor Sverre Smeplass for å ha tilgjengeliggjort oppdaterte versjoner av regnearkene som beregner betongens temperaturfølsomhet, fasthet og varmeutvikling, samt for veiledning i bruken av disse regnearkene. Vi vil også takke Heidelberg Materials Betong Norge for deres assistanse med utstøping av kubikk herdekasser på deres betongfabrikk ved Nenset.

Det er viktig å nevne at denne oppgaven har vært en utrolig lærerik opplevelse for gruppen. Gjennom forskningen, samarbeidet med industripartnere og veiledernes veiledning har vi fått verdifull innsikt i fagområdet og utviklet viktige ferdigheter. Arbeidet har utfordret oss til å utvide vår kunnskap og forbedre våre analytiske evner. Gruppen har også fått verdifull erfaring med laboratoriearbeid og anvendelse av teoretiske konsepter i en praktisk setting.

Denne oppgaven har virkelig bidratt til gruppens faglige og personlige utvikling. Gruppen er svært takknemlig for muligheten til å ha vært en del av dette prosjektet. Vi er trygge på at den kunnskapen og erfaringen vi har oppnådd gjennom dette arbeidet, vil være til stor nytte for oss i fremtidige prosjekter og karrieren som sivilingeniør innen byggkonstruksjon.

Baryalay Shah Mahmoud
Jawid Miri
Mohammad Hassan Karimi

Mai 2023
Grimstad, Norge

Summary

For many years, Heidelberg Materials Cement Norway has offered the Norwegian concrete market the curing technology software HETT97. This software is a planning tool for simulating temperature and strength development in constructions. In addition, the program considers the concrete composition, heat and strength development and conditions such as construction type, formwork types and weather conditions etc. This is crucial for proper planning of casting work, such as preventing freezing of fresh concrete in accordance with NS-EN 13670 +NA, which specifies that concrete must not freeze at temperatures below 0 °C until the achieved compressive strength in the concrete surface reaches 5 MPa. Additionally, high temperatures should be avoided in accordance with NS-EN 13670 +NA, which sets a maximum concrete temperature of 70 °C. A new version of the program, called HETT²², was released on October 25, 2022. It features a completely new user interface, enhanced functions, and an updated database for various types of concrete.

To fully utilize the program's benefits, it is important to obtain the necessary documentation for determining the property functions of a concrete composition, measuring temperature development in an insulated box, and analyzing strength development at different temperatures. The concrete database in HETT²² aims to expand with concretes that meet the various low-carbon classes defined in the Norwegian Concrete Association publication no. 37, as these concrete types are increasingly in demand for projects.

The objective of this master's thesis is to investigate how different binders affect concrete's temperature sensitivity, strength, and heat development. Extensive laboratory work has been conducted, consisting of 19 recipes with different cement types, resistance classes, and varying fly ash and silicafume content. These results were implemented into HETT²² software to expand the database. Furthermore, HETT²², with its new concrete compositions, will be used to simulate a chosen construction type. For each recipe, a 15-liter curing box was cast following NS 3657. To verify the results from the 15-liter curing boxes, two 1m³ curing boxes were also cast according to the Norwegian Road Administration's "Bruprojektering" N400.

The findings of this master's project revealed that several factors must be considered when examining concrete's temperature sensitivity, strength, and heat development. Key factors include the amount of silicafume and fly ash content, durability classes, low-carbon classes, and cement types.

Among the different categories, it was observed that an increasing dosage of fly ash leads to a reduction in concrete's temperature sensitivity, temperature and heat development, as well as a decrease in strength development up to 28 days at 5 and 20 °C. However, at 35 °C, the results show the opposite pattern.

Innholdsfortegnelse

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	i
Publiseringsavtale.....	ii
Forord.....	iii
Summary	iv
Figurliste.....	x
Tabelliste	xiv
1. Innledning	1
2. Samfunnsperspektiv.....	4
3. Kunnskapsbakgrunn	5
3.1 Sement.....	5
3.1.2 Klassifisering av sement	5
3.1.3 Kjemisk sammensetning.....	6
3.1.4 Spesifikk overflateareal	7
3.1.5 Sementhydratisering	8
3.1.6 Hydratiseringshastighet.....	8
3.1.7 Norsk produsert sement.....	10
3.2 Pozzolaner	10
3.2.1 Flygeaske	10
3.2.2 Silikastøv	11
3.3 Bestandighetsklasse	12
3.3.1 Masseforhold.....	13
3.4 Lavkarbonbetong.....	15
3.5 Betongens ulike faser	16
3.6 Varmeutvikling i betong	17
3.6.2 Måling av varmeutvikling	19
3.6.3 Adiabatisk temperaturutvikling.....	21
3.7 Hastighetsfunksjon.....	21
3.8 Modenhetsprinsippet.....	22
3.8.1 Bruk av modenhetsprinsippet	22
3.9 Fasthetsutvikling.....	24
3.10 HETT ²² simulering av herdeforløp	24
4. Forskerspørsmål.....	26
4.1 Begrensninger.....	26

5.	Case og Materialer	27
5.1	Case	27
5.2	Materialer	28
6.	Metode.....	29
6.1	Litteraturstudium	29
6.2	Forsøksplan.....	30
6.3	Plan for trykktesting	33
6.4	Fuktmåling.....	34
6.5	Blandingsprosedyre	34
6.6	Synkmål/Utbredelse	34
6.7	Luftmåling.....	35
6.8	Utstøpingsprosedyre	36
6.8.1	Utstøping av terninger	36
6.8.2	Utstøping av herdekasse	37
6.8.3	Utstøping av kubikk kasse	38
6.9	Varmefunksjon	38
6.10	Fasthetsfunksjon	39
6.11	Aktiveringsenergi.....	40
6.12	Avbindingstid.....	42
6.13	HETT ²² simulering	43
6.14	Kvalitetssikring av utførelse	44
7.	Resultat	45
7.1	Fersk betongegenskaper	45
7.2	Temperaturfølsomhet	46
7.2.1	Sementtype	46
7.2.2	Flygeaske	47
7.2.3	Silikastøv	48
7.2.4	Bestandighetsklasser	50
7.2.5	Lavkarbonbetong.....	51
7.3	Fasthetsutvikling.....	55
7.3.1	Sementtype	55
7.3.2	Flygeaske	56
7.3.3	Silikastøv	56
7.3.4	Bestandighetsklasse	57

7.3.5 Lavkarbonbetong.....	58
7.4 Varmeutvikling	61
7.4.1 Sementtype	61
7.4.2 Flygeaske	63
7.4.3 Silikastøv	64
7.4.4 Bestandighetsklasse	66
7.4.5 Lavkarbonklasser	68
7.4.6: Resultat fra kubikk kasse forsøk.....	73
7.5 Herdeteknologiske parametere til HETT ²²	74
8. Diskusjon.....	76
8.1 Egenskaper for fersk betong	76
8.2 Temperaturfølsomhet	76
8.2.1 Sementtype	76
8.2.2 Flygeaske	79
8.2.3 Silikastøv	81
8.2.4 Bestandighetsklasser	84
8.2.5 Lavkarbonbetong.....	86
8.3 Fasthetsutvikling.....	92
8.3.1 Sementtype	92
8.3.2 Flygeaske	95
8.3.3 Silikastøv	97
8.3.4 Bestandighetsklasse	100
8.3.5 Lavkarbonbetong.....	103
8.4 Varmeutvikling	113
8.4.1 Sementtype	113
8.4.2 Flygeaske	115
8.4.3 Silikastøv	117
8.4.4 Bestandighetsklasse	118
8.4.5 Lavkarbonbetong.....	120
8.4.6 Kubikk kasse forsøk	128
8.5 HETT ²² simulering	131
9. Konklusjon.....	135
9.1 Temperaturfølsomhet, fasthets- og varmeutvikling	135
9.1.1 Hvordan er påvirkningen av ulike sementtyper	135

9.1.2	Hvordan er påvirkningen av flygeaske	135
9.1.3	Hvordan er påvirkningen av silikastøv.....	135
9.1.4	Hvordan er påvirkningen av bestandighetsklasser	136
9.1.5	Hvordan er påvirkningen av ulike lavkarbonbetonger	136
9.2	Hvordan påvirker ulike bindemidler betongens temperaturfølsomhet, fasthets- og varmetviking?	137
10.	Anbefalinger	138
11.	Referanser	139
12.	Vedlegg.....	141
12.1	Betongparametere til HETT ²²	141
12.2	Branel resept	142
12.3	Skjermbilder fra regneark Excel arkene for hver betongtype	151
12.3.1	STD FA - B45 - M40 REF	151
12.3.2	STD FA - B45 - M40 REF REP	153
12.3.3	STD FA - B35 - M45 REF	156
12.3.4	STD FA - B30 - M60 REF	159
12.3.5	STD FA - B30 - M90 - REF	161
12.3.6	IND B45 M40 REF.....	163
12.3.7	STD FA - B30 - M90 - 35%FA	165
12.3.8	STD FA - B30 - M90 - 35%FA - 11%S	167
12.3.9	STD FA - B45 - M40 - 35%FA	169
12.3.10	STD FA - B45 - M40 - 25%FA	169
12.3.11	STD FA - B30 - M60 - 35%FA	172
12.3.12	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 4%S	174
12.3.13	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 8%S	176
12.3.14	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 11%S	178
12.3.15	ANL FA - B45 - M40 REF	180
12.3.16	STD FA - B45 - M40 - 30%FA	182
12.3.17	STD FA - B45 - M40 - 35%FA	184
12.3.18	STD FA - B45 - M40 - 35%FA - 11%S	186
12.3.19	STD FA - B35 - M45 - 35%FA - 11%S	188
12.4	Kubikk herdekasse regneark resultatene	190
12.4.1	STD FA – B45 – M40 REF.....	190
12.4.2	STD FA – B45 – M40 – 35%FA REF.....	190

12.5 Aktiveringsenergi ved automatisk tilpasning av A og B	192
12.6 Trykkfasthet resultater med skalerende farge	194
12.7 Produktdatablad og analyserapport.....	195

Figurliste

Figur 1.1: Beskrivelse av oppgavens oppbygging i form av flytskjema.	2
Figur 3.1: Hydratiseringshastighet for de rene hovedmineralene i sement. Hentet fra [12].	9
Figur 3.2: Varmeutvikling i forskjellige temperaturer. Gjelder for ren Portlandsement, masseforhold 0,4. Hentet fra [12].	9
Figur 3.3: Sammenhengen mellom fasthetsklasse og bestandighetsklasse for normalbetong [22]. ...	14
Figur 3.4: Regional tilgjengelighet av lavkarbonbetong. Lavkarbonbetong er lettere tilgjengelig i sone 1 enn sone 2 [24].	16
Figur 3.5: Prinsippskisse av betongens ulike faser og tilsvarende temperaturutvikling [25].	17
Figur 3.6: Varmeutvikling for rene Portlandsementer med forskjellig finhetsgrad. Figuren gjelder sementlim med masseforhold 0,40, i 20 °C. Hentet fra [12].	18
Figur 3.7: Varmeutviklingens hovedfaser for sementpasta [17].	19
Figur 3.8: Varmefunksjon graf [27].	20
Figur 3.9: Fasthetsutvikling som funksjon av tid av en B45-M40 betong ved tre temperaturnivåer. ...	23
Figur 3.10: Fasthetsutvikling som funksjon av modenhet av B45-M40 betong.	23
Figur 6.1. Flytskjema med oppsett av metodekapittelet.	29
Figur 6.2: Illustrasjon av synkmål utført på laboratoriet.	35
Figur 6.3: Luftmålingsutstyr.	36
Figur 6.4: 15 L herdekasse.	37
Figur 6.5: 1m ³ herdekasse utstøping ved Nenset fabrikk.	38
Figur 6.6: Regneark for beregning av varmetutvikling.	39
Figur 6.7: Regneark for beregning av fasthetsfunksjon benyttet for å finne parametrene f_{c28} , s og t_0 . Eksempel på betong uten tilsetningsmateriale og god tilpasning av FIB-modellen for hele herdeforløpet.	40
Figur 6.8: Regneark for beregning av fasthetsfunksjon benyttet for å finne parametrene f_{c28} , s og t_0 . Eksempel på betong med 35% FA og dårlig tilpasning av FIB-modellen etter 40 MPa.	40
Figur 6.9: Aktiveringsenergi regneark hvor A og B er beregnet ved automatisk tilpasning.	41
Figur 6.10: Aktiveringsenergi regneark hvor A og B er beregnet ved manuell tilpasning.	42
Figur 6.11: Avbindingstid ved 12 kJ-metoden.	43
Figur 6.12: Avbindingstid ved 2°C-metoden.	43
Figur 8.1: A konstant for ulike sementtyper.	77
Figur 8.2: B konstant for ulike sementtyper.	77
Figur 8.3: Aktiveringsenergi for ulike sementtyper.	78
Figur 8.4: Hastighetsfunksjon for ulike sementtyper.	78
Figur 8.5: A konstant for betong med ulike mengde flygeaskeinnhold gitt i prosent (%).	79
Figur 8.6: B konstant for betong med ulike mengde flygeaskeinnhold gitt i prosent (%).	79
Figur 8.7: Aktiveringsenergi for betong med ulike mengde flygeaskeinnhold gitt i prosent (%).	80
Figur 8.8: Hastighetsfunksjon for betong med ulike mengde flygeaskeinnhold gitt i prosent (%).	81
Figur 8.9: A konstant for betong med ulike mengde silikastøvinhold gitt i prosent (%).	82
Figur 8.10: B konstant for betong med ulike mengde silikastøvinhold gitt i prosent (%).	82
Figur 8.11: Aktiveringsenergi for betong med ulike mengde silikastøvinhold gitt i prosent (%).	83
Figur 8.12: Hastighetsfunksjon for betong med ulike mengde silikastøvinhold gitt i prosent (%).	83
Figur 8.13: A konstant for betong med ulike bestandighetsklasser.	84
Figur 8.14: B konstant for betong med ulike bestandighetsklasser.	84

Figur 8.15: Aktiveringsenergi for betong med ulike bestandighetsklasser.....	85
Figur 8.16: Hastighetsfunksjon for betong med ulike bestandighetsklasser.....	85
Figur 8.17: A konstant for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	86
Figur 8.18: B konstant for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	86
Figur 8.19: Aktiveringsenergi for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	87
Figur 8.20: Hastighetsfunksjon for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	88
Figur 8.21: Aktiveringsenergi for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	88
Figur 8.22: Hastighetsfunksjon for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	89
Figur 8.23: Aktiveringsenergi for B35 M45 betong med ulike lavkarbonklasser.....	89
Figur 8.24: Hastighetsfunksjon for B35 M45 betong med ulike lavkarbonklasser.....	90
Figur 8.25: Konstant A for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	90
Figur 8.26: Konstant B for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	91
Figur 8.27: Aktiveringsenergi for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	91
Figur 8.28: Hastighetsfunksjon for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	92
Figur 8.29: Trykkfasthet resultater for STD FA, IND og ANL FA ved ulike temperaturer og tider.....	92
Figur 8.30: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for betonger med ulike sementtyper.....	93
Figur 8.31: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med ulike sementtyper.....	94
Figur 8.32: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med ulike sementtyper.....	94
Figur 8.33: Tykkfasthetsresultater for flygeaske serien ved ulike temperaturer og tider.....	95
Figur 8.34: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for betonger med ulike flygeaskeinnhold.....	96
Figur 8.35: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med flygeaskeinnhold.....	96
Figur 8.36: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med flygeaskeinnhold.....	97
Figur 8.37: Tykkfasthetsresultater for silikastøv serien ved ulike temperaturer og tider.....	97
Figur 8.38: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for betonger med ulike silikastøvinnhold.....	98
Figur 8.39: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med silikastøvinnhold.....	99
Figur 8.40: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med silikastøvinnhold.....	99
Figur 8.41: Tykkfasthetsresultater for bestandighetsklasse serien ved ulike temperaturer og tider.....	100
Figur 8.42: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for betonger med ulike bestandighetsklasser.....	101
Figur 8.43: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med ulike bestandighetsklasser.....	102
Figur 8.44: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med ulike bestandighetsklasser.....	102
Figur 8.45: Tykkfasthetsresultater for lavkarbonklasse M90 serien ved ulike temperaturer og tider.....	103

Figur 8.46: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasse	103
Figur 8.47: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	104
Figur 8.48:28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	104
Figur 8.49: Tykkfasthetsresultater for lavkarbonklasse M60 serien ved ulike temperaturer og tider.	105
Figur 8.50: Figur 8.: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.	106
Figur 8.51: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	107
Figur 8.52: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	107
Figur 8.53: Tykkfasthetsresultater for lavkarbonklasse M45 serien ved ulike temperaturer og tider.	108
Figur 8.54: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasse	108
Figur 8.55: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	109
Figur 8.56: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	110
Figur 8.57: Tykkfasthetsresultater for lavkarbonklasse M40 serien ved ulike temperaturer og tider.	110
Figur 8.58: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	111
Figur 8.59: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	112
Figur 8.60: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	112
Figur 8.61: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av betonger med ulike sementtyper.....	113
Figur 8.62: Varmeutvikling av betonger med ulike sementtyper.....	114
Figur 8.63: Figur 8.: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for betonger med ulike sementtyper.	115
Figur 8.64: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av betonger med økende flygeaske.....	115
Figur 8.65: Varmeutvikling av betonger med økende flygeaske.....	116
Figur 8.66: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for betonger med økende flygeaskeinnhold.	116
Figur 8.67: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av betonger med økende silikastøvinnhold.	117
Figur 8.68: Varmeutvikling av betonger med økende silikastøvinnhold.....	118
Figur 8.69: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for betonger med økende silikastøvinnhold.....	118
Figur 8.70: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av betonger med ulike bestandighetsklasser. ...	119
Figur 8.71: Varmeutvikling av betonger med ulike bestandighetsklasser.	120

Figur 8.72: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for betonger med ulike bestandighetsklasser.	120
Figur 8.73: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.	121
Figur 8.74: Varmeutvikling av B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.	121
Figur 8.75: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.	122
Figur 8.76: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.	123
Figur 8.77: Varmeutvikling av B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.	123
Figur 8.78: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.	124
Figur 8.79: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av B35-M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.	125
Figur 8.80: Varmeutvikling av B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.	125
Figur 8.81: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.	126
Figur 8.82: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av B45-M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.	126
Figur 8.83: Varmeutvikling av B45 M40 betongkvalitet med ulike lavkarbonklasser.	127
Figur 8.84: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.	127
Figur 8.85: Temperaturmålinger av B45 M40 betong i 1m ³ og 15 L herdekasse.	128
Figur 8.86: Varmeutvikling av B45 M40 betong i 1m ³ og 15 L herdekasse.	129
Figur 8.87: Temperaturmålinger av B45 M40 30%FA betong i 1m ³ og 15 L herdekasse.	129
Figur 8.88: Varmeutvikling av B45 M40 30%FA betong i 1m ³ og 15 L herdekasse.	130
Figur 8.89: Temperaturmålinger av B45 M40 35%FA betong i 1m ³ og 15 L herdekasse.	130
Figur 8.90: Varmeutvikling av B45 M40 35%FA betong i 1m ³ og 15 L herdekasse.	131
Figur 8.91: HETT ²² simulering av en 25 cm tykk vegg ved luft temperatur på 20 °C, av lavkarbonbetonger med betongkvalitet B45 M40.	133
Figur 8.92: HETT ²² simulering av en 25 cm tykk vegg ved luft temperatur på 5 °C av lavkarbonbetonger med betongkvalitet B45 M40.	134

Tabelliste

Tabell 3.1: Utdrag av tabell 1 fra NS-EN 197-1 [10].	5
Tabell 3.2: Mekaniske og fysiske krav gitt som karakteristiske verdier [10].	6
Tabell 3.3: Andre egenskaper som brukes til å klassifisere sement [10].	6
Tabell 3.4: Sammensetning av kjemikalier i Portlandsement [12].	7
Tabell 3.5: De fire hovedmineralene i Portlandsement [12].	7
Tabell 3.6: Bestandighetsklasser med tilhørende eksponeringsklasser, samt materialkrav. Hentet fra [20].	12
Tabell 3.7: Krav til mengde flygeaske og silikastøv [21].	13
Tabell 3.8: K-verdi ved innblanding av flygeaske og silikastøv.	14
Tabell 3.9: Grenseverdier for klimagassutslipp for de fire lavkarbonklassene gitt som kg CO ₂ -ekvivalenter per kubikkmeter betong [24].	15
Tabell 3.10: CO ₂ -verdier for råmaterialer til beregning av A1.	16
Tabell 3.11: Gjennomsnittsverdiene for A2 og A3 modulene benyttet i dette prosjektet.	16
Tabell 3.12: varmeutvikling fra hydrering av klinkermineraler [17].	18
Tabell 6.1: Nøkkel søkeord brukt i litteraturstudiet.	29
Tabell 6.2: Bindemiddelsammensetninger med utført blandingsdato.	30
Tabell 6.3: Betonger med tilhørende lavkarbonklasser.	31
Tabell 6.4: Reseptene benyttet i dette prosjektet	31
Tabell 6.5: Gruppeinndeling av betongtypene.	32
Tabell 6.6: Blandesats for blanding nr. 1. Rødt tall indikerer tidligfasthet terninger.	33
Tabell 6.7: Blandesats for blanding nr. 2. Rødt tall indikerer tidligfasthet terninger.	33
Tabell 7.1: Fersk betongegenskaper av 19 resepter og begge blandesatsene.	45
Tabell 7.2: A og B konstanter for resept nr. 1, 6 og 15.	46
Tabell 7.3: Aktiveringsenergi for resept nr. 1, 6 og 15.	46
Tabell 7.4: Hastighetsfunksjon for sementtyper.	47
Tabell 7.5: A og B konstanter for betong med økende flygeaskeinnhold gitt i prosent.	47
Tabell 7.6: Aktiveringsenergi for betonger med økende flygeaskeinnhold.	48
Tabell 7.7: Hastighetsfunksjon for betonger med økende flygeaskeinnhold.	48
Tabell 7.8: A og B konstanter for betonger med økende silikastøvinnhold gitt i prosent.	48
Tabell 7.9: Aktiveringsenergi for betonger med økende silikastøvinnhold.	49
Tabell 7.10: Hastighetsfunksjon for betonger med økende silikastøvinnhold.	49
Tabell 7.11: A og B konstanter for betonger ved ulike bestandighetsklasser.	50
Tabell 7.12: Aktiveringsenergi for betonger ved ulike bestandighetsklasser.	50
Tabell 7.13: Hastighetsfunksjon for betonger ved ulike bestandighetsklasser.	50
Tabell 7.14: A og B konstanter for lavkarbonklasse (B30-M90 betong).	51
Tabell 7.15: Aktiveringsenergi for resept nr. 5, 7 og 8.	51
Tabell 7.16: Hastighetsfunksjon for lavkarbonklasse (B30-M90 betong).	51
Tabell 7.17: A og B konstanter for lavkarbonklasse (B30-M60 betong).	52
Tabell 7.18: Aktiveringsenergi for resept nr. 4 og 11.	52
Tabell 7.19: Hastighetsfunksjon for lavkarbonklasse (B30-M60 betong).	52
Tabell 7.20: A og B konstanter for lavkarbonklasse (B35-M45 betong).	53
Tabell 7.21: Aktiveringsenergi for lavkarbonklasse (B35-M45 betong).	53
Tabell 7.22: Hastighetsfunksjon for lavkarbonklasse (B35-M45 betong).	53

Tabell 7.23: A og B konstanter for lavkarbonklasse (B45-M40 betong).....	54
Tabell 7.24: Aktiveringsenergi for lavkarbonklasse (B45-M40 betong).	54
Tabell 7.25: Hastighetsfunksjon for lavkarbonklasse (B45-M40 betong).	54
Tabell 7.26: Trykkfasthet for betonger med ulike sementtyper, testet ved ulike temperaturer og tider.	55
Tabell 7.27: $f_{c28, s}$ og t_0 beregnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for sementserien.....	55
Tabell 7.28: Trykkfasthet for betonger med ulike flygeaskeinnhold ved ulike temperaturer °C og tider.	56
Tabell 7.29: $f_{c28, s}$ og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for flygeaskeserien.....	56
Tabell 7.30: Trykkfasthet for betonger med ulike silikastøvinnhold ved ulike temperaturer °C og tider.	57
Tabell 7.31: $f_{c28, s}$ og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for silikastøvserien.....	57
Tabell 7.32: Trykkfasthet for betonger med ulike bestandighetsklasser ved ulike temperaturer °C og tider.	57
Tabell 7.33: $f_{c28, s}$ og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for bestandighetserien.....	58
Tabell 7.34: Trykkfasthet for betonger med ulike lavkarbonklasser ved ulike temperaturer °C og tider.	58
Tabell 7.35: $f_{c28, s}$ og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for B45 M40 lavkarbonbetonger.....	59
Tabell 7.36: Trykkfasthet for betonger med ulike lavkarbonklasse B og Pluss ved ulike temperaturer °C og tider.....	59
Tabell 7.37: $f_{c28, s}$ og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for B35 M45 lavkarbonbetonger.....	59
Tabell 7.38: Trykkfasthet for betonger med lavkarbonklassene B og A ved ulike temperaturer °C og tider.	60
Tabell 7.39: $f_{c28, s}$ og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for B30 M60 lavkarbonbetonger.....	60
Tabell 7.40: Trykkfasthet for betonger med lavkarbon A (REF), A (35% FA) og Pluss ved ulike temperaturer °C og tider.....	60
Tabell 7.41: $f_{c28, s}$ og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark.....	61
Tabell 7.42: Varmefunksjonsparametere for betonger med ulike sementtyper.	61
Tabell 7.43: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for betonger med ulike sementtyper.	62
Tabell 7.44: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for betonger med ulike sementtyper.....	62
Tabell 7.45: Tabellert verdi av varmeutvikling for betonger med ulike sementtyper.	62
Tabell 7.46: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for betonger med ulike sementtyper.	62
Tabell 7.47: Varmefunksjonsparametere for betonger med økende flygeaskeinnhold.	63
Tabell 7.48: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for betonger med økende flygeaskeinnhold.	63
Tabell 7.49: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for betonger med økende flygeaskeinnhold.....	63
Tabell 7.50: Tabellert verdi av varmeutvikling for betonger med økende flygeaskeinnhold.	64

Tabell 7.51: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for betonger med økende flygeaskeinnhold.	64
Tabell 7.52: Varmefunksjonsparametere for betonger med økende silikastøv.....	65
Tabell 7.53: Maks adiabatisk og målt temperatur med tilhørende tid for betonger med økende silikastøvinnhold.....	65
Tabell 7.54: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for betonger med økende silikastøvinnhold.	65
Tabell 7.55: Tabellert verdi av varmeutvikling for betonger med økende silikastøvinnhold.....	65
Tabell 7.56: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for betonger med økende silikastøvinnhold.	66
Tabell 7.57: Varmefunksjonsparametere for betonger med ulike bestandighetsklasser.....	66
Tabell 7.58: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for betonger med ulike bestandighetsklasser.....	67
Tabell 7.59: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for betonger med ulike bestandighetsklasser.....	67
Tabell 7.60: Tabellert verdi av varmeutvikling for betonger med ulike bestandighetsklasser.....	67
Tabell 7.61: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for betonger med ulike bestandighetsklasser.	67
Tabell 7.62: Varmefunksjonsparametere for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.	68
Tabell 7.63: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	68
Tabell 7.64: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.	68
Tabell 7.65: Tabellert verdi av varmeutvikling for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser. ...	68
Tabell 7.66: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	69
Tabell 7.67: Varmefunksjonsparametere for B30-M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	69
Tabell 7.68: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for B30-M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	69
Tabell 7.69: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for B30-M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.	70
Tabell 7.70: Tabellert verdi av varmeutvikling for B30-M60 betonger med ulike lavkarbonklasser. ...	70
Tabell 7.71: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for B30-M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	70
Tabell 7.72: Varmefunksjonsparametere for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.	71
Tabell 7.73: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	71
Tabell 7.74: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.	71
Tabell 7.75: Tabellert verdi av varmeutvikling for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser. ...	71
Tabell 7.76: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	72
Tabell 7.77: Varmefunksjonsparametere for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.	72
Tabell 7.78: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	72
Tabell 7.79: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.	72
Tabell 7.80: Tabellert verdi av varmeutvikling for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser. ...	73

Tabell 7.81: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.....	73
Tabell 7.82: Varmefunksjonsparametere av 1m ³ herdekasseforsøk.	73
Tabell 7.83: Temperaturfølsomhet parametere til HETT ²²	74
Tabell 7.84: Fasthetsfunksjon parametere til HETT ²²	74
Tabell 7.85: Varmefunksjon parametere til HETT ²²	75
Tabell 8.1: resultat fra HETT ²² simulering ved 20 °C lufttemperatur.....	132
Tabell 8.2: Resultat fra HETT ²² simulering ved 5 °C lufttemperatur.....	134

1. Innledning

Bygg- og anleggsbransjen står overfor en stadig økende etterspørsel etter bærekraftige løsninger som kan bidra til reduksjon av klimagassutslipp. Betong med lavt klimagassutslipp spiller en sentral rolle i denne omstillingen. For å imøtekomme kravene til ytelse og bærekraft er det nødvendig med pålitelig og oppdatert informasjon om de ulike egenskapene til betongmaterialer, spesielt deres temperaturfølsomhet, fasthets- og varmeutvikling. En grundig forståelse av disse egenskapene er viktig for å sikre at konstruksjoner oppfyller de nødvendige kravene til både kvalitet og bærekraft i denne sektoren.

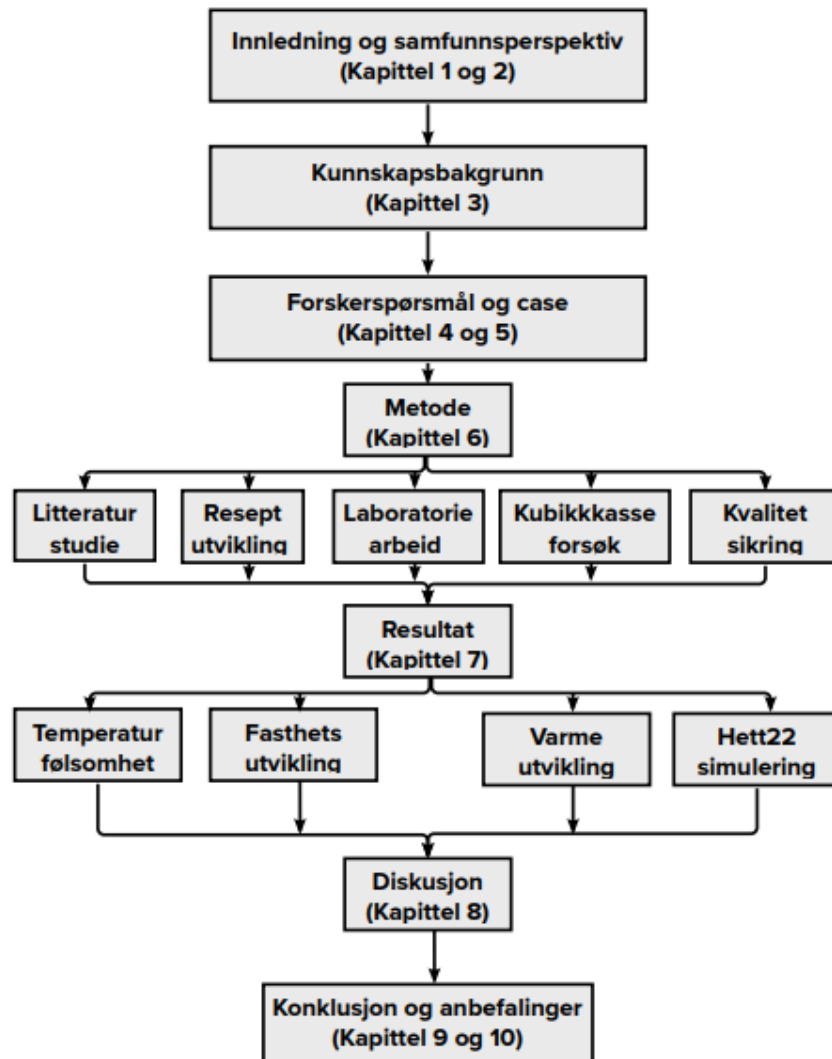
Heidelberg Materials Sement Norge (HM Sement Norge), tidligere Norcem, som den eneste sementprodusenten i Norge har en betydelig innvirkning på utviklingen av betongindustrien. HM Sement Norge har i flere år tilbudt det norske betongmarkedet et herdeteknologisk simuleringsprogram kalt HETT97. HETT97 er et program for simulering av betongens temperatur- og fasthetsutvikling, og brukes ved planlegging av støping av betong. Økende ønske for bruk av lavkarbonbetong de siste årene gjør det stadig viktigere å ha pålitelige simuleringsverktøy for å kunne forutsi betongenes egenskapsutvikling. Derfor har HM Sement Norge utviklet en oppdatert versjon av HETT97, kalt HETT²², og ønsker å oppdatere databasen med nye betongtyper [1].

Hovedformålet med dette prosjektet er å bidra til oppdateringen av betongdatabasen i HETT²², spesielt med hensyn til betonger med redusert klimagassutslipp. Oppdateringen av betongdatabasen vil kunne gi HM Sement og bygg- og anleggsbransjen som helhet pålitelig og oppdatert informasjon om hvordan disse parameterne påvirker betongens temperaturfølsomhet, fasthets- og varmeutvikling.

Dette prosjektet er et omfattende laboratoriearbeid for å fremskaffe nødvendig dokumentasjon for å kunne bestemme egenskapsfunksjonene til en betongsammensetning. Det vil bli utført grundige eksperimenter for å måle og sammenligne temperaturfølsomheten, fasthets- og varmeutvikling av betongsammensetningene. De innsamlede dataene vil danne grunnlaget for oppdateringen av betongdatabasen i HETT²².

Gjennom dette prosjektet håper vi å styrke kunnskapsgrunnlaget for HM Sement Norge og bygg- og anleggsbransjen, og danne grunnlaget for å planlegge støpearbeid av betong med redusert klimagassutslipp på en mer effektiv måte. Ved oppdatering av betongdatabasen i HETT²² med nye betongsammensetninger, kan vi sikre oss at betongmarkedet har tilgang til riktig og pålitelig informasjon for å planlegge støpearbeid på en mer effektiv og riktig måte, samt oppnå mer bærekraftige konstruksjoner.

Oppgavens oppbygging er i henhold til rapportmalen for gitt av Universitetet i Agder. Figur 1.1 viser oppgavens oppbygging.



Figur 1.1: Beskrivelse av oppgavens oppbygging i form av flytskjema.

Kapittel inndeling i oppgaven er som følge:

Kapittel 1: Innledning

Presenterer oppgavens bakgrunn, problemområde, samt oppbygging av oppgaven.

Kapittel 2: Samfunnsperspektiv

Plasserer oppgaven i en bredere perspektiv.

Kapittel 3: kunnskapsbakgrunn

Tilfører kunnskap som er nødvendig for å besvare oppgavens problemstilling.

Kapittel 4: Forskerspørsmål

Presenterer oppgavens forskerspørsmål med tilhørende delspørsmål, samt oppgavens avgrensninger.

Kapittel 5: Case

Utdyper forskerspørsmålet og beskriver oppgaven i en mer detaljert måte.

Kapittel 6: Metode

Forklarer de forskjellige metodene som er benyttet for å svare på oppgavens problemstilling.

Kapittel 7: Resultat

Presenterer resultatene fått fra laboratoriearbeid og beregninger, samt HETT²² simulering.

Kapittel 8: Diskusjon

Drøfter resultatene med samme oppsett som resultat kapitlet.

Kapittel 9: Konklusjon

Oppsummerer de viktigste funnene i lys av forskerspørsmålet.

Kapittel 10: Anbefalinger

Gir anbefalinger til fremtidig arbeid av forholdene som var begrenset i denne oppgaven.

Kapittel 11: Referanser

En oversikt over referanser benyttet i denne oppgaven.

Kapittel 12: Vedlegg

Inneholder dokumenter og skjermbilde av regnearkene benyttet i denne oppgaven.

2. Samfunnsperspektiv

Bærekraftig utvikling har vært et sentralt tema i offentlige diskusjoner både nasjonalt og internasjonalt i lang tid. Klima- og miljøproblemer som er forårsaket av menneskelig aktivitet, har ført til økt bekymring globalt, og det har blitt stadig mer nødvendig å implementere tiltak som kan snu denne risikable trenden. Organisasjoner tilknyttet FN-systemet er uavhengige internasjonale organisasjoner som spiller en viktig rolle på den internasjonale arenaen. Norge er blant landene som har forpliktet seg gjennom Parisavtalen og nasjonalt klimaforlik til å redusere klimagassutslippene og energiforbruket. Parisavtalen tar for seg viktige aspekter som begrensning av global oppvarming til 1,5 °C, og det er mål om å nå toppen av klimagassutslippene innen 2025 og redusere dem med 43% innen 2030 [2, 3].

Betong er det mest brukte byggematerialet globalt og brukes i større mengder enn noen andre menneskeskapte materialer [4]. Hvert år produseres det rundt 4,4 millioner m³ betong i Norge, hvor sementen alene utgjør omtrent 2 millioner tonn [5]. På globalt nivå ble det produsert 4,2 milliarder tonn sement i 2016 [6]. Produksjonen av sement fører til store mengder CO₂-utslipp, i tillegg til utslippene fra armeringsproduksjon og transport. Med økende fokus på miljøet er det nødvendig å øke bruken av alternative materialer som erstatning for sement, som eksempel flygeaske og silikastøv. Ved å erstatte sement med alternative materialer som silikastøv og flygeaske, bidrar det til å redusere klimagassutslipp til betong og øke bestandighet [7].

Utforskningen av ulike bindemidlers innvirkning på betongens temperaturfølsomhet, styrke og varmeutvikling gir et verdifullt bidrag til betongindustriens fremtidige vekst. Dette danner grunnlaget for den oppdaterte versjonen av herdeteknologiprogrammet HETT²². Tidligere studier har imidlertid ikke på en overbevisende måte undersøkt de grunnleggende parameterne som skal inkluderes i HETT²², noe som gjør dette forskningsområdet spennende. Denne forskningen gir muligheten til å utvikle de teknologiske parametrene som skal implementeres i HETT²², og dermed bidra til bedre metoder for bruk av teknologiske betonger med reduserte CO₂-utslipp.

3. Kunnskapsbakgrunn

3.1 Sement

Sement er et finmalt mineralpulver og kommer vanligvis i fargen grå. Kalkstein, leire og mergel er de tre viktigste råvarene for å lage sement. Sand, grus og hard stein blir kombinert for å lage betong ved hjelp av sement og vann som bindemiddel. Sement kan brukes både under vann og på land. For at sementapplikasjonen skal oppnå nødvendig stabilitet, pålitelighet og bearbeidbarhet, er kvalitetene standardisert [8, 9].

Tidlig og endelig styrke, samt sammensetningen av sement, brukes til å kategorisere ulike typer sement. I tillegg til sementer som er laget utelukkende av klinker, finnes det også komposittsementer der noen klinker er erstattet med forskjellige råmaterialer som for eksempel flygeaske, knust slagg eller kalkstein. Bruk av alternative råvarer kan bidra til å spare naturressurser og redusere CO₂-utslipp, ettersom produksjon av klinker er energikrevende og resulterer i betydelige mengder CO₂-utslipp. Valg av ulike typer sement med forskjellig sammensetning avhenger av bruksområdet. Tilsetningsstoffer kan også brukes for å modifisere sementegenskapene [9].

3.1.2 Klassifisering av sement

I NS-EN 197-1 er kravene til sementens sammensetning, spesifikasjoner og samsvar listet opp. Det finnes flere måter å klassifisere sement på, hvor de samlet gir en god beskrivelse av sement og dens egenskaper. NS-EN 197-1 klassifiserer sement i henhold til:

- Sementtype
- Mekaniske og fysiske egenskaper, som trykkfasthet, volumbestandighet og begynnende størkning.
- Andre spesifikke egenskaper eller innhold.

NS-EN 197-1 deler sementer i 27 forskjellige typer i familien av «ordinære sementer». Disse sementtypene deles igjen i hovedtypene CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV og CEM V. De to sistnevnte typene selges ikke i Norge i dag. I dette prosjektet benyttes det tre sementtyper som tilhører typene CEM I, CEM II, som beskrevet i delkapittel 3.1.7. Disse sementtypene med tilhørende bestanddeler presenteres i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Utdrag av tabell 1 fra NS-EN 197-1 [10].

Hoved -typer	Produktnotasjon		Sammensetning (andel etter masse %)				
			Hovedbestanddeler				Tilleggs- bestanddeler
			Klinker	Masovn- slag	Silika- støv	Flyge- aske	
CEM I	Portland sement	CEM I	95-100	-	-	-	0-5
CEM II	Portland- flygeaske sement	CEM II/A-V	80-94	-	-	6-20	
	Portland- blandingssement	CEM II/B-M	65-79		21-35		

I tillegg til sementtype blir sement også klassifisert basert på mekaniske og fysiske egenskaper. Tabell 3.2 viser krav til fysiske og mekaniske egenskaper i henhold til NS-EN 197-1. Fasthetsklassene er

definert i samsvar med prøveopplegget gitt i NS-EN 196-1, der en standardisert mørtel med masseforhold 0,5 brukes. Kravene til begynnende størkning og volumbestandighet blir målt i henhold til NS-EN 193-3. Fasthetsklassene er delt inn i tre kategorier: høy tidligfasthet, normal tidligfasthet og lav tidligfasthet, som angis med bokstavene R, N og L.

Tabell 3.2: Mekaniske og fysiske krav gitt som karakteristiske verdier [10].

Fasthets- klasse	Trykkfasthet (MPa)			Begynnende størkning (min)	Volumbestandighet (mm)
	Tidligfasthet		Standardfasthet		
	2 døgn	7 døgn			
32,5 L	-	≥ 12	≥ 32,5 ≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	-	≥ 16			
32,5 R	≥ 10	-			
42,5 L	-	≥ 16	≥ 42,5 ≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10	-			
42,5 R	≥ 20	-			
52,5 L	≥ 10	-	≥ 52,5 -	≥ 45	
52,5 N	≥ 20	-			
52,5 R	≥ 30	-			

Noen ganger ønskes det en mer spesifikk oversikt over sementens egenskaper enn det som gis i tabellene over. Derfor oppgis det også blant annet tidligfasthet etter to døgn og andre egenskaper nevnt i NS-EN 197-1, nevnt i tabell 3.3. De tre siste benevnelsene i tabellen, (S), (V) og (L), gjelder kun for blandingssementer i klassen CEM II.

Tabell 3.3: Andre egenskaper som brukes til å klassifisere sement [10].

Benevnelse	Egenskap
L	Lav tidligfasthet
N	Normal tidligfasthet
R	Høy tidligfasthet
RR	Ekstra høy tidligfasthet
LH	Lavvarmesement
SR	Sulfatbestandig sement
LA	Lavalkaliesement
(S)	Inneholder råjernslag
(V)	Inneholder silikatbasert flygeaske
(L) eller (LL)	Inneholder kalkstein

3.1.3 Kjemisk sammensetning

For å produsere Portlandsement blir Portlandklinker kombinert med små mengder ugiftige uorganiske ingredienser som gips og ikke-giftige uorganiske materialer, som kan påvirke sementens egenskaper og kvalitet. En homogen kombinasjon av materialer, som inneholder forbindelser som kalsium, silisium, aluminium og jern, blir delvis brent og smeltet for å lage Portlandklinker, et mellomprodukt som hovedsakelig består av kalsiumsilikater [11, 12].

Den nøyaktige kjemiske sammensetningen kan variere avhengig av produksjonsprosessen. Tabell 3.4 viser den kjemiske sammensetningen av Portlandsement, som består hovedsakelig av oksider, etterfulgt av tabell 3.5, som viser at disse oksidene består hovedsakelig av fire mineraler i sementen. I rene Portlandsementer uten tilsetninger som flygeaske og slagg, består sementen hovedsakelig av fire mineraler som utgjør 90-95% av sementen. De resterende 5-10% består av små mengder ulike materialer som kan ha betydning for sementens egenskaper [11, 12].

De viktigste tilsetningsstoffene i Portlandsement i små mengder inkluderer fri kalk (CaO_2), magnesiumoksid (MgO), gips (som regulerer størkningstiden), og kalium- og natriumoksid (K_2O og Na_2O), også kjent som alkaliene. Alkaliene kan påvirke sementens reaktivitet og ha effekt på både tidlig styrke og holdbarhet til sementen [11, 12].

Hvis tilslaget i betongen inneholder reaktive silikatholdige bergarter, kan kalium- og natriumoksid forårsake skadelige alkalireaksjoner som over tid kan føre til ekspansjon og nedbryting av betongen. Ved å justere forholdet mellom mineralene vist i tabell 3.5, som avhenger av den kjemiske sammensetningen av råmaterialene, kan man påvirke sementens egenskaper som varmeutvikling, styrkeutvikling, styrkepotensial og bestandighetsegenskaper. Dette betyr at man kan styre egenskapene til sementen ved å tilpasse mengdeforholdene til de ulike mineralene som inngår i sementproduksjonen [11, 12].

Tabell 3.4: Sammensetning av kjemikaler i Portlandsement [12].

Navn	Kjemisk formel	Variasjonsområde
Silisiumoksid	SiO_2	17-24 %
Aluminiumsoksid	Al_2O_3	4-7 %
Jernoksid	Fe_2O_3	1,5-5 %
Kalsiumoksid	CaO	60-67 %
Magnesiumoksid	MgO	1-5 %
Svoveloksid	SO_3	1,5-3 %
Kalium- og natriumoksid	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	0,2-1,5 %

Tabell 3.5: De fire hovedmineralene i Portlandsement [12].

Navn	Kjemisk formel	Symbol
Trikalsiumsilikat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Dikalsiumsilikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Trikalsiumaluminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalsiumaluminatferritt	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

3.1.4 Spesifikk overflateareal

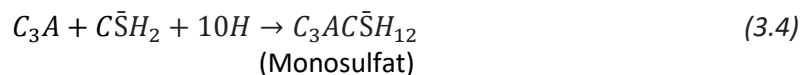
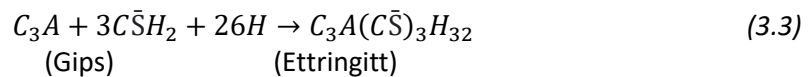
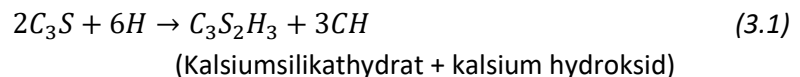
Sementens finhet spiller en rolle i å påvirke dens egenskaper. Diameteren til sementkornene ligger vanligvis i området 1-100 μm . Det er vanlig å karakterisere sementens finhet ved dens spesifikke overflate, som angir totalt overflateareal i kvadratmeter per kilogram sement. Sementens spesifikke overflateareal, også kjent som Blaine-finhet, ligger vanligvis i området 300-600 m^2/kg [12].

Grad av finhet påvirker hovedsakelig hastigheten på fasthetsutvikling og varmeutvikling. Økende grad av finhet fører til raskere fasthetsutvikling og varmeutvikling, ettersom kontaktflaten mellom sementkornene og vannet øker. Sement med høy finhet blir ofte referert til som «rapid sement» og er merket med bokstaven R, se delkapittel 3.1.2, som indikerer en rask reaksjon. Finmalt sement kan også resultere i en tettere struktur i ferdigblandet betong, noe som kan øke styrkepotensialet [12].

3.1.5 Sementhydratisering

Sementhydratisering refererer til den kjemiske reaksjonen mellom vann og klinkermineralene i sement, som resulterer i dannelsen av en sterk og holdbar betongmasse. Forståelsen av hydratiseringsprosessen er en viktig faktor for å kunne forstå betongens fasthet-, varme- og temperaturutvikling. Som nevnt i delkapittel 3.1.2 består Portlandsement hovedsakelig av kalsiumsilikater. De viktigste reaksjonene er hydratiseringsreaksjonene til kalsiumsilikathydrat ($C_3S_2H_3$), som oppstår når klinkermineralene C_3S og C_2S reagerer med vann og danner sementens bindemiddelegenskaper. På grunn av deres ubestemte sammensetning er det vanlig å forkorte symbolet for kalsiumsilikathydrat til C-S-H i stedet for å bruke en støkiometrisk formel. De aluminiumholdige klinkermineralene, C_3A og C_4AF , har liten innvirkning på betongens endelige styrke, men er med og påvirker betongens avbinding [13].

De viktigste hydratiseringsreaksjonene oppgis av [13], på følgende forenklete ligninger:

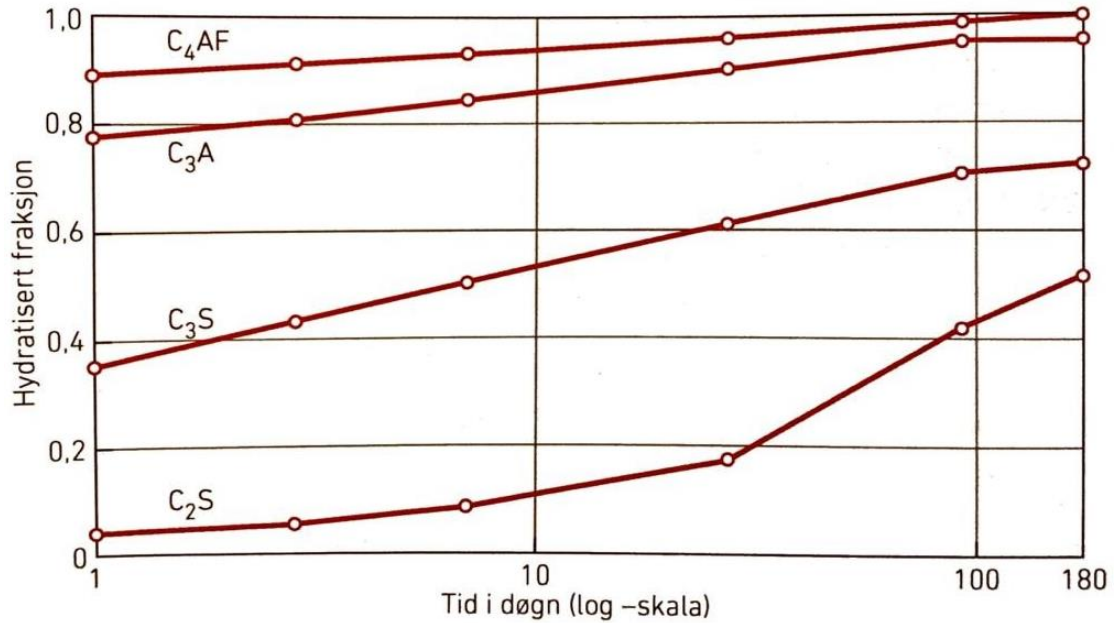


(Forkortelser iht. sement kjemisk notasjon (CCN): C=CaO, S=SiO₂, H=H₂O, A=Al₂O₃, F=Fe₂O₃, \bar{S} =SO₃)

3.1.6 Hydratiseringshastighet

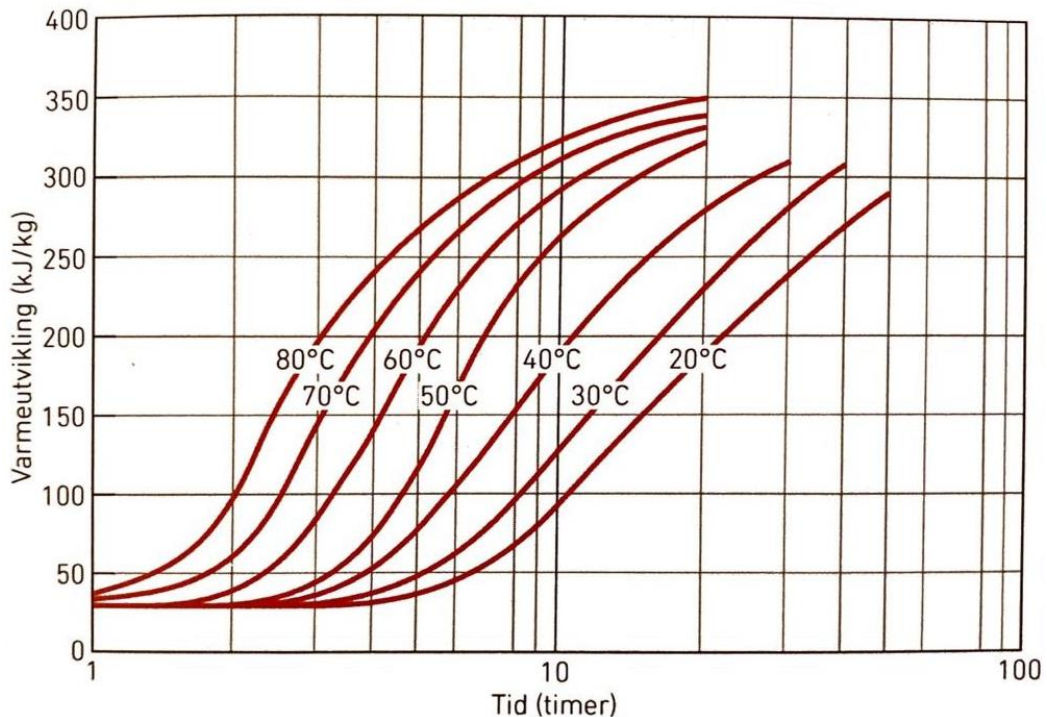
Hydratiseringshastigheten påvirker betongens egenskaper, hvor en rask hydratiseringshastighet kan føre til økt varmeutvikling og tidlig fastsettelse av betongen, mens en langsom hydratiseringshastighet kan føre til redusert styrke og dårligere egenskaper. Faktorer som sementsammensetning, temperatur og sementens finhet er med på å påvirke betongens hydratiseringshastighet. Bruk av pozzolaner som flygeaske og silikastøv, samt tilsetningsstoffer som superplastiserende midler kan brukes for å kontrollere hydratiseringshastigheten [12].

Som nevnt i delkapittel 3.1.2 har sementens kjemiske sammensetning stor innvirkning på betongens varmeutvikling. Reaksjonen mellom C_3A og vann skjer raskt, og fører til rask varmeutvikling med høy sluttverdi. Reaksjonen mellom C_4AF og vann skjer også raskt, men har sen varmeutvikling med lav sluttverdi. Reaksjonen mellom C_3S og vann, samt C_2S og vann, skjer langsomt. C_3S har moderat varmeutvikling, mens C_2S har langsom varmeutvikling med lav sluttverdi. Figur 3.1 viser hydratiseringshastigheten for de fire mineralene [12].



Figur 3.1: Hydratiseringshastighet for de rene hovedmineralene i sement. Hentet fra [12].

Hydratiseringshastigheten har en tett tilkobling med temperatur og øker betraktelig med økt temperatur, se figur 3.2. Figuren viser at hydratiseringshastigheten ved 40°C er omtrent dobbelt så stor som ved 20°C. Ved 20°C bruker sementlimet omtrent 20 timer på å utvikle 200 kJ/kg, mens ved 40°C tar det omtrent 10 timer.



Figur 3.2: Varmeutvikling i forskjellige temperaturer. Gjelder for ren Portlandsement, masseforhold 0,4. Hentet fra [12].

Sementens finhetsgrad er med på å påvirke hydratiseringsprosessen. Fimalt sement fører til større reaktivt overflateareal til å reagere med vann, noe som gir økt reaksjonshastighet og dermed økt varmeutviklingshastighet [12].

3.1.7 Norsk produsert sement

HM Sement tilbyr seks forskjellige typer sement: Anleggsement FA, Anleggsement, Anleggsement SR, Industrisement, Standardsement FA og Hvit sement. I dette prosjektet bruker vi Anleggsement FA, Industrisement og Standardsement FA som utgangspunkt. Sistnevnte tilhører kategorien CEM II/B-M(V-L) med en standardfasthet etter 28 dager på 42,5 R. Anleggsement FA tilhører kategorien CEM II/A-V med en standardfasthet etter 28 dager på 42,5 N, mens Industrisement tilhører kategorien CEM I med en standardfasthet etter 28 dager på 52,5 R. STD FA, ANL FA og IND har henholdsvis 18%, 15% og 0% innhold av flygeaske [14]. For nærmere spesifikasjoner om de tre sementtypene, se vedlegg 12.7.

3.2 Pozzolaner

Pozzolaner påvirker varmeutviklingen og fasthetsutviklingen i betong. Når pozzolaner brukes som tilsetningsstoff, bidrar de til å redusere varmeutviklingen under hydratiseringsprosessen. Dette skyldes at reaksjonene mellom sement og pozzolaner er mindre eksotermiske sammenlignet med vanlig betongproduksjon. I tillegg til å påvirke varmeutviklingen, kan pozzolaner også forbedre betongens styrke og tetthet over lengre tid. Dette skyldes deres evne til å reagere med kalsiumhydroksid og dannelsen av ekstra kalsiumsilikathydrater [8, 15].

Pozzolaner kan redusere betongens følsomhet for temperaturvariasjoner. Dette skyldes at bruk av pozzolaner bidrar til å redusere porøsiteten og øke tettheten i betongen. Som et resultat blir betongen mindre sårbar for skader forårsaket av frost og andre temperaturavhengige faktorer [8, 15]. I dette prosjektet fokuseres det spesifikt på bruk av flygeaske og silikastøv som typer pozzolaner.

3.2.1 Flygeaske

Når kull forbrennes for å produsere energi i kullkraftverk, dannes det flygeaske, et lysegrått pulver som består av sfæriske, krystallinske partikler. Gass- og støvpartiklene som frigjøres under kullforbrenning, brukes til å fjerne dette biproduktet enten mekanisk eller elektrostatiske [8]. Sammensetningen av flygeaske kan variere betydelig avhengig av kulltypen som brukes, men vanligvis utgjør silisiumoksider (SiO_2) og aluminiumoksider (Al_2O_3) den største delen. Den faktiske sammensetningen av flygeaske avhenger av den kjemiske sammensetningen av kullet og eventuelle forurensete stoffer som brennes sammen med det [16].

Flygeaske er et pozzolanisk materiale som deler flere genetiske elementer med silikastøv og er tett knyttet til det. Derfor viser de bemerkelsesverdige lik oppførsel både i fersk og herdet betong. Silisiumoksider fra flygeaske reagerer med kalsiumhydroksider i en alkalisk porevæske for å danne kalsiumsilikathydrater, på samme måte som silikastøv. Den primære forskjellen mellom dem er en lavere slagfaktor. De kjemiske og fysiske strukturene til de to materialene, som er detaljert beskrevet i trinnlisten nedenfor, brukes til å forklare denne variasjonen i reaktivitet [16].

- 45-55 % SiO_2 -innhold.
- Gjennomsnittlig diameter på 10 til 20 μm , sfæriske og ofte hule partikler.
- Spesifikk overflate er 300-500 m^2/kg .

Betong herder langsommere og danner mindre varme når flygeaske brukes. Denne egenskapen kan være nødvendig eller ønskelig i visse situasjoner. Flygeaske er en god tilsetning ved støping av store betongkonstruksjoner, ettersom den hindrer oppbygging av for høy varme i kjernen av konstruksjonen.

Temperatursvingninger i bygget kan føre til fastholds problemer på grunn av akselerert avkjøling av overflatene. På den annen side kan dosering av flygeaske være skadelig i tynnere strukturer og i situasjoner der rask styrkeutvikling er nødvendig, spesielt på byggeplassen [8].

Flygeaske leveres vanligvis ferdigblandet med Portlandsement eller som et separat tilsetningsmateriale. Som tidligere nevnt kan sammensetningen av flygeaske variere betydelig på grunn av kullets naturlige inhomogenitet og den kjemiske endringen som skjer under forbrenningsprosessen i kullkraftverket.

Type V og W av flygeaske er differensiert i NS-EN 197-1 [10]. Innholdet av reaktivt CaO og reaktivt SiO₂ i flygeaske type V skal henholdsvis være mindre enn 10 wt%¹ og mer enn 25 wt%. Reaktivt CaO-innhold i type W flygeaske må være mer enn 10 wt%. I begge typene kan mengden av de dominerende komponentene i flygeaske, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ og CaO, variere seg imellom. En høy andel SiO₂ er ønskelig i flygeaske, ettersom SiO₂ er en viktig ingrediens i pozzolanreaksjonen for C-S-H-gel [10]. Det er flygeaske type V som importeres til Norge i dag, og som benyttes i dette prosjektet.

Bruk av flygeaske i sement kan bidra til å øke fastheten og bestandigheten til betongen, samt redusere permeabiliteten og sannsynligheten for sprekker. Bruk av flygeaske reduserer også mengden Portlandsement som kreves, noe som kan føre til en betydelig reduksjon av betongproduksjonens karbonavtrykk. Ifølge NS-EN 450-1 må flygeaske oppfylle visse krav til sammensetning og kjemisk reaktivitet. Det er også krav til mengde og egenskaper som skal testes før og etter bruk. Mengden flygeaske i betongen uttrykkes som prosent av den totale bindemiddelmengden ved hjelp av følgende formel [16].

$$\%FA = \frac{FA \text{ tilsatt} + FA \text{ i sement}}{\text{Bindemiddel masse}} * 100 \quad (3.5)$$

Her er bindemiddel masse den totale mengden av bindemidler (sement, flygeaske og silikastøv). NS-EN 206+NA setter en øvre grense for mengden flygeaske i betong på 35% av total bindemiddel-mengde for vanlig betongklasse, og maks 20% for frostklasse.

3.2.2 Silikastøv

Silikastøv består av små sfæriske, finkornede partikler som inneholder minimum 85 wt% amorft silisiumoksid. Smelteprosessen som brukes til å lage silisium og ferrosilisiumlegeringer produserer silikastøv som et biprodukt. Silikastøv er på samme måte som flygeaske en pozzolan som reagerer med kalsiumhydroksider Ca(OH)₂ under hydratiseringsprosessen, noe som bidrar til å øke mengden C-S-H gel i betongen. Både nystøpt betong og betong som allerede har herdet, drar nytte av det tilsatte silikastøvet. Basert på partikkelstørrelsen er silikastøv et utmerket fyllstoff, og når det brukes i sin ferske form, vil det bidra til å stabilisere betongen og forbedre bearbeidbarheten. Redusert blødnings- og separasjonsrisiko oppnås med økt stabilitet, men dette kan også føre til økt fare for overflatetørking [10, 17].

På grunn av sin høye reaktivitet bidrar silikastøv til betongens forbedrede styrke, spesielt i tidlig fase. Grunnen til dette er nettopp silikastøvinholdet og dets spesifikke overflate. På grunn av sistnevnte

¹ Vektprosent

egenskap er det altså silikastøv som forbrukes først under pozzolanreaksjonen, før andre pozzolaner og hydrauliske bindemidler reagerer. Typiske silikastøv karakteristikk er som følger [17]:

- SiO₂-konsentrasjon: 85–98%.
- Runde partikler med en gjennomsnittlig diameter på 0,1 µm.
- Spesifikk overflate: 20 000 m²/kg .

Silikastøv kan leveres separat til blandedanlegget eller ferdig innblandet i Portlandsement. Silikastøv i Norge produseres og leveres av Elkem ASA, under produktnavnet Mikrosilika [18]. Blandeanlegget kan foreta justeringer av sluttdosen silikastøv i betongen basert på prosjektspesifikke krav. Restriksjonene i standarden setter imidlertid en grense for mengden. Mengden silikastøv uttrykkes i prosent av den totale bindemiddelmengden ved følgende formel:

$$\%S = \frac{S \text{ tilsatt} + S \text{ i sement}}{\text{Bindemiddel masse}} * 100 \quad (3.6)$$

Her er bindemiddel masse den totale mengden bindemiddel (sement, flygeaske og silikastøv). NS-EN 206+NA setter krav til maksimalt tillatt mengde silikastøv i betong på 11% av total bindemiddelmengde.

Pozzolanreaksjonen fra silikastøv er mer temperaturavhengig enn reaksjonen mellom sement og vann, noe som betyr at betong med silikastøv oppnår lavere startfasthet ved lave temperaturer enn betong uten silikastøv. Motsatt vil høye temperaturer føre til høyere tidligfasthet. Høy herdetemperatur for betonger uten silikastøv vil føre til et lavere slutfasthet enn om herdetemperaturen var 20 °C eller lavere. Dette skyldes at det utvikles mer porøse reaksjonsprodukter ved høye temperaturer enn ved lave temperaturer. Betong med silikastøv blir i mindre grad påvirket av denne effekten sammenlignet med betong uten silikastøv, noe som betyr at betong med silikastøv er mer robust overfor høye herdetemperaturer [12].

3.3 Bestandighetsklasse

Betongkonstruksjons miljøpåvirkninger klassifiseres etter eksponeringsklasser basert på nedbrytningsmekanismer som korrosjon på armering, fryseangrep og kjemiske angrep. NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2021 oppgir eksponeringsklasser for betonger med forskjellige miljøpåvirkninger.

Betongsammensetningen må tilfredsstillende bestemte krav for at betongkonstruksjoner skal kunne tåle de miljøpåkjenningene de blir utsatt for. Betongsammensetningens grenseverdier styres av bestandighetsklasser, som igjen styres av eksponeringsklasser. Dersom en betongkonstruksjon utsettes for flere enn en eksponeringsklasse, skal den eksponeringsklassen med de strengeste kravene legges til grunn for valg av tilsvarende bestandighetsklasse. Nasjonalt tillegg i NS-EN 206 oppgir grenseverdier for størst tillatt masseforhold, minste luftinnhold, minste effektive bindemiddelmengde og tillatte sementtyper avhengig av valgt bestandighetsklasse. Tabell 3.6 gir en sammenfatning av korrelasjonen mellom eksponeringsklasser og bestandighetsklasser, samt hvilke krav som må oppfylles for å tilhøre en bestemt bestandighetsklasse [19].

Tabell 3.6: Bestandighetsklasser med tilhørende eksponeringsklasser, samt materialkrav. Hentet fra [20].

Eksponeringsklasse	M90	M60	M45	MF45	M40	MF40
---------------------------	------------	------------	------------	-------------	------------	-------------

X0	X	X	X	X	X	X
XC1,XC2,XC3,XC4,XF1		X	X	X	X	X
XA1,XA2,XA4,XD1,XS1			X	X	X	X
XF2,XF3,XF4				X		X
XC2,XD3,XS2,XS3,XA3					X	X
XSA	Betongsammensetning og beskyttelsestiltak fastsettes særskilt. Betongsammensetningen skal minst tilfredsstillende kravene til M40.					
Største masseforhold	0,90	0,60	0,45	0,45	0,40	0,40
Minste luftinnhold i fersk betong	-	-	-	4 %	-	4 %
Minste effektive bindemiddelmengde (kg/m³)	225	250	300	300	330	330
Tillatte sementer	STD FA	STD FA	STD FA	STD FA	STD FA	STD FA
	STD	STD	STD	STD	STD ¹	STD ¹
	ANL	ANL	ANL	ANL	ANL ¹	ANL ¹
	IND	IND	IND	IND	IND ¹	IND ¹
1) Forutsatt mer enn 4 % tilsetning av silikastøv.						

Statens vegvesen har utarbeidet sine egne krav til produksjon og utstøping av betong. Vegnormal N400 Bruprosjektering gir krav til sammensetning, produksjon og utstøping av betong. N400 beskriver og stiller krav til bruk av betongtypene SV-Standard, SV-Lavvarme og SV-Kjemisk. Kravene til bindemiddelsammensetning er stort sett i samsvar med NS-EN 206+NA. N400 krever bruk av flygeaske, silikastøv eller slagg i alle sine betongspesifikasjoner [21].

For SV-Standard kan det tilsettes flygeaske opptil 30% av bindemiddelmengde, noe som kan føre til redusert herdevarme. SV-Kjemisk er en spesialbetong som er ment å benyttes ved eksponeringsklassene XA2 og XA3, forutsatt pH>4. SV-Kjemisk tilsvarer sulfatmotstandsklassen SuR2 i henhold til NS-EN 206+NA. SV-Lavvarme er også en spesialbetong som er ment å benyttes i områder hvor risikoen for gjennomgående fastholdingsriss på grunn av herdevarme og temperaturforskjeller er merkbar [21]. Krav til mengde flygeaske og silikastøv for SV-betongene er gitt i tabell 3.7.

Tabell 3.7: Krav til mengde flygeaske og silikastøv [21].

Betongspesifikasjon	Krav til flygeaske og silikastøvinnehold (% av tot. b)
SV-Standard (MF40/M40)	Andel flygeaske 14 – 30 % og silikastøv 3 – 5 %
SV-Kjemisk (MF40/M40)	Andel flygeaske 14 – 35 % og silikastøv 8 – 11 %
SV-Lavvarme (MF45)	Andel flygeaske ≤ 40 % og silikastøv 3 – 5 %

3.3.1 Masseforhold

Masseforhold er den parameteren som har størst påvirkning på betongens potensielle bestandighet. Masseforhold er forholdet mellom effektiv vannmengde og bindemiddel, hvor effektiv vannmengde er tilsatt vann, fukt i tilslag og vannandel i tilsetningsstoffer og bindemiddel er sement og eventuelle tilsetningsmaterialer. Formelen er beskrevet nedenfor. Ved bruk av kun sement i betongen, benyttes betegnelsen vann/semest forhold (v/c tallet). Et v/c-tall på 0,4 vil føre til tilstrekkelig vann i betongen

til å hydratisere all sementen. Men lavere v/c-tall vil kunne føre til at større andel av sementen foreligger som uhydratisert korn. Motsatt vil høyere v/c-tall føre til overskuddsvann, som vil danne kontinuerlige kapillærporer [20].

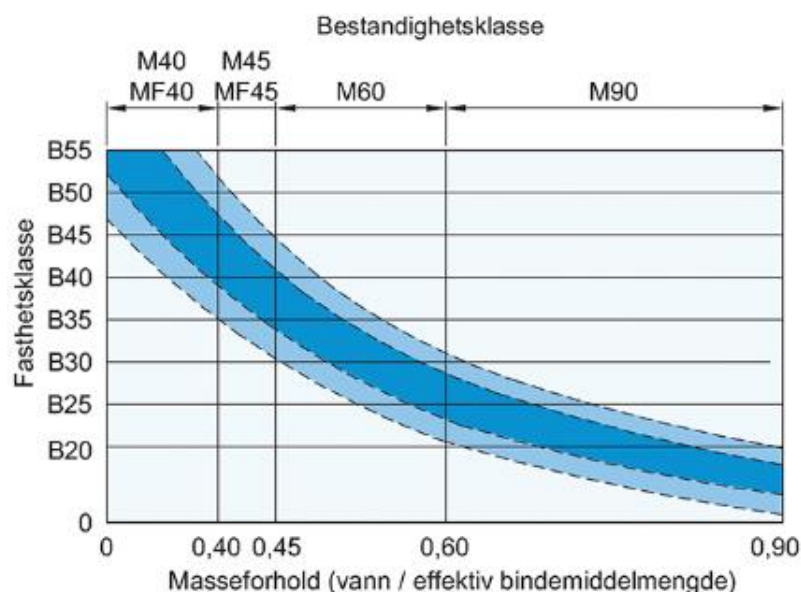
$$\text{Masseforhold} = \frac{\text{Effektiv vannmengde}}{\text{Effektiv bindemiddelmengde}} = \frac{\text{Vann}}{\text{sement} + k \cdot \text{tilsetningsmateriale}} \quad (3.7)$$

Effektivitetsfaktoren, k eller k-verdi, angir pozzolanenes virkningsgrad sammenlignet med sement. k-verdi kvantifiserer effekten av pozzolaniske materialer sammenlignet med sement i forhold til bestandighet og styrke. K-verdi er avhengig av parametere som tid, mengde pozzolan, prosentandel av bindemiddel, temperatur, sementtype og masseforhold. Noe som betyr at det ofte kreves testing for å kunne gi brukbare k-verdier. Selv med testing er det stor usikkerhet knyttet til oppgitt k-verdi. NS-EN 206+NA oppgir ulike k-verdier for flygeaske og silikastøv etter bestandighetsklasser og sementtype. De mest vanlige verdier for effektivitetsfaktoren er gitt i tabell 3.8. Det er også mulig å benytte seg av andre høyere k-verdier ved fremlegging av dokumentasjon [17].

Tabell 3.8: K-verdi ved innblanding av flygeaske og silikastøv.

	M90	M60	M45	M40
Flygeaske	0,7	0,4	0,7	0,7
Silikastøv	1	1	2	2

Masseforholdet i betongen har innvirkning på bestandigheten og kan påvirke fastheten, men det er viktig å merke seg at det ikke er den eneste faktoren som styrer disse egenskapene. Selv om det kan være en sammenheng mellom bestandighets- og fasthetsklasse i noen tilfeller, er det ikke alltid tilfellet at betong med god bestandighet vil ha høy fasthet. Figur 3.3 kan benyttes som en referanse for å forstå sammenhengen mellom bestandighets- og fasthetsklasse for normalbetong, men det er viktig å merke seg at denne sammenhengen kan variere avhengig av ulike betongblandinger og prosjektspesifikke faktorer [22]. I dette prosjektet undersøkes det påvirkningen av ulike bestandighetsklasser med kun fokus på masseforholdet som variabler.



Figur 3.3: Sammenhengen mellom fasthetsklasse og bestandighetsklasse for normalbetong [22].

3.4 Lavkarbonbetong

Lavkarbonbetong kjennetegnes tradisjonelt ved lavt klimagassutslipp og lengre herdetid. Denne typen betong består av sammensetninger der en del av den tradisjonelle Portlandsementen erstattes med alternative bindemidler. I dag benyttes det hovedsakelig materialene flygeaske, silikastøv og slagg som sementerstatning.

Lavkarbonbetong produseres i samsvar med retningslinjene i NS-EN 206+NA [23]. Målet med denne typen betong er å redusere klimagassutslipp ved å implementere spesielle tiltak for å begrense betongens sementmengde. Publikasjon nr.37 fra Norsk Betongforening, NB37, kategoriserer lavkarbonbetong i fire ulike nivåer basert på begrensningene for klimagassutslipp [24]:

- Lavkarbon B
- Lavkarbon A
- Lavkarbon Pluss og Lavkarbon Ekstrem

Lavkarbon B er den laveste klassen, og kan oppnås med vanlige resepttekniske tiltak. Lavkarbon A er strengere enn Lavkarbon B og krever oftest bruk av spesielle resepttekniske tiltak. Lavkarbon Pluss og Ekstrem er de strengeste klassene og krever spesielle sammensetninger av bindemidler som kanskje ikke er godkjent for alle bestandighetsklasser eller allment tilgjengelige.

Tabell 3.9 oppgir grenseverdier for de fire lavkarbonklassene. Bransjereferansen oppgitt i tabellen er norske generiske verdier, og kan benyttes til å beregne klimagassutslipp besparelse ved bruk av lavkarbonbetong. Den faktiske reduksjonen av klimagassutslipp vil variere fra region til region og avhenger av faktorer som tilgjengelighet av bindemiddeltypene, bindemiddelmengde ved bruk av lokale tilslag, transportforhold og kompetanse og erfaring hos betongleverandører.

Tabell 3.9: Grenseverdier for klimagassutslipp for de fire lavkarbonklassene gitt som kg CO₂-ekvivalenter per kubikkmeter betong [24].

Fasthetsklasse og lavkarbonklasse	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65
Bransjereferanse	240	260	280	330	360	370	380
Lavkarbon B	190	210	230	280	290	300	310
Lavkarbon A	170	180	200	210	220	230	240
Lavkarbon Pluss			150	160	170	180	190
Lavkarbon Ekstrem			110	120	130	140	150

Livsløpet som skal inngå i beregningen av klimagassutslipp for betong er modulene A1, A2 og A3, som er klimagassutslipp fra råvarer, transport til betongfabrikk og produksjon av 1m³ betong. I dette prosjektet er A1 beregnet basert på CO₂-verdiene for de forskjellige råmaterialene benyttet. Tabell 3.10 viser CO₂-verdier for råmaterialene i kg CO₂ ekvivalenter per tonn, hentet fra produktenes EPD-er. A2 og A3 er beregnet som gjennomsnittet av CO₂-verdiene som er mottatt fra Heidelberg Materials Betong Norge, se tabell 3.11.

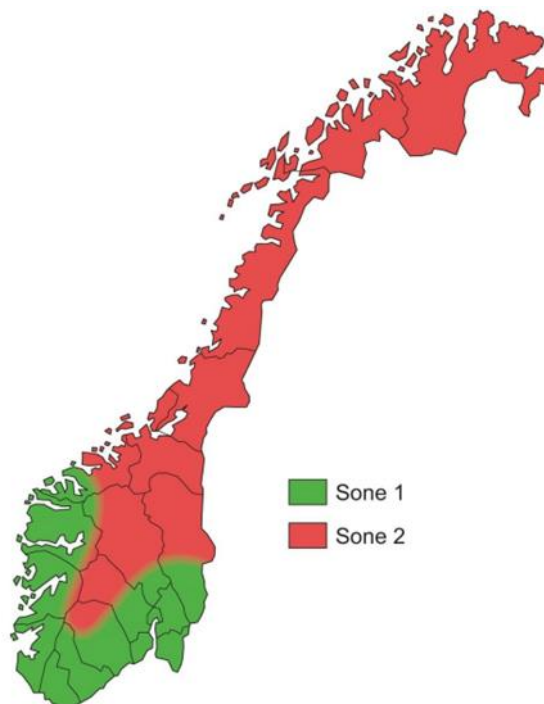
Tabell 3.10: CO₂-verdier for råmaterialer til beregning av A1.

Materialer	Kg CO ₂ ekv./tonn
STD-FA Sement	568
Silikastøv	0
Flygeaske	0,5
SX-23	727
Sand	0,47
Pukk	4,34

Tabell 3.11: Gjennomsnittsverdiene for A2 og A3 modulene benyttet i dette prosjektet.

	A2 (kg CO ₂ ekv./m ³)	A3 (kg CO ₂ ekv./m ³)
Gjennomsnittsverdi	10,2	3,3

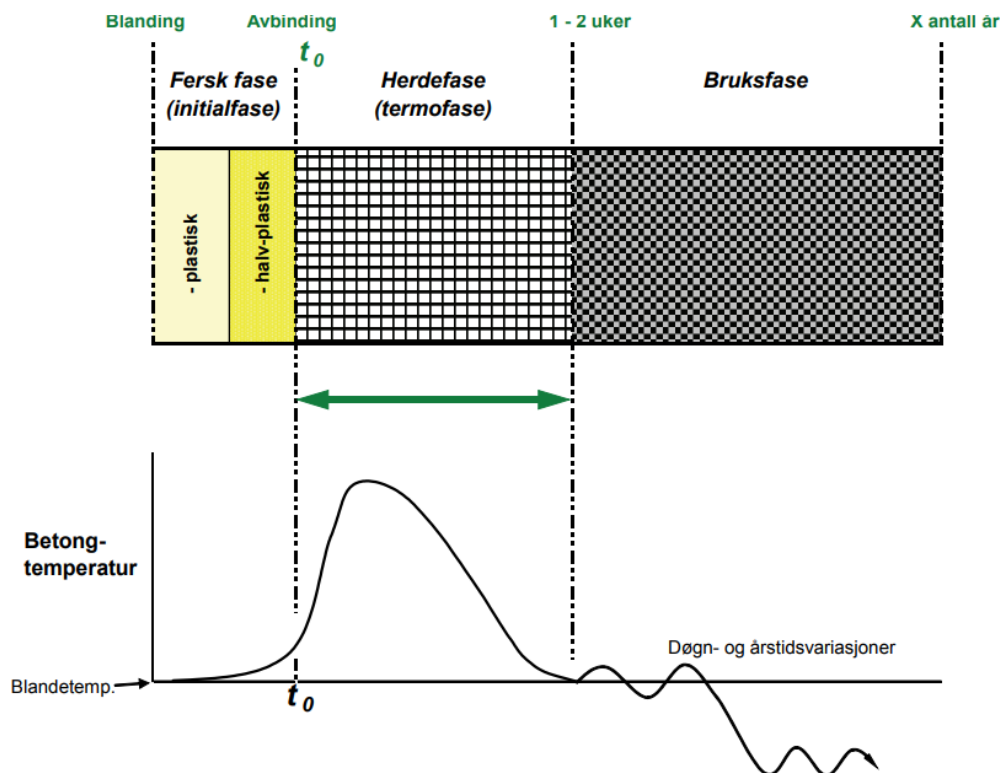
Figur 3.4 illustrerer hvor i Norge det er størst tilgjengelighet av lavkarbonbetong. Sone 1 viser områder hvor det ligger godt til rette for å kunne oppnå lave klimagassutslipp.



Figur 3.4: Regional tilgjengelighet av lavkarbonbetong. Lavkarbonbetong er lettere tilgjengelig i sone 1 enn sone 2 [24].

3.5 Betongens ulike faser

Betong som et materiale er i kontinuerlig utvikling under sitt livsløp. Dette livsløpet deles opp i fasene fersk-, herde- og bruksfasen, se figur 3.5. Den ferske fasen deles gjerne i plastisk- og halvplastisk fase, og strekker seg fra blandingstidspunkt til avbindingstiden. Hydratasjonen i denne perioden skjer langsomt. I den halvplastiske fasen mister betongen etter hvert sin konsistens, ettersom svake fysiske bindinger mellom partikler og begynnende kjemiske bindinger mellom sementkornene tar plass. t_0 , også referert til som avbindingstid, er tidspunktet hvor hydratasjonen har kommet langt nok til at betongen kan utvikle målbare mekaniske egenskaper. Avbindingstiden kan variere med betongtemperatur, bindemiddeltype og tilsetningsstoff og er typisk mellom 6-12 timer etter blanding [25].



Figur 3.5: Prinsippskisse av betongens ulike faser og tilsvarende temperaturutvikling [25].

Det meste av betongens egenskaper utvikles gjennom herdefasen. Dette tar plass sammen med en betydelig varmeutvikling. Maksimum betongtemperatur oppnås typisk etter 1-2 dager, avhengig av konstruksjonstype. Mot slutten av denne fasen vil varmeutviklingen avta, varmetapet til omgivelsene dominere og betongen avkjøles til omgivelsestemperatur [25].

3.6 Varmeutvikling i betong

Varmeutvikling i betong påvirkes av flere faktorer, inkludert sementsammensetning, sementens finhet, temperatur og pozzolaner. Sementens kjemiske sammensetning spiller en svært viktig rolle i betongens varmeutvikling. Den kjemiske reaksjonen mellom sement og vann kalles for eksoterm prosess. I denne prosessen frigjør de ulike klinkermineralene i sement varme gjennom en kjemisk reaksjon. Mengden varme som utvikles varierer avhengig av sementens sammensetning. En vanlig Portlandsement utvikler 400-500 kJ/kg ved tilnærmet full hydrering [12]. I realiteten vil sementen i betong aldri oppnå en hydratiseringsgrad på 100%. Hydratiseringsgrad avhenger i hovedsak av klinkersammensetning, sementens finhetsgrad og betongens masseforhold. I tillegg spiller herdeforholdene som temperatur og fuktighet en rolle [17].

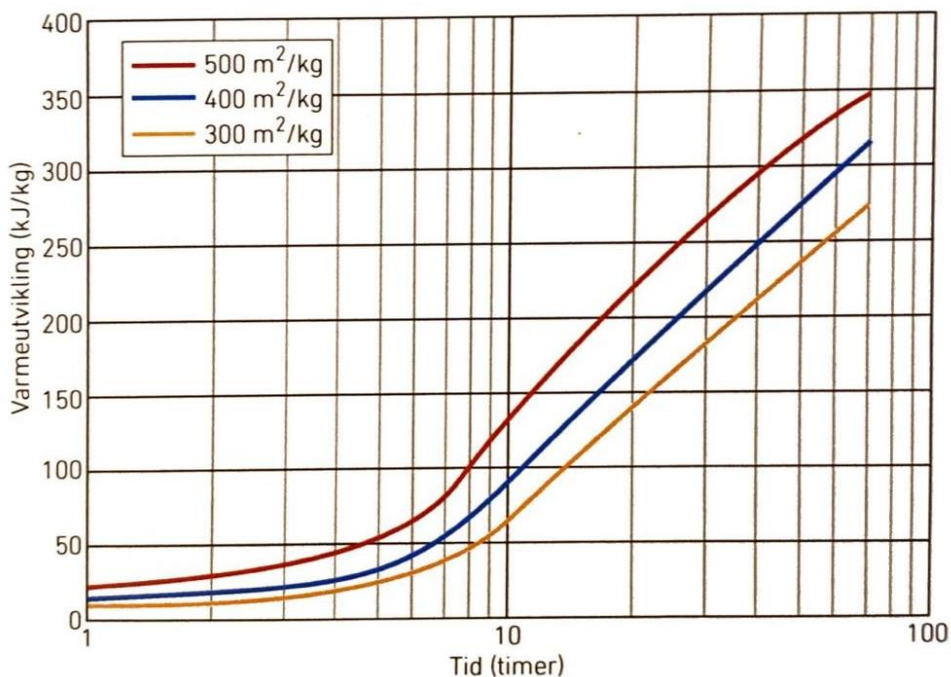
Forenklet kan man si at hydratasjonsgraden avhenger av hvor mye vann som er tilgjengelig for hydratasjonen. Et høyere v/c-tall innebærer mer vann og mikrostrukturer tilgjengelig for hydratisering av sement, mens et lavere v/c-tall innebærer mindre vann og mindre rom for sementhydratasjon. Dette resulterer i lavere hydratasjonshastighet og dermed mindre varmeutvikling. Størrelsen på sementpartiklene er også en faktor som påvirker varmeutviklingen. Grovmalt sement oppnår lavere hydratasjonsgrad før hydratasjonen stopper opp, mens finmalt sement oppnår høyere hydratasjonsgrad [12].

I betong reduseres porestørrelsene når masseforholdet reduseres. Dette skyldes at porene blir fylt med gel som ikke er tilgjengelig for hydratasjon av sement. Hvis masseforholdet går under 0,40 vil det totale vanninnholdet i betongen være for lite til at sementen kan hydratiseres fullstendig. Dermed vil redusert masseforhold vanligvis føre i redusert hydratasjonsgrad og mindre varmeutvikling per mengde sement. Det er viktig å merke seg at masseforholdet i betong referer til forholdet mellom sementmengde og mengden av tilsetningsmaterialer. En reduksjon i masseforholdet betyr mindre sement i forhold til tilsetningsmaterialer [12]. Tabell 3.12 viser de ulike klinkermineralene og varmen de frigjør.

Tabell 3.12: varmeutvikling fra hydrering av klinkermineraler [17].

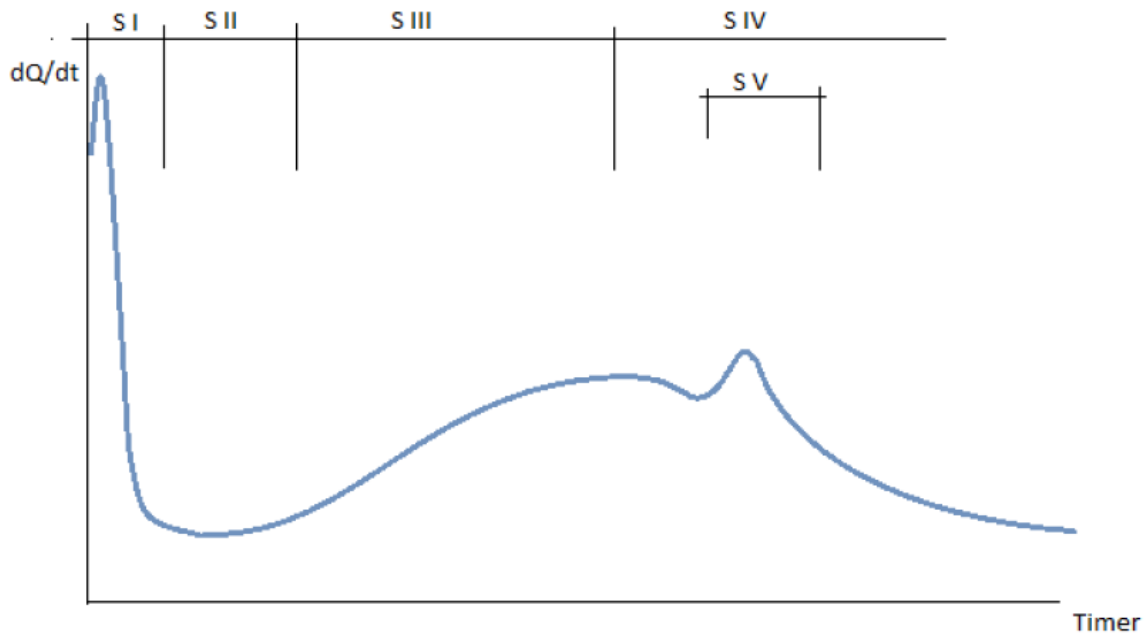
Klinkermineral	Omtrentlig varmeutvikling (kJ/kg)
C ₃ S	500
C ₂ S	260
C ₃ A	900
C ₃ AF	300

Figur 3.6 illustreres hvordan sementens finhet påvirker varmeutviklingen, altså hydratasjonsforløpet. Figuren illustrerer varmeutvikling for ren Portlandsement med forskjellige finhet, illustrasjonen gjelder sementlim med masseforhold 0,40 og herdet ved 20 °C.



Figur 3.6: Varmeutvikling for rene Portlandsementer med forskjellig finhetsgrad. Figuren gjelder sementlim med masseforhold 0,40, i 20 °C. Hentet fra [12].

Varmemengde som produseres under herdig varierer på grunn av klinkermineralene som finnes i sementen. Figur 3.7 illustrerer hvordan varmeutvikling er delt inn i 5 reaksjonsperioder.



Figur 3.7: Varmeutviklingens hovedfaser for sementpasta [17].

Fase I: Den innledende reaksjonen oppstår når sement kommer i kontakt med vann. I denne fasen dannes hovedsakelig ettringitt, og varmeutvikling når et toppunkt som ikke varer lenger enn 10-20 min ved 20 °C. Varmen som genereres i denne fasen er som regel mellom 20-30 kJ/kg.

Fase II: Denne fasen kalles for den sovende fasen og varer vanligvis i 2-4 timer. Det er mengde tilsetningsstoffer som styrer denne fasen i en viss grad. Oppløsningen fortsetter fram til kalsiumhydroksidoppløsningen når et kritisk nivå som setter i gang hydratiseringen av C_3S . Lengden på denne perioden avhenger i stor grad av temperaturen, og begynner betongen å størkne i denne fasen.

Fase III: Den tredje fasen kalles for akselerasjonsfasen. Reaksjonshastigheten øker gradvis i denne fasen, hovedsakelig på grunn av C-S-H reaksjonen. Fasthetsutvikling øker mer, og perioden varer vanligvis i 5-10 timer. Fasthetsutviklingen er sterkt avhengig av temperatur, hvor høyere temperatur fører til raskere fasthetsutvikling i betongen.

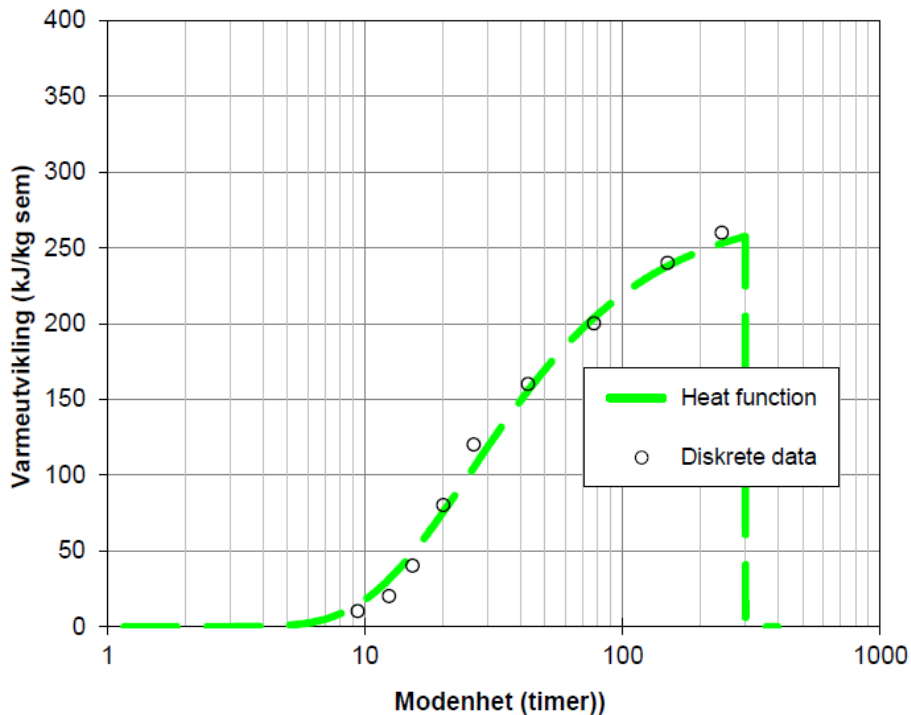
Fase IV: Binding av C-S-H med vann forekommer i denne fasen. Reaksjonsraten reduseres gradvis, siden interne transportprosesser går saktere på grunn av diffusjonskontroll.

Fase V: I den femte fasen oppnås sement som inneholder C_3A . Toppen viser omdanning av ettringitt til monosulfat.

3.6.2 Måling av varmeutvikling

Egenskapsutviklingen i betong kan beskrives nøyaktig i den første fasen av herdeforløpet, som varer i omtrent 100 modenhetstimer, ved hjelp av funksjoner. Imidlertid er påliteligheten til modenhetsprinsippet ikke tilstrekkelig etter denne perioden, spesielt for betong som har herdet ved temperaturer mellom 30-70 °C. Formfunksjon 3.8, også kjent som den danske/norske modellen, beskriver varmeutviklingen ved hjelp av samme type funksjon som beskriver styrkeutviklingen i betong. Formfunksjonen som er illustrert i figur 3.8 er basert på empiriske data fra tradisjonell betong

uten flygeaske. Denne type betong har egenskapsfunksjon som er mer S-formet kurve sammenlignet med betong med pozzolaner [26].



Figur 3.8: Varmefunksjon graf [27].

$$Q = e^{[-(\frac{\tau_e}{M})^\alpha]} \quad (3.8)$$

Hvor:

- Q_∞ = Total varmeutvikling [kJ kg sement]
- τ_e = Retardasjonsparameter [t]
- α = Krumningsparameter [-]

I Sverige benyttes det en annen funksjon for varmeutvikling, se formell 3.9. Det er ingen betydelig forskjell mellom disse tilnærmingene.

$$W(t_e) = W_\infty \cdot e^{[-(\ln((1+\frac{t_e}{t_1})^{-k_1}))]} \quad (3.9)$$

Hvor:

- $W(t_e)$ = Varmeutvikling [J/kg] som en funksjon av modenhet
- t_e = Modenhet [t]
- W_∞ = Endelig varmeutvikling etter «uendelig tid» [J/kg]
- t_1 = Kurvetilpassingsparameter [t]
- k_1 = Kurvetilpassingsparameter [-]

3.6.3 Adiabatisk temperaturutvikling

En adiabatisk prosess refererer til en termodynamisk prosess der det ikke oppstår noen overføring av varme mellom systemet og omgivelsene. Dette betyr at under målingene vil ingen varme slippes ut av prøven. Dette resulterer i en jevn økning i prøvens temperatur, noe som igjen fører til hydratisering under økende temperatur. Selv om det ideelt sett vil ikke være noe varmetap til omgivelsene, vil det være noe varmetap i virkeligheten, uansett hvor god er isoleringen. Det er vanlig at en adiabatisk temperaturøkning er rundt 50 °C, men den kan øke til over 60 °C avhengig av isolasjonstype, tykkelse og konstruksjon [17].

I teorien regnes den adiabatiske temperaturøkningen ved følgende formel [17]:

$$\Delta\theta = \frac{Q_{\infty} \cdot C}{\rho_r \cdot C_b} \quad (3.10)$$

Hvor:

- $\Delta\theta$ = Temperaturøkning [°C]
- Q_{∞} = Mengde varmeutvikling per enhet sement [kJ/kg sement]
- C = Mengde sement [kg/m³]
- C_b = Betongens spesifikke varmeutvikling [kJ/kg °C]
- ρ_r = Betongens densitet [kg/m³]

3.7 Hastighetsfunksjon

Hastighetsfunksjonen tar utgangspunkt i Arrhenius' ligning [28], og angir hydratasjonshastigheten ved en gitt temperatur θ , sammenlignet med hastigheten ved en referanse temperatur på 20 °C. Dette vil si at hastighetsfunksjon ved 20 °C, $H(20)$ er lik 1 og dimensjonsløs. Hastighetsfunksjonen uttrykkes ved følgende ligning [12]:

$$H(\theta) = e^{\frac{E(\theta)}{R} * \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+\theta}\right)} \quad (3.12)$$

Hvor:

- $E(\theta)$ = Aktiveringsenergi [kJ/mol]
- θ = Temperatur [°C]
- R = Gasskonstanten [8,314 J/mol * °C]

Aktiveringsenergi, $E(\theta)$, er den parameteren i hastighetsfunksjonen som regulerer betongens temperaturfølsomhet. Aktiveringsenergien i betong kan påvirkes av en rekke faktorer, inkludert fuktighet, temperatur, sementtype og tilsetningsmaterialer. Jo høyere temperaturen er, desto lavere vil aktiviseringsenergien være. Dette skyldes at høyere temperaturer gir større bevegelsesfrihet til molekylene i sementen, og dette resulterer i at molekylene kan enklere reagere med vannet. Høyere fuktighetsnivå kan føre til økt aktiveringsenergi, siden dette kan føre til at reaksjonen mellom sement og vann bremser ned. Sementtypen og tilslagsmaterialene kan også påvirke aktiveringsenergien i betong, ettersom noen materialer kan ha en større reaktivitet enn andre. Denne modellen er en grov tilnærming til virkeligheten, men gir akseptable resultater. Aktiveringsenergi er gitt ved følgende formell [17]:

$$E = A + B * (20 - \theta) , \text{ for } \theta \leq 20^\circ\text{C} \quad (3.13)$$

$$E = A \quad , \text{ for } \theta \geq 20^\circ\text{C} \quad (3.14)$$

Konstantene A og B i ligningene er avhengig av betongens sementtype, pozzolaninnhold og eventuelt masseforhold. Konstanten A varierer normalt mellom 20-40 kJ/mol, og konstanten B varierer mellom 1,0-1,5 kJ/mol * °C [17]. Videre representerer A temperaturfølsomheten når temperaturen er $\theta > 20$ °C, mens konstant B regulerer temperaturfølsomheten for temperaturer $\theta < 20$ °C.

3.8 Modenhetsprinsippet

Modenhet, som kalles for betongens virtuelle alder, beskriver den herdetiden en aktuell betong må ha hvis den skal kunne oppnå samme hydratasjonsgrad med herding ved 20 °C. Konseptet fungerer slik at en bestemt modenhet vil gi samme fasthet uavhengig av betongens tid- og temperaturforløp. Modenhet blir beregnet som tidsintervallet av hastighetsfunksjonen fra blandingstart t_0 til tiden t , og er gitt som [17]:

$$M = \int_{t_0}^t H(\theta) dt, \quad \theta = \theta(t) \quad (3.15)$$

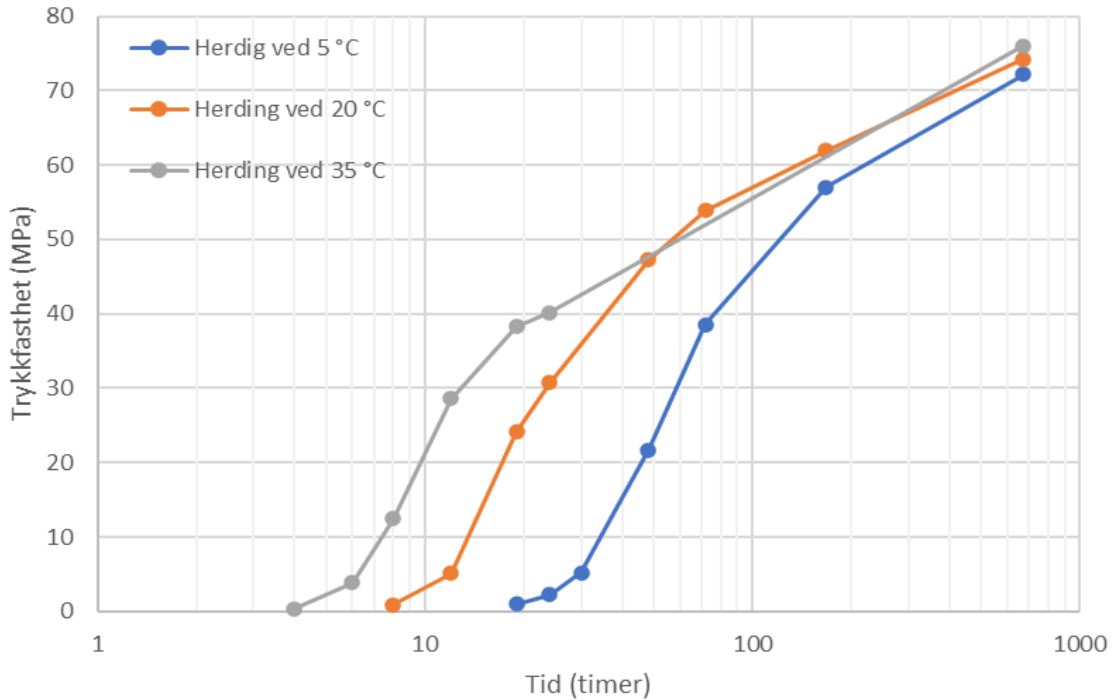
Ved numeriske beregninger er det lettere å benytte seg av en tilsvarende inkrementell versjon av overnevnte uttrykk. Se formell 3.16.

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} H(\theta_i) * \Delta t_i \quad (3.16)$$

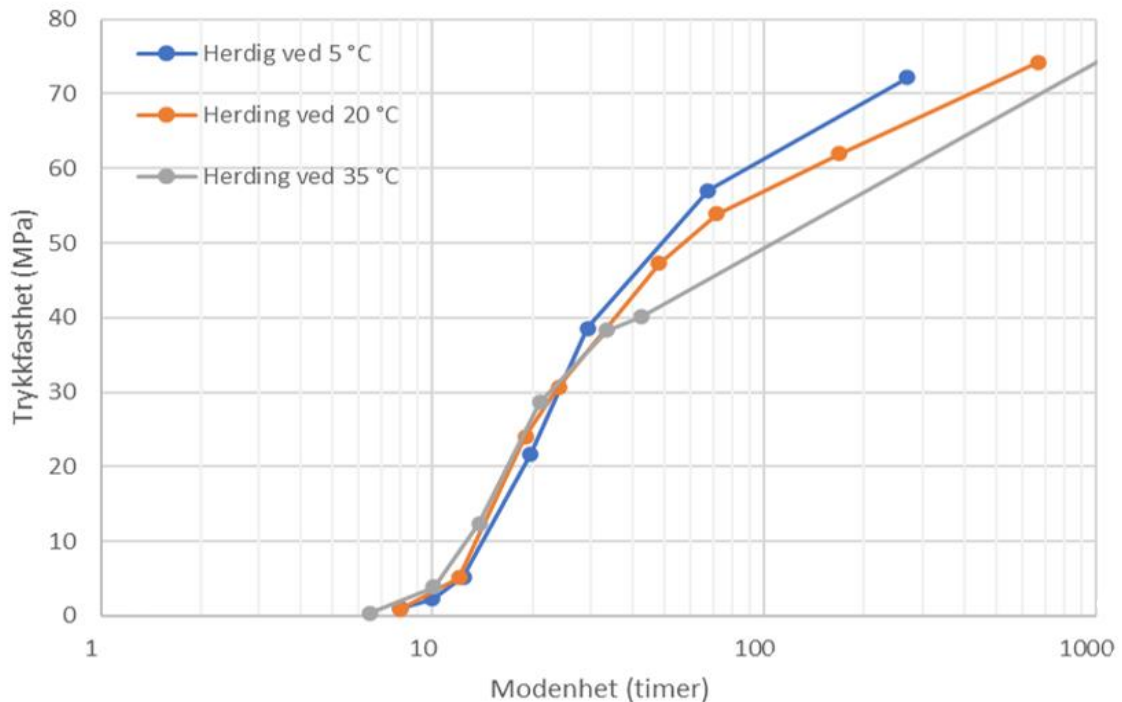
Den numeriske beregningen av modenhet utføres ved å måle temperaturforløpet i n tidsintervall av varigheten Δt_i . Først bestemmes middeltemperaturen θ_i , for å deretter kalkulere den tilsvarende verdien av hastighetsfunksjonen $H(\theta_i)$. Utviklingen i betongens modenhet ΔM_i i tidsintervallet Δt_i bestemmes som produktet mellom hastighetsfunksjon og tidsintervallet. Oppnådd modenhet bestemmes deretter ved å summere modenhetsutviklingen av hvert tidsintervall [17].

3.8.1 Bruk av modenhetsprinsippet

I den første fasen av herdeforløpet vil fasthet- og varmeutvikling være tilnærmet entydig avhengig av betongens modenhet. Ved å finne fasthetsutviklingen for en betongsammensetning ved tre ulike temperaturnivåer (5 °C, 20 °C og 35 °C), kan det brukes til å bestemme konstantene A og B i uttrykket for aktiveringsenergi. Først skal konstant A justeres fram til et akseptabelt sammenfall mellom trykkfasthetsutviklingen av 20 °C og 35 °C betonger, når tiden gis som modenhet, oppnås. Deretter kan konstanten B justeres på samme måte for sammenfall av trykkfasthetsutviklingen mellom 5 °C og 20 °C betonger [12]. Figur 3.9 viser fasthetsutviklingen som funksjon av tid av en B45 M40 betong med STD FA sement herdet ved 5 °C, 20 °C og 35 °C. Figur 3.10 viser fasthetsutvikling av de tre tilfellene som funksjon av beregnet modenhet. Betongen er blandet og støpt i forbindelse med dette prosjektet. Ved å se på figur 3.10 kan vi si at modenhetsprinsippet fanger opp effekten av temperatur på betongen, og fasthetsutviklingen blir dermed sammenfallende for de tre temperaturnivåene.



Figur 3.9: Fasthetsutvikling som funksjon av tid av en B45-M40 betong ved tre temperaturnivåer.



Figur 3.10: Fasthetsutvikling som funksjon av modenhet av B45-M40 betong.

Figur 3.10 viser et sammenfallende resultat av fasthetsnivå fram til omtrent 60% av sluttfastheten. Etter dette punktet vil bruken av modenhetsprinsippet være mindre nøyaktig, ettersom forskjeller i herdetemperatur vil føre til forskjeller i betongens sluttegenskaper. Modenhetsprinsippet kan altså benyttes til å anslå oppnådd trykkfasthet ved hvilket som helst tidspunkt, hvis betongens temperaturforløp er målt og egenskapsutviklingen av betong er kjent.

3.9 Fasthetsutvikling

Betongens fasthetsutvikling måles etter NS-EN 12390, med standardiserte 100 mm terninger. Som regel er den tidlige fasthetsutviklingen av mer interesse, derfor er det vanlig å utføre de fleste prøvingsterminene i tidlig modenhetsfase. I dette prosjektet blir fasthetsutviklingen målt for terninger herdet i 5 °C, 20 °C og 35 °C, fra 4 timer og frem til 28 dager. I likhet med varmeutvikling er fasthetsutvikling under herding kun avhengig av betongens modenhet. Følgende uttrykk, med rimelig grad av nøyaktighet, benyttes for å beskrive dette forholdet [12]:

$$f_c(M) = f_{c28} * e^{[s * (1 - \sqrt{\frac{672}{M-t_0}})]} \quad (3.17)$$

Hvor:

f_{c28} = Modellert fasthet ved 28 døgns alder [MPa]

M = Modenhet [timer]

t_0 = Starttidspunkt for fasthetsutvikling [timer]

s = Funksjonsparameter [-]

Konstantene f_{c28} , t_0 og s kan bestemmes ved kurvetilpasning av registrert data. I dette prosjektet benyttes et regneark utviklet av Sverre Smeplass til dette formål. Denne funksjonen kan brukes med god nøyaktighet for første delen av herdeforløpet, som tilsvarer omtrent 100 modenhetstimer. Ved tilfeller hvor herding foregår ved for høy temperatur og utover 100 modenhetstimer, oppstår det avvik mellom målt og beregnet egenskapsutvikling. Som vist i figur 3.10 vil herding ved 20 °C føre til en høyere sluttfasthet enn herding ved 35 °C, noe den empiriske fasthetsutviklingsfunksjonen ikke tar hensyn til [12].

3.10 HETT²² simulering av herdeforløp

Støpearbeid om vinteren kan føre til uønskede utfordringer. Lave omgivelsestemperaturer fører til at den herdende betongkonstruksjonen får stort varmetap, og langsommere fasthetsutvikling, spesielt for tynne konstruksjoner. Uten planlegging og tiltak for vinterstøp kan en risikere frysing av konstruksjonen, forstyrrelser i herdeprosessen, og varige skader på konstruksjonen etter opptining. Ifølge NS-EN 13670 /3/ må trykkfastheten på betongen være minimum 5 MPa for å tåle at den fryser under herding. Det finnes flere tiltak for å begrense varmetapet og dermed temperaturfallet i betongen, men det ønskes som regel å finne den billigste og enkleste løsningen [12].

Ved simulering av herdeforløp i et planleggingsverktøy for vinterstøp kan de optimale herdetiltakene bestemmes på forhånd. Dataverktøyet HETT²² distribueres av HM Sement gratis til sine kunder. HETT²² er et nyutviklet program og erstatter tidligere versjon HETT97. Dette programmet brukes til simulering av temperatur- og fasthetsutvikling til betong. HETT²² regner med en- og todimensjonale varmestrømmer, noe som er tilstrekkelig for konstruksjonsdeler som vegger, golv og dekker [12].

Utvidelsen av databasen av HETT²² fører til at programmet tar hensyn til betongsammensetningens fasthets- og varmeutvikling for de aller fleste aktuelle materialkombinasjoner basert på HM Sement Norge produkter, samt betingelser som konstruksjonstype, dimensjoner, lufttemperatur, forskalingstyper og vindforhold. HETT²² kan hjelpe med å besvare en del spørsmål som:

- Når kan forskalingen rives?
- Bør det benyttes en annen sementtype?
- Bør det benyttes mer sement?
- Bør betongtemperaturen økes?
- Bør det benyttes en annen type forskaling?
- Er det fare for at betongen fryser før den herder?
- Er det nødvendig å dekke til eller isolere?
- Hvor lenge bør den tildekkes?
- Vil det være fare for opprissing ved riving av forskaling?

HETT²² er en oppdatert versjon av HETT97, hvor nye funksjoner og betongsammensetninger er lagt inn. I HETT²² er det lagt opp til at man kan legge inn reell avbindingstid i timer. Det er også mulig å definere presist sammensetning for 2- og 3-komponent bindemidler, som for eksempel SV-Lavvarme og Lavkarbon A, ved å velge mengde flygeaske og silikastøv i prosent av total bindemiddelmengde. HETT²² inneholder betonger fra HETT97, samt nye noen nye betongkvaliteter i M45/MF45 og SV-Lavvarme med ulike flygeaskeinnhold [29].

HM Sement hadde et ønske om å utvide databasen i HETT²² med flere betongkvaliteter, inkludert flere bestandighetsklasser og bindemidler med varierende innhold av flygeaske og silikastøv. I dette prosjektet ble det gjennomført 19 betonger, med ulike sementtyper, bestandighetsklasser og varierende flygeaske- og silikastøvinnhold. Disse resultatene vil bli implementert i programmet for å utvide databasen Videre skal en valgt konstruksjonstype simuleres i HETT²² for å sjekke den praktiske nytteverdien av resultatene.

4. Forskerspørsmål

Betong er en av de mest brukte byggematerialene i verden, og dets egenskapsutvikling er avhengig av flere faktorer, inkludert bindemiddeltypen, sementtyper og bestandighetsklasser. Bindemiddelet i betong er det som holder sammen de andre ingrediensene og gir betongen sin styrke og stabilitet. Forskjellige lavkarbonbetonger og sementtyper kan påvirke betongens temperaturfølsomhet, fasthet og varmeutvikling på forskjellige måter. Bestandighetsklasser kan også ha en innvirkning på disse egenskapene, og det er viktig å forstå hvordan disse faktorene påvirker betongens egenskapsutvikling for å kunne produsere betong med de ønskede egenskapene. Følgelig er hovedspørsmålet i dette MSc-prosjektet:

Hvordan påvirker ulike bindemidler betongens temperaturfølsomhet, fasthets- og varmeutvikling?

Delspørsmål:

- Hvordan er påvirkning av lavkarbonklasser?
- Hvordan er påvirkning av sementtyper?
- Hvordan er påvirkning av ulike bestandighetsklasser?
- Hvordan er påvirkning av silikastøv og flygeaske?

I tillegg til delspørsmålene nevnt ovenfor, skal dette prosjektet undersøke forskjellen mellom 15 liter herdekasseforsøk på laboratoriet og 1m³ herdekasseforsøk på felt. Videre skal det gjennomføres noen simuleringer i HETT²² for å undersøke den praktiske nytteverdien av resultatene.

4.1 Begrensninger

- Effekten av SP-stoff diskuteres ikke i dette prosjektet.
- Flygeaske- og silikastøv doseringer blir kun gjennomført med STD FA sementer.
- Mengde doseringene av flygeaske begrenses til 25%, 30% og 35% av totalt bindemiddel.
- Mengde doseringene av silikastøv begrenses til 4%, 8% og 11% av totalt bindemiddel.
- Oppgavens testomfang begrenses til totalt 19 resepter.
- HETT²² simulering gjøres kun for en 25 cm tykk vegg konstruksjon, og utføres kun for tre utvalgte lavkarbonklasser.
- Trykkfasthetsresultatene måles kun fram til 28-døgn.

5. Case og Materialer

5.1 Case

Masterprosjektet dreier seg om et omfattende laboratoriearbeid som har som mål å samle nødvendig dokumentasjon for å bestemme egenskapsfunksjonene til en betongsammensetning. Dette vil bli oppnådd gjennom måling av temperaturutviklingen i en isolert kasse og fasthetsutviklingen ved ulike temperaturer, i henhold til statens vegvesen vegnormal N400. Prosjektets spesifikke mål er å utvide betongdatabasen i HETT²² med betonger som oppfyller de ulike lavkarbonklassene som er definert i Norsk Betongforenings publikasjon Nr.37. Disse betongtypene opplever økende etterspørsel i prosjekter, og dette prosjektet vil bidra til økt kunnskap om miljøvennlige og bærekraftige betongtyper og deres egenskaper.

Videre vil masterprosjektet ha betydelig innvirkning på betongbransjen ved å øke forståelsen av egenskapene til bærekraftige betongtyper. Det vil også kunne hjelpe til med identifisering av de optimale sammensetningene for å oppnå ønskede egenskaper i betongen. Prosjektet vil bli utført gjennom grundig laboratoriearbeid for å sikre pålitelige resultater. Det vil også være verdifullt bidrag til betongdatabasen i HETT²² og vil kunne benyttes av fagpersoner og forskere i fremtidige prosjekter. For å besvare forskerspørsmålet er oppgaven strukturert i flere deler:

1. Kartlegging og utvikling av forsøksmatrise.
2. Samarbeid med Teknisk sjef Dr. Tom Ivar Fredvik for å utarbeide forslag til reseptutvikling.
3. Kartlegging av referanse betonger.
4. Gjennomføring av kvalitative litteraturstudier.

I tillegg vil dokumentasjonen av ulike betongers temperatur- og fasthetsutvikling, samt bestemmelse av egenskapsfunksjonene for varmeutvikling, fasthetsutvikling og temperaturfølsomhet, vurdere de viktigste og relevante variablene for laboratorieforskene. Følgende variabler vil bli undersøkt:

- Sementtype
 - A) STD-FA m/ 18% flygeaske. Alle bestandighetsklasser.
 - B) ANL-FA m/ 15% flygeaske – Anleggsement.
 - C) IND uten flygeaske - sement til elementproduksjon og ellers der det kreves ekstra høy tidligfasthet. NB: Hovedfokuset vil være på STD-FA sement.
- Flygeaskeinnhold
 - A) Maks totalt flygeaskeinnhold iht. NS-EN 206+NA er 35%.
 - B) Maks totalt flygeaskeinnhold for SV-Standard er 30%, SV-Kjemisk 25% og SV-Lavvarme 40%.
- Silikastøv: Maks totalt silikastøvinnhold iht. NS-EN 206+NA er 11%.
- Bestandighetsklasse (dvs. masseforhold)
- Temaet om dokumentasjon av varmeutvikling i laboratoriet herdekasser på 15 liter vs. feltdokumentasjon iht. Statens vegvesen prosedyre med 1000 liters herdekasser.

Kartlegging av forsøksmatrisen gjøres for å finne all mulige kombinasjon som kan tas i laboratoriearbeid. Videre for å komme til representative resultater, gjennomføres det både litteraturstudier og reseptutvikling ved å ta utgangspunkt basert på de overnevnte viktigste variablene for laboratorieforskene.

For gjennomføring av litteraturstudier, samt mengde tilsetningsmaterialer i lavkarbonbetong tas det for det meste utgangspunkt i standarder eksempelvis (NS-EN 206+NA), Statens vegvesen håndbøker (R210, N400 osv.), bøker og andre forsknings artikler.

Til slutt skal resultatene fra overnevnte forskningen sammenfattes, etterfulgt gjennomføres en diskusjon rundt hva/ hvilke faktorer som bør ligge til grunn eller påvirker egenskapsutvikling til lavkarbonbetong som følge av varmeutvikling, fasthetsutvikling og temperatur-følsomhet.

5.2 Materialer

Følgende materialer er benyttet i forbindelse med betongblandinger. Produktblad og analyserapport av alle materialene vises på vedlegg 12.7.

Tilslag

Naturlig gradert sand (0-8 mm) og grovt knust/naturgrus (8-16 mm), begge levert av NorStone AS, Årdal.

Sement

Sement fra HM Sement Norge, og er av typen STD FA, ANL FA og IND.

SP-stoff

Det ble brukt Mapei SP-stoff av typen Dynamon SX-23.

Silikastøv

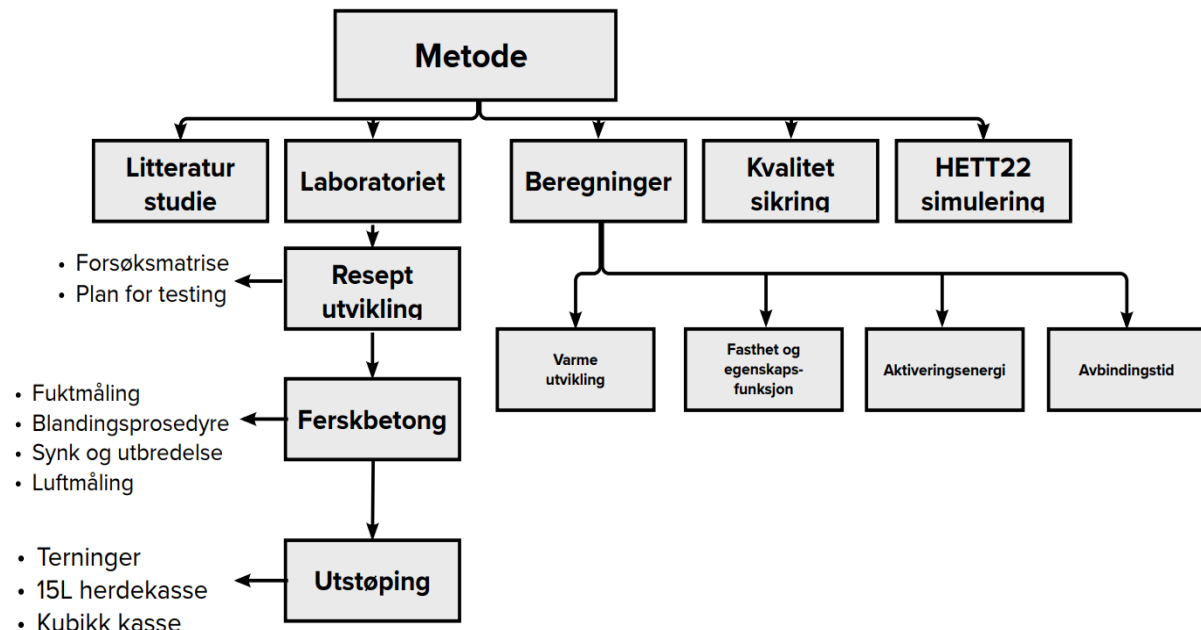
Silikastøv fra Elkem ASA.

Flygeaske

Flygeaske importert av Heidelberg Materials.

6. Metode

En oversiktlig beskrivelse av oppgaven metodekapittelet er vist i figur 6.1.



Figur 6.1. Flytskjema med oppsett av metodekapittelet.

6.1 Litteraturstudium

I denne oppgaven er det gjennomført en litteraturstudie med formål om å samle relevant informasjon fra ulike kilder, som kan hjelpe oss med å besvare forskerspørsmålet. Litteraturstudien omfattet hovedsakelig rapporter, standarder, forskningsartikler og andre relevante publikasjoner. For å få en bred og grundig oversikt over temaet ble ulike kilder benyttet, som ble innhentet fra forskjellige kilderressurser.

Litteratursøket ble hovedsakelig gjennomført på internett, hvor søkemotorene Google Scholar og Researchgate var de mest benyttede verktøyene. I tillegg ble generell informasjon og en overordnet forståelse av emnet innhentet ved hjelp av Google. Det ble også gjort anskaffelse av spesifikke litteraturkilder som ikke var tilgjengelige på internett, gjennom vår veileder Dr. Tom Ivar Fredvik. Følgende litteraturer [21, 30, 31] og standarder [10, 16, 32], danner grunnlaget for kunnskapsbakgrunn og metodikken benyttet i dette prosjektet.

En vurdering av kildenes troverdighet ble gjennomført for å sikre at informasjonen som ble benyttet i oppgaven, oppfylte høye kvalitetsstandarder. Kriterier som kildeutgiver, vitenskapelig metode og referanser til andre anerkjente kilder ble vurdert for å sikre kildenes pålitelighet og relevans. Det er viktig å merke seg at den innsamlede litteraturen har bidratt til å etablere den teoretiske bakgrunnen og fylle kunnskapshullet som er relevant for forskerspørsmålet. Informasjonen fra litteraturstudien vil bli nøye analysert og sammenlignet med laboratoriearbeidet for å kunne besvare forskerspørsmålet på en grundig og solid måte. Tabell 6.1 viser søkeordene brukt i litteraturstudiet.

Tabell 6.1: Nøkkel søkeord brukt i litteraturstudiet.

Nøkkel søkeord

Herdeteknologi
Betongens egenskapsutvikling
Heat development in concrete
Effect of pozzolans in the concrete's property development
Varmeutvikling i betong
Lavkarbonbetong
N400
COIN rapporter

6.2 Forsøksplan

Bindemiddelsammensetninger benyttet i dette prosjektet ble diskutert sammen med og funnet ved hjelp av Dr. Tom Ivar Fredvik. Dette da HM Sement Norge ønsket seg betonger som er relevant og ønsket av bransjen. Sammen ble vi enig om til sammen 19 betongsammensetninger, med forskjellige bestandighetsklasser, flygeaske- og silikastøvinnehold, samt sementtype. Tabell 6.2 viser de forskjellige bindemiddelsammensetningene med støpt dato.

Med utgangspunkt i bindemiddelsammensetningene ble tilhørende betongresepter lagt inn i programmet Branel. Dette programmet er et produksjons- og laboratorieprogram som benyttes av HM. Tabell 6.4 viser alle betongreseptene som ble benyttet i dette prosjektet. For reseptene fra Branel, henvises det til vedlegg 12.2.

Tabell 6.2: Bindemiddelsammensetninger med utført blandingsdato.

Resept nr.	Utført Dato	Navn	Sement	Bestandighet	Total FA (% av b)	Total S (% av b)
1	15.feb	STD FA - B45 - M40 REF	STD FA	M40	18	0
2	21.feb	STD FA - B45 - M40 REF REP	STD FA	M40	18	0
3	23.feb	STD FA - B35 - M45 REF	STD FA	M45	18	0
4	27.feb	STD FA - B30 - M60 REF	STD FA	M60	18	0
5	01.mar	STD FA - B30 - M90 - REF	STD FA	M90	18	0
6	03.mar	IND B45 M40 REF	IND	M40	0	0
7	06.mar	STD FA - B30 - M90 - 35%FA	STD FA	M90	35	0
8	08.mar	STD FA - B30 - M90 - 35%FA - 11%S	STD FA	M90	35	11
9	10.mar	STD FA - B45 - M40 - 35%FA	STD FA	M40	35	0
10	13.mar	STD FA - B45 - M40 - 25%FA	STD FA	M40	25	0
11	15.mar	STD FA - B30 - M60 - 35%FA	STD FA	M60	35	0
12	17.mar	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 4%S	STD FA	M40	25	4
13	22.mar	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 8%S	STD FA	M40	25	8
14	24.mar	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 11%S	STD FA	M40	25	11
15	29.mar	ANL FA - B45 - M40 REF	ANL FA	M40	15	0
16	31.mar	STD FA - B45 - M40 - 30%FA	STD FA	M40	30	0
17	03.apr	STD FA - B45 - M40 - 35%FA REP*	STD FA	M40	35	0
18	05.apr	STD FA - B45 - M40 - 35%FA - 11%S	STD FA	M40	35	11
19	07.apr	STD FA - B35 - M45 - 35%FA - 11%S	STD FA	M45	35	11

Forkortelsen REF i tabell 6.2 står for referanse, og indikerer at disse betongene ikke er tilsatt ekstra flygeaske og silikastøv. Flygeaske (FA) og silikastøv (S) er begge oppgitt i prosentandeler av den totale bindemiddelmengden. Forkortelsene STD FA, IND og ANL FA står for henholdsvis "Standardsement FA", "Industrisement" og "Anleggsement FA". Resept nr.2 er en repetisjon av resept nr.1. Dette for å forsikre oss nøyaktigheten av utførelsen og resultatene våre. I tillegg er resept nr. 17 en «delvis» repetisjon av resept nr.9. Ettersom resept nr.9 ga mindre synk enn forventet, ble bindemiddelvolumet i resept nr.17 justert opp for å gi ønsket synk.

Lavkarbonklassene er valgt basert på kriteriene nevnt under kapittel 3.4. A1 for hver betongresept er regnet ut med CO₂-verdiene for råmaterialer gitt i tabell 3.10. A2 og A3 er gjennomsnittsverdier hentet fra tabell 3.11. Tabell 6.3 viser alle betongene med tilhørende lavkarbonklasse, A1-A3 verdier og det totale klimagassutslippet.

Tabell 6.3: Betonger med tilhørende lavkarbonklasser.

Resept nr.	Navn	Lavkarbonklasse	A1	A2	A3	Klimagassutslipp (kg CO ₂ ekv./m ³)
1	STD FA - B45 - M40 REF	Lavkarbon B	245	10.2	3.3	258
2	STD FA - B45 - M40 REF REP	Lavkarbon B	245	10.2	3.3	258
3	STD FA - B35 - M45 REF	Lavkarbon B	226	10.2	3.3	240
4	STD FA - B30 - M60 REF	Lavkarbon B	198	10.2	3.3	211
5	STD FA - B30 - M90 - REF	Lavkarbon A	174	10.2	3.3	188
6	IND B45 M40 REF	Bransje	342	10.2	3.3	355
7	STD FA - B30 - M90 - 35%FA	Lavkarbon A	139	10.2	3.3	152
8	STD FA - B30 - M90 - 35%FA - 11%S	Lavkarbon Pluss	117	10.2	3.3	130
9	STD FA - B45 - M40 - 35%FA	Lavkarbon A	173	10.2	3.3	186
10	STD FA - B45 - M40 - 25%FA	Lavkarbon B	216	10.2	3.3	230
11	STD FA - B30 - M60 - 35%FA	Lavkarbon A	175	10.2	3.3	188
12	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 4%S	Lavkarbon A	196	10.2	3.3	210
13	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 8%S	Lavkarbon A	181	10.2	3.3	194
14	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 11%S	Lavkarbon A	169	10.2	3.3	182
15	ANL FA - B45 - M40 REF	Lavkarbon B	246	10.2	3.3	259
16	STD FA - B45 - M40 - 30%FA	Lavkarbon A	198	10.2	3.3	211
17	STD FA - B45 - M40 - 35%FA REP*	Lavkarbon A	181	10.2	3.3	194
18	STD FA - B45 - M40 - 35%FA - 11%S	Lavkarbon Pluss	138	10.2	3.3	151
19	STD FA - B35 - M45 - 35%FA - 11%S	Lavkarbon Pluss	133	10.2	3.3	147

Tabell 6.4: Reseptene benyttet i dette prosjektet

Resept nr.	Navn	kg/m ³								
		STD FA	ANL FA	IND	Vann	FA	S	SP	Sand	Pukk
1	STD FA-B45-M40 REF	420,0	-	-	165,4	-	-	3,36	1079,6	722,4
2	STD FA-B45-M40 REF REP	420,0	-	-	165,4	-	-	3,36	1079,6	722,4

3	STD FA-B35-M45 REF	388,9	-	-	173,1	-	-	2,53	1085,3	726,2
4	STD FA-B30-M60 REF	339,6	-	-	178,6	-	-	1,87	1103,8	738,6
5	STD FA-B30-M90-REF	298,4	-	-	184,0	-	-	1,34	1118,0	748,1
6	IND-B45-M40 REF	-	-	475,0	187,1	-	-	3,80	1025,2	686,0
7	STD FA-B30-M90-35%FA	236,5	-	-	184,2	61,9	-	1,04	1108,0	741,4
8	STD FA-B30-M90-35%FA-11%S	196,5	-	-	183,5	69,1	32,8	1,94	1100,2	736,2
9	STD FA-B45-M40-35%FA	293,3	-	-	145,7	76,7	-	2,96	1126,2	753,6
10	STD FA-B45-M40-25%FA	370,4	-	-	159,5	34,6	-	3,24	1091,7	730,5
11	STD FA-B30-M60-35%FA	298,9	-	-	173,5	78,2	-	1,89	1079,0	722,0
12	STD FA-B35-M40-25%FA-4%S	337,2	-	-	159,3	36,7	15,6	3,50	1096,6	733,8
13	STD FA-B45-M40-25%FA-8%S	306,4	-	-	159,0	38,6	30,0	3,94	1101,0	736,8
14	STD FA-B45-M40-25%FA-11%S	284,8	-	-	158,6	40,0	40,1	4,38	1104,2	738,8
15	ANL FA-B45-M40 REF	-	400,0	-	157,5	-	-	3,20	1104,6	739,2
16	STD FA-B45-M40-30%FA	337,2	-	-	155,6	57,8	-	3,16	1099,7	735,9
17	STD FA-B45-M40-35%FA REP*	307,2	-	-	152,6	80,3	-	3,10	1104,9	739,3
18	STD FA-B45-M40-35%FA-11%S	229,9	-	-	151,5	80,8	38,4	4,54	1117,5	747,8
19	STD FA-B35-M45-35%FA-11%S	224,1	-	-	167,6	78,8	37,4	3,06	1099,0	735,4

For hver resept ble det støpt 60 terninger (i former med 3 terninger) med en størrelse på 100 mm. I tillegg ble det støpt en 15-liters herdekasse for hver resept. På grunn av begrenset antall former og kapasiteten til blandemaskinen, måtte hver resept blandes i to omganger: en blanding klokken 09:00 (blanding nr.1) og en blanding klokken 12:00 (blanding nr.2). For blanding nr.1 ble det støpt 8 former, tilsvarende 24 terninger, og en herdekasse på 15 liter. For blanding nr.2 ble det støpt 12 former, tilsvarende 36 terninger. Alle formene ble plassert i vannbad ved temperaturer på 5 °C, 20 °C og 35 °C, som vist i tabell 6.6 og 6.7.

For å kunne svare på problemstillingen vår, skal betongene sammenlignes og analyseres med hensyn til sementtype, bestandighetsklasse, flygeaskeinnhold, silikastøvinnhold og lavkarbonklasser. Gruppeinndeling av betongene er vist i tabell 6.5.

Tabell 6.5: Gruppeinndeling av betongtypene.

Gruppeinndeling	Resept nr.	Navn
Sementtype	1	STD FA - B45 - M40 REF
	6	IND - B45 - M40 REF
	15	ANL FA - B45 - M40 REF
Bestandighetsklasse	1	STD FA - B45 - M40 REF
	3	STD FA - B35 - M45 REF
	4	STD FA - B30 - M60 REF
	5	STD FA - B30 - M90 - REF
Silikastøv	10	STD FA - B45 - M40 - 25%FA

		12	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 4%S
		13	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 8%S
		14	STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 11%S
		1	STD FA - B45 - M40 REF
	Flygeaske	10	STD FA - B45 - M40 - 25%FA
		16	STD FA - B45 - M40 - 30%FA
		17	STD FA - B45 - M40 - 35%FA
B30-M90 betong	Lavkarbon A	5	STD FA - B30 - M90 - REF
	Lavkarbon A	7	STD FA - B30 - M90 - 35%FA
	Lavkarbon Pluss	8	STD FA - B30 - M90 - 35%FA - 11%S
B45-M40 betong	Lavkarbon B	1	STD FA - B45 - M40 REF
	Lavkarbon A	17	STD FA - B45 - M40 - 35%FA
	Lavkarbon Pluss	18	STD FA - B45 - M40 - 35%FA - 11%S
B35-M45 betong	Lavkarbon B	3	STD FA - B35 - M45 REF
	Lavkarbon Pluss	19	STD FA - B35 - M45 - 35%FA - 11%S
B30-M60 betong	Lavkarbon B	4	STD FA - B30 - M60 REF
	Lavkarbon A	11	STD FA - B30 - M60 - 35%FA

6.3 Plan for trykktesting

Tabell 6.6 og 6.7 viser antall terninger og antall former som skal plasseres i 5 °C, 20 °C og 35 °C vannbad, samt antall terninger med tilhørende tidspunkt for trykktesting.

Tabell 6.6: Blandesats for blanding nr. 1. Rødt tall indikerer tidligfasthet terninger.

Badekar	Alder/antall terninger												Totalt	
	4t	6t	8t	12t	19t	24t	30t	2d	3d	7d	28d	91d	Terninger	Former
5°C						3	3						6	2
20°C			3	3									6	2
35°C	3	3	3	3									12	4

Tabell 6.7: Blandesats for blanding nr. 2. Rødt tall indikerer tidligfasthet terninger.

Badekar	Alder/antall terninger												Totalt	
	4t	6t	8t	12t	19t	24t	30t	2d	3d	7d	28d	91d	Terninger	Former
5°C					3			2	2	2	2	1	12	4
20°C					3	2		2	2	2	2	2	15	5
35°C					3	2					2	2	9	3

Trykktesting ble gjennomført på to trykktestmaskiner med forskjellig kapasitet, heretter kalt for trykktestmaskin 1 og trykktestmaskin 2. Sistnevnte har en kapasitet på 0,1-200 kN, hvor tidligfasthet terninger (markert med grønt i tabellene) ble testet. Resterende terninger testes på trykktestmaskin 1 med en kapasitet på 3-3000 kN. Verdt å nevne at flere av testene av de treige betongene måtte testes på trykktestmaskin 2, ettersom de hadde for lav tidligfasthet opptil 24 timer.

På grunn av oppgavens tidsbegrensning skal kun resultatene opptil 28-døgn tas hensyn til i dette prosjektet. 91-døgns fasthetsresultatene skal tas av og brukes av Heidelberg Materials.

6.4 Fuktmåling

Hver støpe dag ble det gjennomført målinger av fuktinnholdet i sanden for å klargjøre dagens betongblandinger. Prosedyren for fuktmåling var som følger:

- Sand på størrelse fra 0-8 mm brukes.
- Ønsket mengde sand tilsettes i blandetrommel, og blandes i 3-5 minutter.
- 600 gram sand tas ut av blandetrommel.
- Sanden stekes i en stekepanne til sanden er overflatetørr.
- Vekten på den tørre sanden måles, forskjellen på før og etter tørking brukes til å beregne fuktinnholdet i sanden.

Ettersom kun sandens overflate tørkes, trekkes en verdi på 0,6% av beregnet fukt. Dette er en verdi som brukes hos HM Sement Norge og er absorbert vann i sanden. Videre gjelder formel 6.1 for måling av fukt i sanden:

$$Fukt (\%) = \frac{V\ddot{a}tvekt\ sand - T\ddot{o}rrvekt\ sand}{T\ddot{o}rrvekt\ sand} * 100 \quad (6.1)$$

6.5 Blandingsprosedyre

Blandingsprosedyren for HM Sement Norge er som følge:

- Klargjøring av materialer som skal benyttes i blandingen.
- Blandemaskinen fuktes med en svamp.
- Tørrt materiale tilsettes blandemaskinen i rekkefølgen pukk, pozzolaner, sement og sand.
- Tørrblanding i 1 minutt.
- Vann med isbiter tilsettes i løpet av 10-15 sekunder og blandes i 1 minutt.
- SP-stoff tilsettes blandingen i løpet av 5- 10 sekunder og blandes i 1 minutt.
- Blandepause i 2 minutter. Kantene av blandemaskinen skrapes for å sikre at alt av materialer blandes godt.
- Blanding i 3 minutter.
- Etter blande-stopp, tas temperaturmåling med tilsiktet temperatur 20 °C fra fersk betong.

Total blandingsprosedyre varer i 8 minutter. Grunnen til at det tilsettes isbiter i vannet er for å sikre en tilsiktet betongtemperatur på 20 °C etter blandestopp.

6.6 Synkmål/Utbredelse

Synkmål og utbredelse av betong ble gjennomført i henhold til NS-EN12350-2. Figur 6.2 viser synkmåltest utført på laboratoriet.

Prosedyren for synkmål:

- Horisontalt underlag og synk kjeglen fuktes.
- Kjeglen skal fylles over tre lag.
- Etter hver omgang komprimeres betongen med 25 støt ved bruk av komprimeringsstang.
- Etter siste omgang avrettes toppen av kjeglen.

- Kjeglen løftes jevnt oppover i en hastighet på omtrent 5 sekunder.
- Kjeglen settes i nærheten av betongmassen og synk måles.



Figur 6.2: Illustrasjon av synkmål utført på laboratoriet.

Prosedyre for utbredelse:

Etter gjennomført synkmålest måles diameteren på betongen på tvers av begge sidene. Gjennomsnittet av disse målingene gir oss betongens utbredelse.

6.7 Luftmåling

Figur 6.3 viser luftmåleren benyttet i dette prosjektet. Prosedyren for luftmåling er som følge:

- Innsiden av luftmålerens beholder fuktes med vann.
- Beholderen fylles med tre jevne lag med betong.
- Hvert lag komprimeres med 25 støtt ved hjelp av en komprimeringsstang. Etter komprimering av hvert lag, tilføres det 3-4 lette slag på beholderen ved hjelp av en hammer.
- Toppen av betongen avrettes og overskudds betong på beholderen rengjøres.
- Beholderen fylt med betong veies på vekt med en nøyaktighet på 50 gram og noteres.
- Kantene på beholderen rengjøres for at beholderlokket festes godt.
- Beholderen tømmes for lufttrykk.
- Beholderen fylles med vann gjennom ventilen frem til vannet som renner gjennom den andre ventilen er uten luftbobler.
- Ny luft pumpes i beholderen og justeres til referansenivå.
- Knappen som slipper ut luft i trykkes på og det tilføres noen lette slag på luftmåleren.
- Betongens luftinnhold leses av og noteres.

Betongens ferskdensitet regnes ut ved følgende formel:

$$Densitet = \frac{\text{Vekt på beholder fylt med betong} - \text{vekt på tom beholder}}{\text{Beholderens volum}} \quad (6.2)$$



Figur 6.3: Luftmålingsutstyr.

6.8 Utstøpingsprosedyre

6.8.1 Utstøping av terninger

For blandingen som utføres kl. 09:00, fylles alle 8 formene kun fra blandemaskinen, mens for blandingen som utføres kl. 12: 00, fylles formene fra blandemaskinen, samt resterende betong fra både synkmål og luftmålingstest. Dette for å få nok betong til alle former. Betongen som er fra luftmåleren, brukes etter at omtrent 2 cm med betong fra toppen av beholderen er fjernet. Videre utstøpingsprosedyre for hver blanding er som følge:

- Formene nummereres etter følgeseddelnummer.
- Innsiden av støpeformene smøres med et tynt oljelag.
- Formene skal fylles og komprimeres med 25 støt ved hjelp av komprimeringsstang.
- Sparkelspade brukes til å rette alle fire sider av terninger.
- Toppen av terningene avrettes.
- Hver form dunkes noen ganger på hver side med en gummi-hammer.
- Formene plasseres i vannbad med temperaturene 5 °C, 20 °C og 35 °C i løpet av 15-20 minutter etter blandestopp.
- 3 temperaturloggere med 3 kabler i hver klargjøres.
- For begge blandingene brukes det en logger for en av formene i 5 °C vannbad og en logger i 35 °C vannbad.
- En av kablene plasseres i vannet, en i senter av terningen i midten av formen og en i senter av en ytre terning.

6.8.2 Utstøping av herdekasse

Herdekasse-studier og semi-adiabatiske kalorimetertester utføres for å kartlegge varmeutviklingen samt temperaturøkningen i betongen [30]. Herdevarmen i herdekassene finnes i henhold til standarden [33]. Målet med forsøkene er kartlegging av varmeutvikling med minst mulig varmetap til omgivelser. Dette for å unngå varmetapspåvirkning på parameterne kvaliteten i varmefunksjonen. Til forsøkene benyttes herdekasser formet som bokser med forskalingsplater, se figur 6.4. Boksene har isolasjon med tykkelse på 10 cm av type isopor, og har et innvendig volum mellom 15 liter. Økning i isolasjonsgrad, samt betongmengder øker sikkerheten rundt beregninger i forhold virkeligheten. Dette er beskrevet under delkapittelet. Temperaturforløpet registreres i både omgivende luft og betongen ved bruk av loggeenhet (Testo) og termoelementer. En herdekasse ble støpt for hver resept, fra betongblanding nr.1. Prosedyre for herdekassen er som følge:

- Innsiden av herdekassen tildekkes med plast før utstøping.
- Herdekassen fylles med betong i rekkefølge fra synkmålttest, luftmålingstest og etterfylles fra blandemaskinen. Omtrent 2 cm betong fjernes fra toppen av luftmåler beholderen før den fylles i herdekassen.
- Betongens overflate rettes ut.
- 3 laget skal ha riktig høyde i forhold til herdekassen, slik at betongoverflate kommer i kontakt med herdekassens lokk.
- Utstøping av herdekassen skal være ferdig etter 20 minutter fra blandestopp.
- Herdekassen flyttes til 38 °C rom etter maksimum 30 minutter fra blandestopp.
- Temperaturlogger startes og en kabel settes i betongen til den når midten av betongen. En kabel plasseres rett ved siden av kasse i høyde med midten av kassen, for å logge lufttemperatur.
- Herdekassen skal stå på pall, slik at alle sideflater når optimal kontakt med lufttemperatur i 38 °C klimarommet.
- For å få ut mer varmeutvikling/høyere modenhet, flyttes kassen ut til et 20 °C rom når betongtemperaturen er omtrent 5-6 °C høyere enn lufttemperaturen i 38 °C rommet.
- Temperatur logges i minst 7 døgn eller til betongtemperaturen er omtrent lik omgivelsestemperatur.



Figur 6.4: 15 L herdekasse.

6.8.3 Utstøping av kubikk kasse

Uttøping av kubikk herdekasse gjøres i henhold til Statens vegvesen vegnormal N400 [31]. Herdekassene ble støpt ved Nenset betongfabrikk, se figur 6.5. Betongkvalitetene B45-M40 REF og B45-M40 35%FA ble støpt. Følgende prosedyre ble benyttet:

- Klargjøring av kubikk herdekasse. Det skal brukes kryssfiner til forskalingen med et minimum tykkelse på 15 mm. Alle sidene i herdekassen skal være isolert. Isolasjon som brukes skal ha en tykkelse på 100 mm, og skal være av type ekstrudert polystyren (XPS).
- Fersk betongtemperatur blir målt.
- Utstøping av betongene rett fra betongbil.
- To loggere ble benyttet for hver herdekasse. Fra hver logger ble det støpt to sensurer i senter av betongen, og to i lufta. Dette for å sikre oss at loggere måler riktig temperatur.
- Herdekassen tildekkes med presenning for beskyttelse mot vær.
- Registrering skal gjøres umiddelbart etter ferdig utstøping.
- Minimum loggefrequensen skal være på 1 per 15 minutter.
- Herdekassen logges for minst 7 døgn.

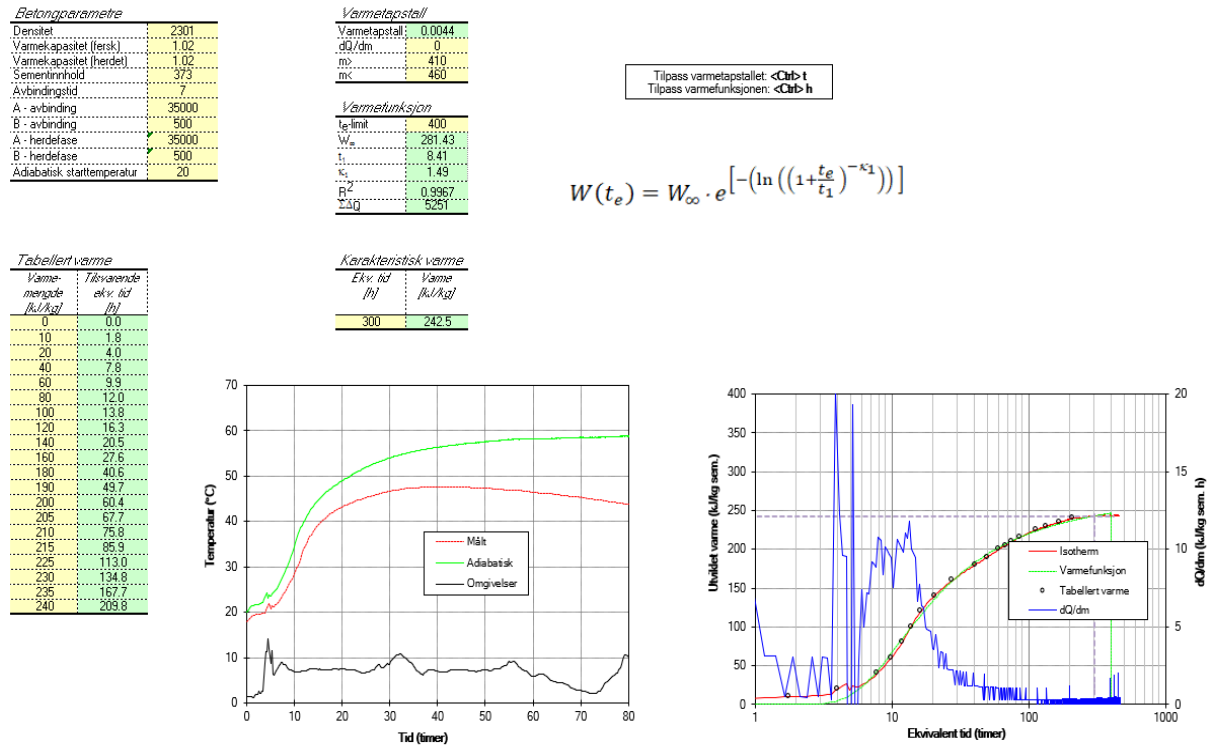


Figur 6.5: 1m³ herdekasse utstøping ved Nenset fabrikk.

6.9 Varmefunksjon

Resultatene fra temperaturmålingene plottes videre inn i et regneark utviklet av Sverre Smeplass. Beregningene i regnearket gjennomføres basert på den svenske funksjonen beskrevet i kapittel 3.6.2 Regnearket tar hensyn til betongens densitet, varmekapasitet, bindemiddelmengde, avbindingstid og A og B konstanter. Varmekapasiteten regnes i et annet Excel-ark og plottes inn. Avbindingstiden leses av grafen i regnearket i modenhetstid, og tilsvarende verdi i vanlig timer plottes inn. For å få et mest riktig resultat brukes det et modenhetsintervall så langt i herdeforløpet som mulig. Regnearket viser oss den adiabatisk temperaturutviklingen og isoterme varmeutviklingen. I tillegg viser regnearket varmfunksjonsparametrene W_{∞} , t_1 og k_1 . Videre er det mulig å finne den gjennomsnittlige

varmeproduksjonen eller varmeproduksjon intensiteten i forskjellige modenhetsintervaller. Et skjermbilde av regnearket vises i figur 6.6.



Figur 6.6: Regneark for beregning av varmetutvikling.

6.10 Fasthetsfunksjon

For å finne parametere til fasthetsfunksjon kan det benyttes to forskjellige regneark som er utviklet av Sverre Smeplass. For dette prosjektet benyttes begge metodene og det skal sjekkes hvilken metode som gir mest nøyaktig verdier. Den første metoden som benyttes heter fasthetsfunksjons regneark, hvor resultatene fra trykktestene ved 20 °C plottes og verdiene for f_{c28} og s og t_0 regnes ut ved å gjøre en best mulig tilpasning av FIB-modellen opp mot de målte verdiene. Det legges størst vekt på best mulig tilpasning i tidlig fase (5-40 MPa). 28 døgns fasthet kan dermed simuleres med relativt stort avvik. Dette avviket vil være størst for betonger med tilsetningsmaterialer, mens for betonger uten tilsetningsmaterialer vil tilpasningen av FIB-modellen være relativ god. Figur 6.7 viser eksempel på betong med god tilpasning for hele herdeforløpet. Figur 6.8 viser eksempel på betong med dårlig tilpasning over 40 MPa fasthet.

For den andre metoden benyttes Excel arket som brukes for å beregne aktiveringsenergi. Her benyttes resultatene fra trykktest for temperaturene fra 5 °C, 20 °C og 35 °C. Figur 6.9 viser et skjermbilde av regnearket aktiveringsenergi med egenskapsfunksjon.

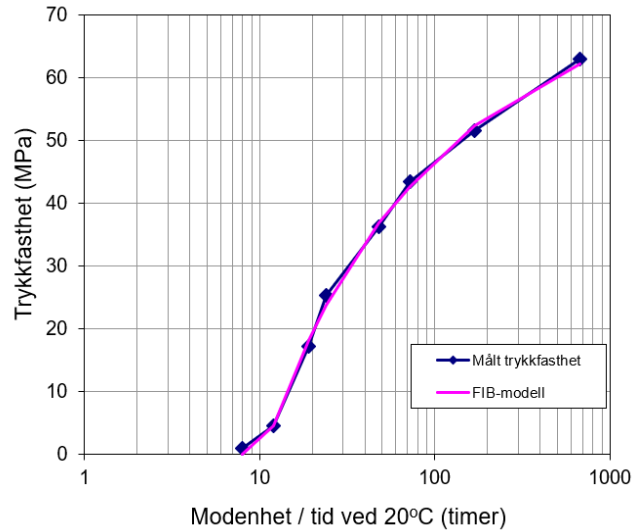
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{y+1}
0,33	8,0	0	1,0	-	-
0,50	12	4,7	4,7	1	0,0
0,79	19	18,2	17,3	1	0,9
1,00	24	23,8	25,4	1	2,3
2,00	48	36,9	36,3	1	0,4
3,00	72	42,8	43,4	1	0,4
7,00	168	52,3	51,6	1	0,5
28,00	672	62,2	63,0	1	0,6

f_{c28}	62,3
s	0,16
t_0	9,60
$\Sigma \Delta y^2$	5
R^2	0,9990

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Figur 6.7: Regneark for beregning av fasthetsfunksjon benyttet for å finne parametrene f_{c28} , s og t_0 . Eksempel på betong uten tilsetningsmateriale og god tilpassning av FIB-modellen for hele herdeforløpet.

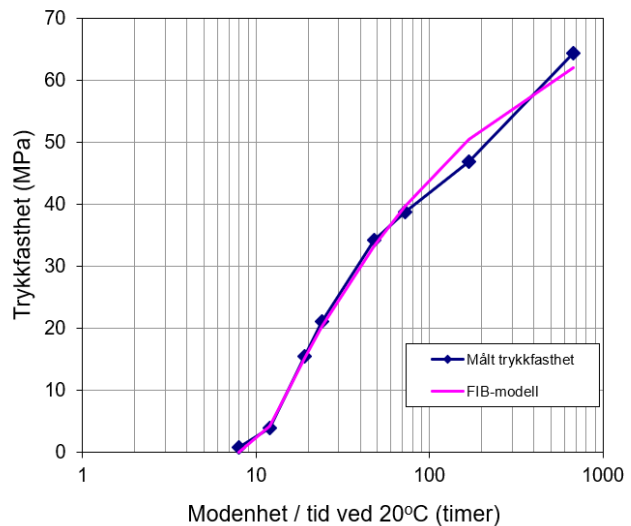
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{y+1}
0,33	8,0	0	0,9	-	-
0,50	12	4,3	4,0	5	0,3
0,79	19	15,2	15,5	5	0,5
1,00	24	20,3	21,1	1	0,6
2,00	48	33,4	34,2	1	0,7
3,00	72	39,7	38,8	1	0,9
7,00	168	50,4	47,0	1	12,0
28,00	672	62,0	64,5	1	5,9

f_{c28}	62,1
s	0,20
t_0	8,83
$\Sigma \Delta y^2$	21
R^2	0,9959

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Figur 6.8: Regneark for beregning av fasthetsfunksjon benyttet for å finne parametrene f_{c28} , s og t_0 . Eksempel på betong med 35% FA og dårlig tilpassning av FIB-modellen etter 40 MPa.

6.11 Aktiveringsenergi

Til beregning av aktiveringsenergi brukes dataene fra temperaturloggeren (Testo), som plasseres i terninger. Dataene videreføres til et eget Excel regnearket kalt «Aktiveringsenergi» gitt av Sverre Smeplass. Videreførte dataene fra temperaturloggeren, samt trykkfasthetsresultater fra terninger trykket ved ulike tidspunkter registreres i Aktiveringsenergi regnearket for å bestemme A og B konstanter. Videre beregnet A og B konstanter legges inn i formlene 3.13 og 3.14 gitt i delkapittelet 3.7 for å regne ut aktiveringsenergi i forskjellige temperaturer. Det er viktig å nevne at når ulike temperaturer overføres fra loggen til Aktiveringsenergi regnearket, skal det tas hensyn til start temperatur fra fersk betong så frem til at betongen har oppnådd vannets temperatur i 5 °C, 20°C og 35°C vannbad. Dette er for å få mer nøyaktigere verdier ut av regnearket. I tillegg beregnes

hastighetsfunksjonen basert på aktiveringsenergi resultatene, og ved bruk av formelen 3.12 gitt i kapittel 3.7.

Automatisk vs. manuell tilpasning

For A og B konstanter gjøres det to tilpasninger: automatisk og manuelle tilpasninger. Den automatiske tilpasningen gjøres på hele datasettet fra temperaturloggeren, og trykkfasthetsresultater ved ulike tidspunkter inn i aktiveringsenergi Excel regnearket som vist i figur 6.9. For manuell tilpasning finnes A og B som best mulig representerer temperaturfølsomheten i tidlig fase, opp til betongene har oppnådd omtrent 25 MPa, se figur 6.10. Videre gjøres det sammenligning av de manuelle beregnet A og B konstanter i forhold til de automatiske verdiene. A og B konstanter ved manuell tilpasning skal brukes som inndata for HETT²², mens de automatiske verdiene, samt for noen av betongseriene trendlinjen til de automatiske verdiene, brukes i herdekasse regnearket for beregning av varmfunksjonsparametere.

Som det er nevnt over bergetes det også aktiveringsenergien ved bruk av automatisk tilpasning av A og B konstanter. Resultatet av aktiveringsenergien følger ikke med i resultat kapittelet. Men en sammenligning av A og B konstanter funnet ved begge metodene vil bli presentert i resultat kapittelet og diskutert i diskusjonskapittelet. Som tidligere nevnt brukes A og B ved automatisk tilpasning i Herdekasse regnearket. Dette er for å få en best mulig tilpasning av varmfunksjonen for hele herdeforløpet. Resultater av aktiveringsenergien ved automatisk tilpasning av A og B konstanter i form av tabell med tilhørende aktiveringsenergi i form av figurer gis i vedlegg 12.5.

Tilpasning av aktiveringsenergi

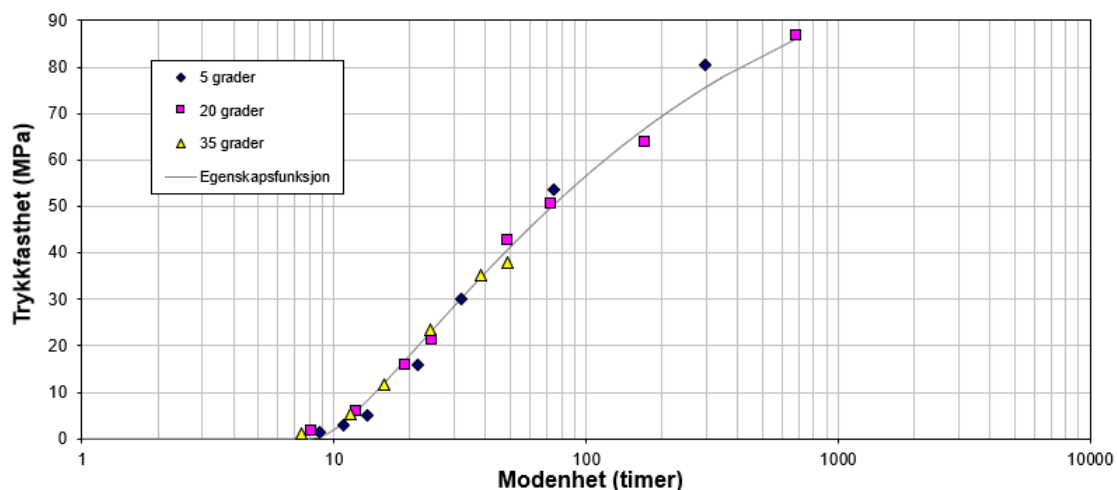
Prosjekt:	HETT 22
Forsøksid.:	ANL FA -B45 - 40 REF
Dato:	26.04.2023
Ansvarlig:	Master studenter

Konstanter	
A	35655
B	133

Tilpass: ctrl+t

Egenskapsfunksjon	
f_c	86,1
s	0,2
t_0	7,5

Kvadratsumsavvik	
5 grader	59,1
20 grader	19,9
35 grader	12,6



Figur 6.9: Aktiveringsenergi regneark hvor A og B er beregnet ved automatisk tilpasning.

Tilpasning av aktiveringsenergi

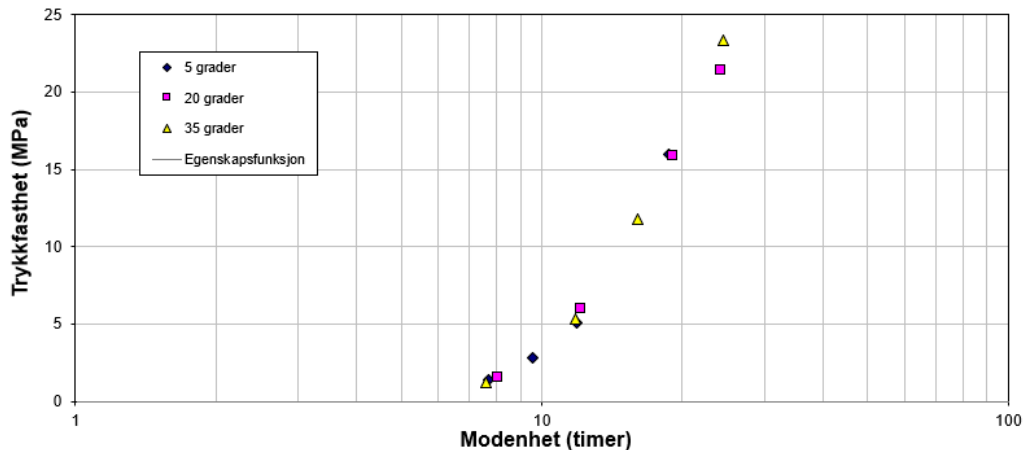
Prosjekt:	HETT 22
Forsøksid.:	ANL FA -B45 - 40 REF
Dato:	26.04.2023
Ansvarlig:	Master studenter

Konstanter	
A	37000
B	450

Tilpass: ctrl+t

Egenskapsfunksjon	
f_c	
s	0,2
t_0	7,5

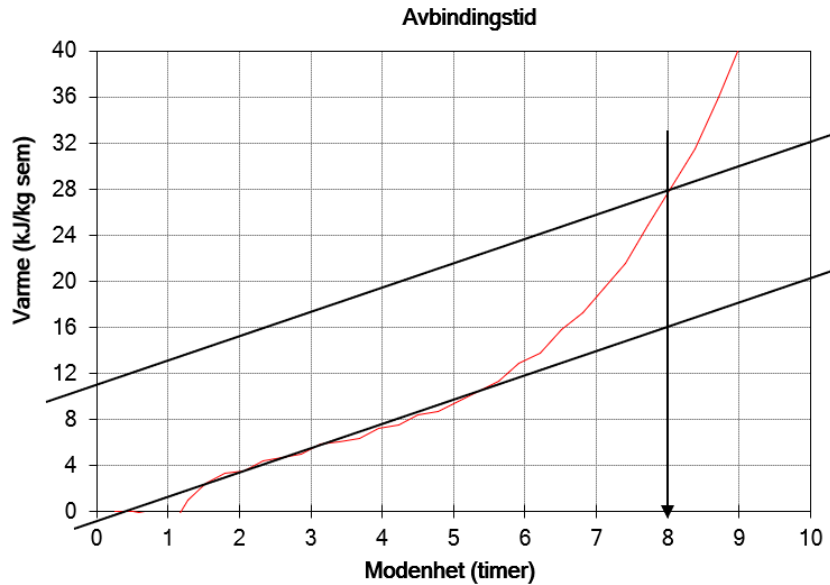
Kvadratsumsavvik	
5 grader	10526,1
20 grader	16746,3
35 grader	11713,5



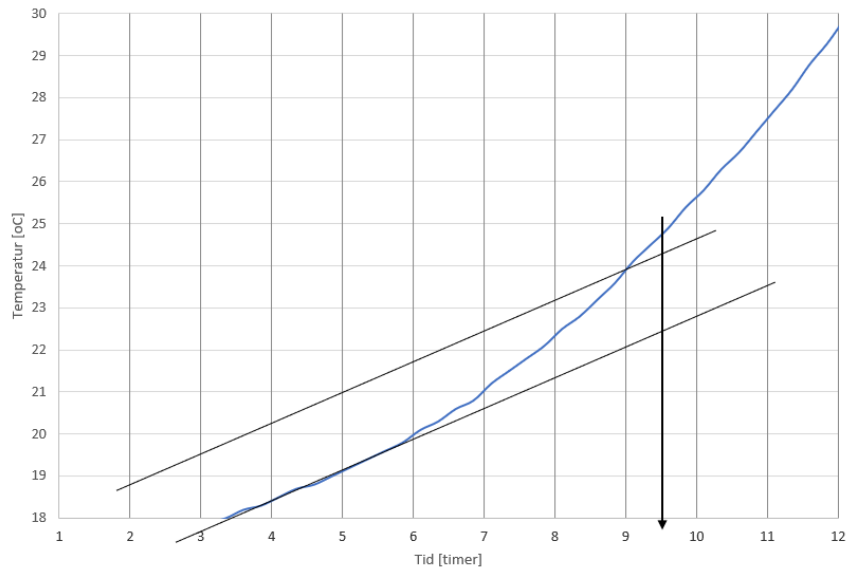
Figur 6.10: Aktiveringsenergi regneark hvor A og B er beregnet ved manuell tilpasning.

6.12 Avbindingstid

Avbindingstiden er funnet ved hjelp av to metoder: 12 kJ-metoden og 2 °C-metoden. 12 kJ-metoden benyttes i samme regneark som herdekasse, og bruker resultatene fra herdekasse målingene til å regne ut avbindingstiden. Denne metoden tar hensyn til modenhetstid og varmeutviklingen i betongen. 2 °C-metoden benytter temperaturmålingene fra terningene og tar kun hensyn til temperaturutviklingen og tid i timer. Sistnevnte metode benyttes mest i bransjen i dag. Grunnen til det er at den er en enkel metode, som er lett for betongprodusentene og dokumentere og gir et omtrentlig svar, mens 12 kJ-metoden er mer ressurskrevende, men gir nøyaktigere svar. En sammenligning av resultatene fått fra begge metodene vil bli gjort i diskusjonskapittelet. Videre brukes resultatene fra 2 °C-metoden som inndata i HETT²². Figur 6.11 viser et eksempel av 12 kJ-metoden og figur 6.12 viser et eksempel av 2 °C-metoden.



Figur 6.11: Avbindingstid ved 12 kJ-metoden.



Prøve	Avbindingstid
Provenavn	9.5

Figur 6.12: Avbindingstid ved 2°C-metoden.

6.13 HETT²² simulering

Simulering i HETT²² gjøres for å undersøke betongenes egenskapsutvikling i en reel konstruksjon. Simuleringen ble gjort for lavkarbonbetonger i klassene B (REF), A (35%FA) og Pluss (35%FA 11%S) med betongkvaliteten B45 M40, under følgende betingelser. Resultatet fra HETT²² simuleringen diskuteres i kapittel 8.5.

- 25 cm tykk vegg.
- Forskalingstype finer 19 mm.
- Avforskalingstidspunkt ved 5 MPa.
- Vind på 2 m/s.
- To forskjellige luft og betong temperaturer:

- 20 °C lufttemperatur og 20 °C fersk betongtemperatur.
- 5 °C lufttemperatur og 15 °C fersk betongtemperatur.

6.14 Kvalitetssikring av utførelse

For sikre kvaliteten på utførelsen av betongreseptene som ble beskrevet tidligere, ble det gjort en rekke tiltak. For det første ble det gjort repetisjon av noen av reseptene (resept nr. 1 og 2, og resept nr. 9 og 17) for å sikre nøyaktigheten av resultatene. Dette var spesielt viktig når det gjaldt tester som kunne forårsake konsistens og styrken til betongen. Resept nr. 17 var en forbedret resept av resept nr. 9 for å få bedre konsistens. Ved å gjøre repetisjon av de nevnte testene, ble det mulig å redusere risikoen for feil og unøyaktigheter i resultatene.

Videre for å sikre varmeutviklingsresultatene fra 15-liters herdekasser, ble det to kubikk kasse herdekasser. 15 liter herdekasse forsøk ble utført i laboratoriet i henhold til NS 3657 måling av varmeutvikling, som er beskrevet i delkapittel 6.8.2. Kubikk herdekasse forsøk ble utført hos Heidelberg Materials Betong Norge, betongfabrikken ved Nenset, i henhold til Statens vegvesen N400.

I tillegg ble ansvaret for utførelsen av de forskjellige testene delt likt mellom alle medlemmene i gruppen. Dette bidro til å sikre at ingen av medlemmene i gruppen hadde en uforholdsmessig stor innvirkning på resultatene. Videre ble hver test utført av samme person hver gang for å redusere variasjoner i utførelsen av testene. Alt i alt ble det gjort en betydelig innsats for sikre kvaliteten på utførelsen av betongreseptene. Dette var avgjørende for å sikre at resultatene var pålitelige og kunne brukes til å evaluere de forskjellige reseptene og bestemme deres egnethet for ulike bruksområder. Det samme gjelder også egenskapsfunksjonene som temperaturfølsomhet, varme- og fasthetsutvikling i de forskjellige resepter.

7. Resultat

Funnene til de ulike bindemidler i betongen som følge av temperaturfølsomhet, fasthets- og varmeutvikling er gitt i dette kapittelet. Forskning av ulike kategorier som sementtyper bestandighetsklasser, silikastøv og flygeaske, samt lavkarbonklasser verdier basert på kunnskapsbakgrunn er inkludert.

7.1 Fersk betongegenskaper

Tabell 7.1 viser de ferske betongegenskapene for hver resept. Hver resept ble gjennomført i to satser, blandesats 1 på morgenen og blandesats 2 på ettermiddag.

Tabell 7.1: Fersk betongegenskaper av 19 resepter og begge blandesatsene.

Res.nr.	Blandesats	Synk [mm]	Utbredelse [mm]	Luft [%]	Fersk densitet [kg/m ³]
1	1	220	400	1,3	2353
	2	210	365	1,1	2347
2	1	210	320	1,5	2420
	2	220	365	1,3	2416
3	1	235	400	1,0	2410
	2	235	400	1,0	2416
4	1	230	395	0,9	2403
	2	230	405	0,9	2397
5	1	210	360	1,0	2391
	2	220	365	1,1	2397
6	1	190	320	1,4	2403
	2	195	315	1,3	2416
7	1	225	400	0,8	2402
	2	235	385	1,0	2391
8	1	235	380	0,9	2353
	2	235	405	1,0	2359
9	1	180	275	1,1	2410
	2	190	295	1,5	2410
10	1	220	355	1,3	2422
	2	230	385	1,1	2441
11	1	240	410	1,1	2402
	2	245	440	1,2	2383
12	1	230	365	1,3	2422
	2	225	352	1,3	2422
13	1	220	375	1,2	2416
	2	210	355	1,2	2422
14	1	235	390	1,3	2403
	2	235	390	1,3	2403
15	1	250	470	0,8	2448
	2	245	525	0,9	2454
16	1	235	380	1,4	2429

	2	230	385	1,4	2422
17	1	230	390	1,4	2422
	2	230	390	1,6	2422
18	1	240	420	1,4	2404
	2	240	420	1,4	2404
19	1	235	415	1,3	2404
	2	230	390	1,5	2378

7.2 Temperaturfølsomhet

Resultater av A og B konstanter er funnet for variablene sementtyper, flygeaske, silikastøv, bestandighetsklasser og lavkarbonklasser med tilhørende aktiveringsenergi $E(\theta)$ og hastighetsfunksjoner $H(\theta)$. For aktiveringsenergien og hastighetsfunksjonen presenteres det kun resultater fra de manuelle tilpasninger. Resultatene av A og B konstanter som presenteres i dette kapitlet er både fra manuelle og automatiske tilpasninger. Den automatiske tilpasningen er beregnet ettersom de brukes av betongbransjen. Den manuelle tilpasningen er beregnet ettersom de viser en bedre tilpasning i tidlig herdeforløp, og skal benyttes som inndata til HETT²². For silikastøv og flygeaske inkludert manuelle og automatiske A og B konstanter, presenteres det også A og B fra lineær trendlinje manuelle og lineær trendlinje automatisk tilpasninger. Resultater av aktiveringsenergi $E(\theta)$ fra de automatiske tilpasninger, som brukes hovedsakelig i betongbransjer er gitt i vedlegg 12.5. Videre er resultatene i form av figurer diskutert i diskusjonskapitlet delkapittel 8.2.

7.2.1 Sementtype

Tabell 7.2 viser resultater fra resept nr. 1, 6 og 15 for sementtyper med tilhørende A og B konstanter. Sementtypene er ANL FA (15% flygeaske), STD FA (18% flygeaske) og IND (0% flygeaske). A-manuelt og B-manuelt er A og B konstanter fra de manuelle tilpasningene. A-automatisk og B-automatisk er A og B konstanter fra de automatiske tilpasningene ved bruk av «Ctrl+t» fra aktiveringsenergi regnearket.

Tabell 7.2: A og B konstanter for resept nr. 1, 6 og 15.

Resept nr.	Sementtyper	A-manuelt	B-manuelt	A-automatisk	B-automatisk
		[J/mol]	[J/mol]	[J/mol]	[J/mol]
15	ANL FA	37000	450	35655	133
1	STD FA	33000	700	29410	811
6	IND	32000	1250	35844	708

Tabell 7.3 presenterer aktiveringsenergi resultater som trengs for å sette i gang reaktiviteten i betong for resept nr. 1, 6 og 15. Resultatene er fra temperatur 0 til 40 °C, hvor den viser aktiveringsenergi for hver resept i forskjellige temperatur nivåer.

Tabell 7.3: Aktiveringsenergi for resept nr. 1, 6 og 15.

Temperatur (θ) °C	Aktiveringsenergi $E(\theta)$ [J/mol]		
	Resept nr. (15)	Resept nr. (1)	Resept nr. (6)
0	46000	47000	57000
5	43750	43500	50750
10	41500	40000	44500

15	39250	36500	38250
20	37000	33000	32000
25	37000	33000	32000
30	37000	33000	32000
35	37000	33000	32000
40	37000	33000	32000

Tabell 7.4 viser resultatene av hastighetsfunksjonen for forskjellige sementtyper fra temperatur 0 til 40 °C.

Tabell 7.4: Hastighetsfunksjon for sementtyper.

Temperatur (θ) °C	Hastighetsfunksjon H (θ) [-]		
	STDFA	IND	ANLFA
0	0,24	0,18	0,25
5	0,38	0,32	0,38
10	0,56	0,52	0,55
15	0,77	0,76	0,76
20	1,00	1,00	1,00
25	1,26	1,25	1,29
30	1,56	1,54	1,65
35	1,93	1,90	2,10
40	2,38	2,31	2,64

7.2.2 Flygeaske

Tabell 7.5 presenterer resultater av A og B konstanter for reseptene 1 (referanse betong), 10, 16 og 9 med økende mengde flygeaskeinnhold gitt i prosent. A og B konstanter er fra manuell, automatisk, lineær trendlinje automatisk og lineær trendlinje manuell tilpasning. A og B konstanter fra lineær trendlinje både for manuelle og automatiske tilpasningen, er beregnet ved bruk av enhetsformelen som er gitt i figur 8.5 og 8.6 del kapittel 8.2.2.

Tabell 7.5: A og B konstanter for betong med økende flygeaskeinnhold gitt i prosent.

Resept Nr.	Flygeaskeinnhold i %	Manuell tilpasning [J/mol]		Automatisk tilpasning [J/mol]		Trendlinje manuell tilpasning [J/mol]		Trendlinje automatisk tilpasning [J/mol]	
1	REF	A	33000	A	29410	A	33000	A	29900
		B	700	B	811	B	700	B	820
10	25% FA	A	33300	A	32191	A	33300	A	31200
		B	650	B	652	B	660	B	690
16	30% FA	A	33400	A	32233	A	33500	A	32500
		B	640	B	664	B	600	B	570
9 /17	35% FA	A	33800	A	33683	A	33800	A	33800
		B	550	B	391	B	570	B	440

Videre viser tabell 7.6 resultater av aktiveringsenergi som trengs for betonger til å sette i gang hydratasjonsprosessen, ettersom betongene inneholder forskjellige mengde flygeaskeinnhold. Resultatene er for resept nr. 1, (9-17), 10 og 16 med varierende temperatur fra 0 til 40 °C. Resept (9-17) som vist i tabell 7.6 presenterer middel verdi av resept nr. 9 og 17.

Tabell 7.6: Aktiveringsenergi for betonger med økende flygeaskeinnhold.

Temperatur (θ) °C	Aktiveringsenergi E(θ) [J/mol]			
	Resept nr. (1)	Resept nr. (10)	Resept nr. (16)	Resept nr. (9/17)
0	47000	46300	46200	44800
5	43500	43050	43000	42050
10	40000	39800	39800	39300
15	36500	36550	36600	36550
20	33000	33300	33400	33800
25	33000	33300	33400	33800
30	33000	33300	33400	33800
35	33000	33300	33400	33800
40	33000	33300	33400	33800

Tabell 7.7 viser resultatene av hastighetsfunksjonen for betonger med økende flygeaskeinnhold gitt i prosent fra temperatur 0 til 40 °C.

Tabell 7.7: Hastighetsfunksjon for betonger med økende flygeaskeinnhold.

Temperatur (θ) °C	Hastighetsfunksjon H (θ) [-]			
	REF	25%FA	30%FA	35%FA
0	0,24	0,25	0,25	0,26
5	0,38	0,39	0,39	0,39
10	0,56	0,56	0,56	0,57
15	0,77	0,77	0,77	0,77
20	1,00	1,00	1,00	1,00
25	1,26	1,26	1,26	1,26
30	1,56	1,57	1,57	1,58
35	1,93	1,95	1,95	1,97
40	2,38	2,40	2,40	2,43

7.2.3 Silikastøv

Tabell 7.8 viser resultater fra resept nr. 10, 12, 13 og 14 med økende mengde silikastøvinnehold i betongen gitt i prosent med tilhørende verdier av A og B konstanter. A og B konstantene i tabellen er fra manuell, automatisk og lineær trendlinje tilpasning manuell. Lineær trendlinje manuell og lineær trendlinje automatisk tilpasningen, er beregnet ved bruk av enhetsformelen som er gitt i figur 8.9 og 8.10 del kapittel 8.2.3.

Tabell 7.8: A og B konstanter for betonger med økende silikastøvinnehold gitt i prosent.

Res. Nr.	Silikastøvinnehold i %	Manuell tilpasning	Automatisk tilpasning	Trendlinje tilpasning manu.	Trendlinje tilpasning auto.
-------------	---------------------------	-----------------------	--------------------------	--------------------------------	--------------------------------

		[J/mol]		[J/mol]		[J/mol]		[J/mol]	
10	0% S	A	33300	A	32191	A	33400	A	31700
		B	650	B	652	B	650	B	650
12	4% S	A	34000	A	32790	A	33900	A	33100
		B	680	B	664	B	690	B	690
13	8% S	A	33400	A	33527	A	34500	A	34400
		B	700	B	793	B	740	B	740
14	11% S	A	35000	A	36398	A	35000	A	35700
		B	750	B	754	B	780	B	780

Tabell 7.9 er resultater av aktiveringsenergi for å sette i gang reaktiviteten i betongen for resept nr. 10, 12, 13, og 14 med bruk av forskjellige prosent andel silikastøvinnhold i betongen.

Tabell 7.9: Aktiveringsenergi for betonger med økende silikastøvinnhold.

Temperatur (θ) °C	Aktiveringsenergi E(θ) [J/mol]			
	Resept nr. (10)	Resept nr. (12)	Resept nr. (13)	Resept nr. (14)
0	46300	47600	48400	50000
5	43050	44200	44900	46250
10	39800	40800	41400	42500
15	36550	37400	37900	38750
20	33300	34000	34400	35000
25	33300	34000	34400	35000
30	33300	34000	34400	35000
35	33300	34000	34400	35000
40	33300	34000	34400	35000

Tabell 7.10 viser resultater hastighetsfunksjonen for betonger med økende silikastøvinnhold gitt i prosent fra 0 til 40 °C.

Tabell 7.10: Hastighetsfunksjon for betonger med økende silikastøvinnhold.

Temperatur (θ) °C	Hastighetsfunksjon H (θ) [-]			
	0%S	4%S	8%S	11%S
0	0,25	0,24	0,23	0,22
5	0,39	0,38	0,37	0,36
10	0,56	0,55	0,55	0,54
15	0,77	0,77	0,76	0,76
20	1,00	1,00	1,00	1,00
25	1,26	1,26	1,27	1,27
30	1,57	1,59	1,59	1,61
35	1,95	1,97	1,99	2,01
40	2,40	2,44	2,47	2,50

7.2.4 Bestandighetsklasser

Tabell 7.11 viser resultater av A og B konstanter fra resept nr. 1, 3, 4 og 5 ved ulike bestandighetsklasser.

Tabell 7.11: A og B konstanter for betonger ved ulike bestandighetsklasser.

Resept nr.	Bestandighetsklasser	A-manuelt [J/mol]	B-manuelt [J/mol]	A-automatisk [J/mol]	B-automatisk [J/mol]
1	M40	33000	700	29410	811
3	M45	31200	1000	31193	690
4	M60	29000	1250	29278	1027
5	M90	27500	1600	30808	1082

Videre viser tabell 7.12 aktiveringsenergi, som trengs for å sette i gang reaktiviteten i betongen. Dette gjelder betonger med overnevnte ulike bestandighetsklasser.

Tabell 7.12: Aktiveringsenergi for betonger ved ulike bestandighetsklasser.

Temperatur (θ) °C	Aktiveringsenergi $E(\theta)$ [J/mol]			
	Resept nr. (1)	Resept nr. (3)	Resept nr. (4)	Resept nr. (5)
0	47000	51200	54000	59500
5	43500	46200	47750	51500
10	40000	41200	41500	43500
15	36500	36200	35250	35500
20	33000	31200	29000	27500
25	33000	31200	29000	27500
30	33000	31200	29000	27500
35	33000	31200	29000	27500
40	33000	31200	29000	27500

Tabell 7.13 viser resultater av hastighetsfunksjonen for betonger ved ulike bestandighetsklasser fra temperatur 0 til 40 °C.

Tabell 7.13: Hastighetsfunksjon for betonger ved ulike bestandighetsklasser.

Temperatur (θ) °C	Hastighetsfunksjon $H(\theta)$ [-]			
	M40	M45	M60	M90
0	0,24	0,21	0,20	0,17
5	0,38	0,36	0,35	0,32
10	0,56	0,55	0,55	0,53
15	0,77	0,77	0,78	0,78
20	1,00	1,00	1,00	1,00
25	1,26	1,24	1,22	1,21
30	1,56	1,53	1,48	1,45
35	1,93	1,87	1,79	1,73
40	2,38	2,27	2,14	2,06

7.2.5 Lavkarbonbetong

Dette delkapittelet tar for seg resultater av lavkarbonklasser som er kategorisert i forhold til lavkarbonklasser av A, B og Pluss, samt ulike bestandighetsklasser.

Lavkarbonbetonger med B30-M90 betongkvalitet

Tabell 7.14 tar for seg resultater av lavkarbonklasse (B30-M90 betong) for resept nr. 5, 7 og 8 med tilhørende A og B konstanter.

Tabell 7.14: A og B konstanter for lavkarbonklasse (B30-M90 betong).

Resept nr.	Lavkarbonklasse (B30-M90)	A-manuelt [J/mol]	B-manuelt [J/mol]	A-automatisk [J/mol]	B-automatisk [J/mol]
5	Lavkarbon A REF.	27500	1600	30808	1082
7	Lavkarbon A 35%FA	34200	600	40266	282
8	Lavkarbon Pluss 35%FA-11%S	37500	450	53440	-180

Tabell 7.15 viser videre aktiveringsenergi som skal til for å sette i gang reaktiviteten i betonger for resept nummer 5, 7 og 8.

Tabell 7.15: Aktiveringsenergi for resept nr. 5, 7 og 8.

Temperatur (θ) °C	Aktiveringsenergi E(θ) [J/mol]		
	Resept nr. (5)	Resept nr. (7)	Resept nr. (8)
0	59500	46200	46500
5	51500	43200	44250
10	43500	40200	42000
15	35500	37200	39750
20	27500	34200	37500
25	27500	34200	37500
30	27500	34200	37500
35	27500	34200	37500
40	27500	34200	37500

Tabell 7.16 viser resultater av hastighetsfunksjonen for lavkarbonklasse (B30-M90 betong) fra temperatur 0 til 40 °C.

Tabell 7.16: Hastighetsfunksjon for lavkarbonklasse (B30-M90 betong).

Temperatur (θ) °C	Hastighetsfunksjon H (θ) [-]		
	Lavkarbon A REF.	Lavkarbon A 35%FA	Lavkarbon Pluss 35%FA-11%S
0	0,17	0,25	0,25
5	0,32	0,38	0,38
10	0,53	0,56	0,54
15	0,78	0,77	0,75
20	1,00	1,00	1,00
25	1,21	1,27	1,29
30	1,45	1,59	1,66

35	1,73	1,98	2,12
40	2,06	2,45	2,67

Lavkarbonbetonger med B30 M60 betongkvalitet

Tabell 7.17 beskriver resultater av lavkarbonklasse (B30-M60 betong), som er for resept nr. 4 og 11 med tilhørende A og B konstanter både fra manuelle og automatiske tilpasninger.

Tabell 7.17: A og B konstanter for lavkarbonklasse (B30-M60 betong).

Res.nr.	Lavkarbonklasse	A-manuelt	B-manuelt	A-automatisk	B-automatisk
		[J/mol]	[J/mol]	[J/mol]	[J/mol]
4	Lavkarbon B REF.	29000	1250	29278	1027
11	Lavkarbon A 35%FA	33400	650	34627	515

Videre viser tabell 7.18 Aktiveringsenergi, som trengs for resept nummer 4 og 11, som trengs for å sette i gang reaktiviteten i betonger ved forskjellige temperaturer.

Tabell 7.18: Aktiveringsenergi for resept nr. 4 og 11.

Temperatur (θ) °C	Aktiveringsenergi E(θ) [J/mol]	
	Resept nr. (4)	Resept nr. (11)
0	54000	46400
5	47750	43150
10	41500	39900
15	35250	36650
20	29000	33400
25	29000	33400
30	29000	33400
35	29000	33400
40	29000	33400

Tabell 7.19 viser resultater av hastighetsfunksjonen for lavkarbonklasse (B30-M60 betong) fra temperatur 0 til 40 °C.

Tabell 7.19: Hastighetsfunksjon for lavkarbonklasse (B30-M60 betong).

Temperatur (θ) °C	Hastighetsfunksjon H (θ) [-]	
	Lavkarbon B REF.	Lavkarbon A 35%FA
0	0,20	0,25
5	0,35	0,38
10	0,55	0,56
15	0,78	0,77
20	1,00	1,00
25	1,22	1,26
30	1,48	1,57
35	1,79	1,95
40	2,14	2,40

Lavkarbonbetonger med B35 M45 betongkvalitet

Tabell 7.20 presenterer resultater av A og B konstanter for lavkarbonklasse (B35-M45 betong). Tabellen inkluderer reseptene 3 og 19, hvor en sammenligning blir gjort mellom lavkarbon B referanse betong og lavkarbon Pluss med 35% flygeaske og 11% silikastøv. Verdiene av A og B konstantene er både for manuelle og automatiske tilpasninger.

Tabell 7.20: A og B konstanter for lavkarbonklasse (B35-M45 betong).

Resept nr.	Lavkarbonklasse (B35-M45)	A-manuelt	B-manuelt	A-automatisk	B-automatisk
		[J/mol]	[J/mol]	[J/mol]	[J/mol]
3	Lavkarbon B REF.	31200	1000	31193	690
19	Lavkarbon Pluss 35%FA-11%S	33000	600	44180	305

Tabell 7.21 presenterer resultatene for aktiveringsenergi for betongreaktiviteten ved ulike temperaturer. Målte aktiveringsenergien er for resept nummer 3 og 19. Resultatene viser variasjon i aktiveringsenergien mellom 0 og 20 °C, mens tallene forblir konstante ved høyere temperaturer.

Tabell 7.21: Aktiveringsenergi for lavkarbonklasse (B35-M45 betong).

Temperatur (θ) °C	Aktiveringsenergi E(θ) [J/mol]	
	Resept nr. (3)	Resept nr. (19)
0	51200	45000
5	46200	42000
10	41200	39000
15	36200	36000
20	31200	33000
25	31200	33000
30	31200	33000
35	31200	33000
40	31200	33000

Tabell 7.22 viser resultater av hastighetsfunksjonen for lavkarbonklasse (B35-M45 betong) fra temperatur 0 til 40 °C.

Tabell 7.22: Hastighetsfunksjon for lavkarbonklasse (B35-M45 betong).

Temperatur (θ) °C	Hastighetsfunksjon H (θ) [-]	
	Lavkarbon B REF.	Lavkarbon Pluss 35%FA-11%S
0	0,21	0,26
5	0,36	0,39
10	0,55	0,57
15	0,77	0,77
20	1,00	1,00
25	1,24	1,26
30	1,53	1,56
35	1,87	1,93
40	2,27	2,38

Lavkarbonbetonger med B45 M40 betongkvalitet

Tabell 7.23 viser resultater av A og B konstanter for lavkarbonklasse (B45-M40 betong), og gjelder reseptene 1, 17 og 18. I tabell 7.23 ser en høyest A konstant for lavkarbon Pluss og minst B konstant for både den manuelle og automatiske tilpasninger. Videre viser resultatet at lavkarbon A har mindre A konstant, og høyere B konstant i forhold til lavkarbon B som er en referanse betong.

Tabell 7.23: A og B konstanter for lavkarbonklasse (B45-M40 betong).

Resept nr.	Lavkarbonklasse (B45-M40)	A-manuelt [J/mol]	B-manuelt [J/mol]	A-automatisk [J/mol]	B-automatisk [J/mol]
1	Lavkarbon B REF.	33000	700	29410	811
(9-17)	Lavkarbon A 35%FA REP.	33800	550	33683	391
18	Lavkarbon Pluss 35%FA-11%S	36000	500	42551	331

I tillegg viser tabell 7.24 tilhørende resultater av aktiveringsenergien for reseptene 1, (9-17) og 18 fra lavkarbonklasse (B45-M40 betong). Aktiveringsenergien er fra temperatur 0 til 40 °C. Det er gitt videre at aktiveringsenergien minker i midten og blir konstant mot slutten.

Tabell 7.24: Aktiveringsenergi for lavkarbonklasse (B45-M40 betong).

Temperatur (θ) °C	Aktiveringsenergi E(θ) [J/mol]		
	Resept nr. (1)	Resept nr. (9-17)	Resept nr. (18)
0	47000	44800	46000
5	43500	42050	43500
10	40000	39300	41000
15	36500	36550	38500
20	33000	33800	36000
25	33000	33800	36000
30	33000	33800	36000
35	33000	33800	36000
40	33000	33800	36000

Tabell 7.25 viser resultater av hastighetsfunksjonen for lavkarbonklasse (B45-M40 betong) fra temperatur 0 til 40 °C.

Tabell 7.25: Hastighetsfunksjon for lavkarbonklasse (B45-M40 betong).

Temperatur (θ) °C	Hastighetsfunksjon H (θ) [-]		
	Lavkarbon B REF.	Lavkarbon A 35% FA REP.	Lavkarbon Pluss 35%FA-11%S
0	0,24	0,26	0,25
5	0,38	0,39	0,38
10	0,56	0,57	0,55
15	0,77	0,77	0,76
20	1,00	1,00	1,00
25	1,26	1,26	1,28

30	1,56	1,58	1,63
35	1,93	1,97	2,05
40	2,38	2,43	2,57

7.3 Fasthetsutvikling

I dette kapittelet blir resultatene fra trykkfasthet presentert i form av tabeller, i tillegg presenteres parameterne for fasthetsfunksjon som skal plottes i HETT²². Resultatene for trykkfasthet kommer fra terningene som er herdet i ulike vanntemperaturer. Hver serie har fått sine tabeller for både trykkfasthet og fasthetsfunksjon. Det er kun resultatene for fasthetsfunksjons-regnearket som brukes videre for diskusjon delen, og fasthetsparametere funnet ved bruk av aktiveringsenergi regnearket var kun til hensyn for sammenligning av begge metodene. Det ble bestemt at resultatene fra fasthetsfunksjons-regnearket gir mer nøyaktige verdier, derfor brukes denne metoden videre i diskusjonsdelen.

7.3.1 Sementtype

Tabell 7.26 Presenterer resultater for trykkfasthet for de ulike sementtypene ved forskjellige tid og temperaturer. Tiden (t) indikerer timer og tiden (d) indikerer dager og temperaturene defineres i °C. Dette gjelder reseptene 1 (STD FA), 6 (IND) og 15 (ANL FA).

Tabell 7.26: Trykkfasthet for betonger med ulike sementtyper, testet ved ulike temperaturer og tider.

Resept nr.	Tid °C	4t	6t	8t	12t	19t	24t	30t	2d	3d	7d	28d
1. STD FA	5 °C	-	-	-	-	1,0	2,3	5,2	21,7	38,6	57,0	72,2
	20 °C	-	-	0,9	5,1	24,1	30,7	-	47,3	53,9	62,0	74,3
	35 °C	0,4	3,9	12,4	28,6	38,3	40,1	-	-	-	-	76,1
6. IND	5 °C	-	-	-	-	2,9	6,4	14,9	40,3	57,4	73,6	81,5
	20 °C	-	-	4,3	22,3	46,4	51,1	-	62,7	66,1	72,3	78,3
	35 °C	2,1	18,7	35,0	45,9	53,3	55,6	-	-	-	-	76,3
15. ANL FA	5 °C	-	-	-	-	1,4	2,8	5,1	16,0	30,0	53,7	80,4
	20 °C	-	-	1,6	6,0	15,9	21,4	-	42,7	50,6	63,8	86,9
	35 °C	1,2	5,4	11,8	23,4	35,3	37,9	-	-	-	-	91,2

Tabell 7.27 Presenterer resultater for f_{c28} , s og t_0 ved metodene aktiveringsenergi regneark og fasthetsfunksjon regneark for de ulike sementtypene. Reseptene som ble benyttet i denne tabellen består av 1 (STD FA), 6 (IND) og 15 (ANL FA).

Tabell 7.27: f_{c28} , s og t_0 beregnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for sementserien.

Resept nr.	Fasthetsfunksjon parametere beregnet						Målt verdi for 20 °C
	Ved aktiveringsenergi regneark			Ved fasthetsfunksjon regneark			
	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]
1. STD FA	73,9	0,14	10,29	73,9	0,14	10,26	74,3
6. IND	78,0	0,07	10,15	77,8	0,07	10,18	78,3

15. ANL FA	86,1	0,25	7,50	89,4	0,26	7,11	86,9
-------------------	------	------	------	------	------	------	------

7.3.2 Flygeaske

Tabell 7.28 presenterer resultater for trykkfasthet for de ulike flygeaskeinnhold ved ulike tidspunkter (t) timer og (d) dager og temperaturene 5 °C, 20 °C og 35 °C. Dette gjelder reseptene 1 (REF), 10 (25% FA), 16 (30% FA) og 9/17 (35% FA). Resultater for resepten 9/17 er et middel verdig av resultatene for resept 9/17.

Tabell 7.28: Trykkfasthet for betonger med ulike flygeaskeinnhold ved ulike temperaturer °C og tider.

Resept nr.	Tid → °C ↓	4t	6t	8t	12t	19t	24t	30t	2d	3d	7d	28d
		1. REF	5 °C	-	-	-	-	1,0	2,3	5,2	21,7	38,6
	20 °C	-	-	0,9	5,1	24,1	30,7	-	47,3	53,9	62,0	74,3
	35 °C	0,4	3,9	12,4	28,6	38,3	40,1	-	-	-	-	76,1
10. 25% FA	5 °C	-	-	-	-	0,8	2,0	4,2	16,8	31,6	48,7	65,7
	20 °C	-	-	0,8	4,2	17,8	26,5	-	42,3	47,9	56,5	73,1
	35 °C	0,3	2,3	10,9	24,4	32,9	35,8	-	-	-	-	80,9
16. 30% FA	5 °C	-	-	-	-	0,7	1,8	3,8	16,3	26,4	45,8	62,2
	20 °C	-	-	0,8	4,0	17,2	23,5	-	38,3	44,4	52,2	69,0
	35 °C	0,2	2,4	9,4	21,7	30,4	32,7	-	-	-	-	83,7
9/17. 35% FA	5 °C	-	-	-	-	0,8	1,8	3,7	14,3	24,9	41,1	55,8
	20 °C	-	-	0,8	3,6	15,3	20,6	-	34,1	39,0	47,7	64,9
	35 °C	0,2	2,0	8,4	19,6	27,3	29,9	-	-	-	-	78,4

Tabell 7.29 presenterer resultater for f_{c28} , s og t_0 ved metodene aktiveringsenergi regneark og fasthetsfunksjon regneark for betonger med ulike flygeaskeinnhold. Reseptene som ble benyttet i denne tabellen består av 1 (REF), 10 (25% FA), 16 (30% FA) og 9/17 (35% FA).

Tabell 7.29: f_{c28} , s og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for flygeaskeserien.

Resept nr.	Fasthetsfunksjon parametere beregnet						Målt verdi for 20 °C
	Ved aktiveringsenergi regneark			Ved fasthetsfunksjon regneark			
	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]
1. REF	73,9	0,14	10,29	73,9	0,14	10,26	74,3
10. 25% FA	71,7	0,18	9,71	69,5	0,17	10,06	73,1
16. 30% FA	67,3	0,20	9,30	67,4	0,18	9,55	69,0
9/17. 35% FA	63,1	0,21	8,53	62,7	0,19	9,22	64,9

7.3.3 Silikastøv

Tabell 7.30 presenterer resultater for trykkfasthet for ulike mengde silikastøvinnhold ved ulike tidspunkter, t (timer) og d (dager) og temperaturene 5 °C 20 °C og 35 °C. Dette gjelder reseptene 10 (REF), 12 (4% S), 13 (8% S) og 14 (11% S).

Tabell 7.30: Trykkfasthet for betonger med ulike silikastøvinnehold ved ulike temperaturer °C og tider.

Resept nr.	Tid °C	4t	6t	8t	12t	19t	24t	30t	2d	3d	7d	28d
10. REF	5 °C	-	-	-	-	0,8	2,0	4,2	16,8	31,6	48,7	65,7
	20 °C	-	-	0,8	4,2	17,8	26,5	-	42,3	47,9	56,5	73,1
	35 °C	0,3	2,3	10,9	24,4	32,9	35,8	-	-	-	-	80,9
12. 4% S	5 °C	-	-	-	-	0,8	1,5	3,7	15,1	27,2	43,1	58,3
	20 °C	-	-	0,8	3,6	17,2	23,0	-	37,0	42,5	51,7	70,6
	35 °C	0,4	2,6	9,9	21,2	29,5	33,1	-	-	-	-	78,0
13. 8% S	5 °C	-	-	-	-	0,6	1,3	2,8	12,0	21,6	37,6	52,7
	20 °C	-	-	0,6	3,3	13,9	18,8	-	32,0	37,2	47,9	72,9
	35 °C	0,2	1,7	7,2	18,3	25,4	28,9	-	-	-	-	77,5
14. 11% S	5 °C	-	-	-	-	0,5	1,1	2,3	8,9	18,2	32,1	47,9
	20 °C	-	-	0,5	2,6	11,5	16,0	-	27,4	33,2	43,4	69,5
	35 °C	0,2	1,6	6,0	16,0	23,3	25,5	-	-	-	-	74,2

Tabell 7.31 presenterer resultater for f_{c28} , s og t_0 ved metodene aktiveringsenergi regneark og fasthetsfunksjon regneark for de ulike silikastøvinnehold. Reseptene som ble benyttet i denne tabellen består av 10 (REF), 12 (4% S), 13 (8% S) og 14 (11% S).

Tabell 7.31: f_{c28} , s og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for silikastøvserien.

Resept nr.	Fasthetsfunksjon parametere beregnet						Målt verdi
	Ved aktiveringsenergi regneark			Ved fasthetsfunksjon regneark			for 20 °C
	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]
10. REF	71,7	0,18	9,71	69,5	0,17	10,06	73,1
12. 4% S	68,4	0,20	8,66	66,1	0,19	9,27	70,6
13. 8% S	58,9	0,20	9,28	64,8	0,23	8,22	72,9
14. 11% S	67,3	0,33	3,92	60,0	0,25	7,70	69,5

7.3.4 Bestandighetsklasse

Tabell 7.32 presenterer resultater for trykkfasthet for de ulike bestandighetsklasser (masseforhold) ved ulike tidspunkter, (t) timer og (d) dager og temperaturene 5 °C, 20 °C og 35 °C. Dette gjelder reseptene 1 (M40), 3 (M45), 4 (M60) og 5 (M90).

Tabell 7.32: Trykkfasthet for betonger med ulike bestandighetsklasser ved ulike temperaturer °C og tider.

Resept Nr.	Tid °C	4t	6t	8t	12t	19t	24t	30t	2d	3d	7d	28d
1. M40	5 °C	-	-	-	-	1,0	2,3	5,2	21,7	38,6	57,0	72,2
	20 °C	-	-	0,9	5,1	24,1	30,7	-	47,3	53,9	62,0	74,3
	35 °C	0,4	3,9	12,4	28,6	38,3	40,1	-	-	-	-	76,1
3. M45	5 °C	-	-	-	-	0,7	1,8	3,7	7,4	13,2	23,9	35,0
	20 °C	-	-	1,0	4,7	17,3	25,4	-	36,3	43,4	51,6	63,0
	35 °C	0,3	2,9	9,8	22,3	30,7	33,7	-	-	-	-	68,7

4. M60	5 °C	-	-	-	-	0,5	1,3	2,6	10,0	19,9	34,7	47,9
	20 °C	-	-	0,8	3,5	14,3	18,0	-	28,4	33,0	39,9	50,2
	35 °C	0,3	2,0	7,0	16,2	22,3	24,9	-	-	-	-	56,2
5. M90	5 °C	-	-	-	-	0,5	1,1	2,1	7,4	13,2	23,9	35,0
	20 °C	-	-	0,9	3,3	10,1	13,3	-	20,9	24,2	29,5	38,4
	35 °C	0,4	2,0	5,8	11,3	16,4	18,1	-	-	-	-	44,1

Tabell 7.33 presenterer resultater for f_{c28} , s og t_0 ved metodene aktiveringsenergi regneark og fasthetsfunksjon regneark for de ulike bestandighetsklasser. Reseptene som ble benyttet i denne tabellen består av 1 (M40), 3 (M45), 4 (M60) og 5 (M90).

Tabell 7.33: f_{c28} , s og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for bestandighetserien.

Resept nr.	Fasthetsfunksjon parametere beregnet						Målt verdi for 20 °C
	Ved aktiveringsenergi regneark			Ved fasthetsfunksjon regneark			f_{c28} [MPa]
	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	
1. M40	73,9	0,14	10,29	73,9	0,14	10,26	74,3
3. M45	62,6	0,17	9,59	61,3	0,15	9,86	63,0
4. M60	49,4	0,20	9,20	47,8	0,16	9,64	50,2
5. M90	37,6	0,19	8,12	37,3	0,19	8,07	38,4

7.3.5 Lavkarbonbetong

Lavkarbonbetonger med B45 M40 betongkvalitet

Tabell 7.34 presenterer resultater for trykkfasthet for de ulike lavkarbonklassene B, A og Pluss med bestandighetsklasse M40 ved ulike tidspunkter (t) timer og (d) dager og temperaturene 5 °C, 20 °C og 35 °C. Dette gjelder reseptene 1 (klasse B), 17 (klasse A) og 18 (klasse Pluss).

Tabell 7.34: Trykkfasthet for betonger med ulike lavkarbonklasser ved ulike temperaturer °C og tider.

Resept nr.	Tid °C	4t	6t	8t	12t	19t	24t	30t	2d	3d	7d	28d
		↔										
1. Lavkarbon B	5 °C	-	-	-	-	1,0	2,3	5,2	21,7	38,6	57,0	72,2
	20 °C	-	-	0,9	5,1	24,1	30,7	-	47,3	53,9	62,0	74,3
	35 °C	0,4	3,9	12,4	28,6	38,3	40,1	-	-	-	-	76,1
17. Lavkarbon A	5 °C	-	-	-	-	0,6	1,5	3,2	13,6	24,6	41,6	56,0
	20 °C	-	-	0,7	3,2	15,1	20,2	-	34,0	39,3	48,5	65,3
	35 °C	0,0	1,4	7,3	18,5	27,2	29,7	-	-	-	-	78,9
18. Lavkarbon Pluss	5 °C	-	-	-	-	0,4	0,8	1,8	6,8	13,4	25,2	38,7
	20 °C	-	-	0,4	1,6	7,8	11,0	-	20,3	25,4	35,4	59,6
	35 °C	0,0	1,3	4,3	11,5	16,8	19,9	-	-	-	-	72,9

Tabell 7.35 presenterer resultater for f_{c28} , s og t_0 ved metodene aktiveringsenergi regneark og fasthetsfunksjon regneark for de ulike lavkarbonklassene B, A og Pluss. Reseptene som ble benyttet i denne tabellen består av 1 (klasse B), 17 (klasse A) og 18 (klasse Pluss).

Tabell 7.35: f_{c28} , s og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for B45 M40 lavkarbonbetonger.

Resept nr.	Fasthetsfunksjon parametere beregnet						Målt verdi for 20 °C
	Ved aktiveringsenergi regneark			Ved fasthetsfunksjon regneark			
	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	
1. lavkarbon B	73,9	0,14	10,29	73,9	0,14	10,26	74,3
17. Lavkarbon A	63,1	0,21	8,53	62,7	0,19	9,22	64,9
18. Lavkarbon Pluss	58,2	0,40	1,90	50,6	0,30	6,78	59,6

Lavkarbonbetonger med B35-M45 betongkvalitet

Tabell 7.36 presenterer resultater for trykkfasthet for de ulike lavkarbonklassene B og Pluss med bestandighetsklasse M45 ved ulike tidspunkter (t) timer og (d) dager og temperaturene 5 °C, 20 °C og 35 °C. Dette gjelder reseptene 3 (klasse B) og 19 (klasse Pluss).

Tabell 7.36: Trykkfasthet for betonger med ulike lavkarbonklasse B og Pluss ved ulike temperaturer °C og tider.

Resept nr.	Tid °C	4t	6t	8t	12t	19t	24t	30t	2d	3d	7d	28d
		3. Lavkarbon B	5 °C	-	-	-	-	0,7	1,8	3,7	7,4	13,2
	20 °C	-	-	1,0	4,7	17,3	25,4	-	36,3	43,4	51,6	63,0
	35 °C	0,3	2,9	9,8	22,3	30,7	33,7	-	-	-	-	68,7
19. Lavkarbon Pluss	5 °C	-	-	-	-	0,4	0,7	1,5	5,9	10,4	17,6	28,3
	20 °C	-	-	0,3	1,4	5,8	8,6	-	15,1	18,0	25,9	44,9
	35 °C	0,0	1,0	3,3	7,8	12,6	14,2	-	-	-	-	56,3

Tabell 7.37 presenterer resultater for f_{c28} , s og t_0 ved metodene aktiveringsenergi regneark og fasthetsfunksjon regneark for de ulike lavkarbonklassene B og Pluss med bestandighetsklasse M45. Reseptene som ble benyttet i denne tabellen består av 3 (klasse B) og 19 (klasse Pluss).

Tabell 7.37: f_{c28} , s og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for B35 M45 lavkarbonbetonger.

Resept nr.	Fasthetsfunksjon parametere beregnet						Målt verdi for 20 °C
	Ved aktiveringsenergi regneark			Ved fasthetsfunksjon regneark			
	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	
3. Lavkarbon B	62,6	0,17	9,59	61,3	0,15	9,86	63,0
19. Lavkarbon Pluss	43,8	0,43	-0,14	43,3	0,39	3,48	44,9

Lavkarbonbetonger med B30 M60 betongkvalitet

Tabell 7.38 presenterer resultater for trykkfasthet for lavkarbonklassene B og A med bestandighetsklasse M60 ved ulike tidspunkter (t) timer og (d) dager og temperaturene 5 °C, 20 °C og 35 °C. Dette gjelder reseptene 4 (Klasse B) og 11 (Klasse A).

Tabell 7.38: Trykkfasthet for betonger med lavkarbonklassene B og A ved ulike temperaturer °C og tider.

Resept nr.	Tid → °C ↓	4t	6t	8t	12t	19t	24t	30t	2d	3d	7d	28d
4. Lavkarbon B	5 °C	-	-	-	-	0,5	1,3	2,6	10,0	19,9	34,7	47,9
	20 °C	-	-	0,8	3,5	14,3	18,0	-	28,4	33,0	39,9	50,2
	35 °C	0,3	2,0	7,0	16,2	22,3	24,9	-	-	-	-	56,2
11. Lavkarbon A	5 °C	-	-	-	-	0,4	1,0	2,2	8,2	16,2	29,0	41,4
	20 °C	-	-	0,7	2,7	9,4	13,7	-	24,1	28,3	34,6	49,1
	35 °C	0,2	1,5	5,5	13,3	19,3	20,5	-	-	-	-	60,2

Tabell 7.39 presenterer resultater for f_{c28} , s og t_0 ved metodene aktiveringsenergi regneark og fasthetsfunksjon regneark for de lavkarbonklassene B og A. Reseptene som ble benyttet i denne tabellen består av 4 (Klasse B) og 11 (Klasse A).

Tabell 7.39: f_{c28} , s og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark for B30 M60 lavkarbonbetonger.

Resept nr.	Fasthetsfunksjon parametere beregnet						Målt verdi for 20 °C
	Ved aktiveringsenergi regneark			Ved fasthetsfunksjon regneark			
	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]
4. Lavkarbon B	49,4	0,20	9,20	47,8	0,16	9,64	50,2
11. Lavkarbon A	47,8	0,20	7,70	45,4	0,21	8,93	49,1

Lavkarbonbetonger med B30 M90 betongkvalitet

Tabell 7.40 presenterer resultater for trykkfasthet for lavkarbonklassene A (REF), A (35%F) og Pluss med bestandighetsklasse M90 ved ulike tidspunkter (t) timer og (d) dager og temperaturene 5 °C, 20 °C og 35 °C. Dette gjelder reseptene 5 (klasse A), 7 (klasse A 35% FA) og 8 (Pluss).

Tabell 7.40: Trykkfasthet for betonger med lavkarbon A (REF), A (35% FA) og Pluss ved ulike temperaturer °C og tider.

Resept nr.	Tid → °C ↓	4t	6t	8t	12t	19t	24t	30t	2d	3d	7d	28d
5. Lavkarbon A	5 °C	-	-	-	-	0,5	1,1	2,1	7,4	13,2	23,9	35,0
	20 °C	-	-	0,9	3,3	10,1	13,3	-	20,9	24,2	29,5	38,4
	35 °C	0,4	2,0	5,8	11,3	16,4	18,1	-	-	-	-	44,1
7. Lavkarbon A	5 °C	-	-	-	-	0,3	0,7	1,1	4,0	7,9	14,4	21,0
	20 °C	-	-	0,4	1,4	4,6	6,7	-	12,1	14,5	18,6	27,2
	35 °C	0,3	1,2	3,1	6,7	9,7	10,9	-	-	-	-	37,0
8. Lavkarbon Pluss	5 °C	-	-	-	-	0,2	0,5	0,9	2,6	5,6	9,9	16,2
	20 °C	-	-	0,3	1,0	3,3	4,5	-	8,7	10,7	14,2	26,5
	35 °C	0,0	0,9	2,4	5,2	7,5	8,2	-	-	-	-	37,3

Tabell 7.41 presenterer resultater for f_{c28} , s og t_0 ved aktiveringsenergi regneark og fasthetsfunksjon regneark for lavkarbonklassene A (REF), A (35% FA) og Pluss. Reseptene som ble benyttet i denne tabellen består av 5 (klasse A REF), 7 (klasse A 35% FA) og 8 (klasse Pluss).

Tabell 7.41: f_{c28} , s og t_0 ble funnet ved hjelp av aktiveringsenergi- og fasthetsfunksjon regneark.

Resept nr.	Fasthetsfunksjon parametere beregnet						Målt verdi for 20 °C
	Ved aktiveringsenergi regneark			Ved fasthetsfunksjon regneark			
	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]	f_{c28} [MPa]
5. Lavkarbon A	37,6	0,19	8,12	37,3	0,19	8,07	38,4
7. Lavkarbon A	26,6	0,30	5,80	25,4	0,25	7,36	27,2
8. Lavkarbon Pluss	25,71	0,46	-2,13	22,5	0,34	4,46	26,5

7.4 Varmeutvikling

Dette kapitlet viser resultatene fra 15liter herdekasseforsøkene. Varmefunksjonsparametere W_∞ , t_1 og K_1 er beregnet med A og B konstanter fra manuell tilpasning, automatisk tilpasning og for noen serier med trendlinjen til automatisk tilpasning. De fargede radene i varmfunksjonstabellene brukes videre som inndata til HETT²². I tillegg er maksimum adiabatisk temperatur for hver betongtype og utviklet varme ved 300 modenhetstimer funnet. Gjennomsnittlig varmeproduksjon/varmeproduksjons intensitet (dQ/dm) for gitte modenhetsintervaller er beregnet. Ettersom varmeutviklingen for hver betongtype består av mange tallverdier, er 20 punkter for varmeutviklingen gitt i form av tabellert verdi. Disse verdiene gir et godt tilnærming til varmeutvikling grafene i diskusjonskapitlet. Til slutt er avbindingstiden for hver betongtype funnet ved 12 kJ- og 2°C-metoden. Delkapittel 7.4.6 presenteres resultatene fra 1m³ herdekasseforsøkene.

7.4.1 Sementtype

Tabell 7.42 viser varmfunksjonsparametere av B45-M40 betonger med sementtypene STD FA, ANL FA og IND. For ANL FA og IND betongene er varmfunksjonsparametere beregnet ved bruk A og B fra manuell tilpasning og automatisk tilpasning, mens for STD FA betongen er A og B fra trendlinjen til automatisk tilpasning også benyttet. Trendlinjen er beregnet i sammenheng med flygeaske serien, se tabell 7.5. Verdiene i tabellene 7.43 til 7.46 er funnet ved å bruke A og B fra automatisk tilpasning for ANL FA- og IND-betongene, mens for STD FA-betongen er det benyttet A og B fra trendlinjen til automatisk tilpasning.

Tabell 7.42: Varmefunksjonsparametere for betonger med ulike sementtyper.

Resept nr.	Sementtype	A - B konstant	W_∞ [kJ/kg]	t_1 [t]	k_1 [-]	Varmetapstall	dQ/dm
15	ANL FA	Manuell	368,20	10,99	1,30	0,0178	0
		Automatisk	384,90	10,50	1,25	0,0178	0
1	STD FA	Manuell	327,76	8,69	1,75	0,0183	0
		Automatisk	328,38	8,34	1,83	0,0186	0
		Trendlinje*	327,94	8,38	1,83	0,0186	0
6	IND	Manuell	300,59	5,35	2,75	0,0181	0
		Automatisk	300,60	5,56	2,59	0,0179	0

*Trendlinje til automatisk tilpasning av A og B konstanter, se tabell 7.5.

Tabell 7.43: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for betonger med ulike sementtyper.

Sementtype	Adiab.T _{maks} [°C]	Relativ til ANL FA	Varme [kJ/kg] ved 300 mh	Relativ til ANL FA
ANL FA	71,5	100%	311	100%
STD FA	71,8	100,4%	298	96%
IND	75	105%	293	94%

Tabell 7.44: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for betonger med ulike sementtyper.

Modenhetsintervall (M)	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400
ANL FA	0,225	0,132	0,090	0,055	0,038
STD FA	0,175	0,099	0,075	0,053	0,078
IND	0,074	0,042	0,004	0,01	0,010

Tabell 7.45: Tabellert verdi av varmeutvikling for betonger med ulike sementtyper.

ANL FA		STDA FA		IND	
Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]
0	0	0,0	0	0	0
3,0	10	5,4	10	2,7	10
5,4	20	7,3	20	4,8	20
7,7	40	9,1	40	6,6	40
9,3	60	10,4	60	7,8	60
11,0	80	11,6	80	8,7	80
12,9	100	12,6	100	9,5	100
14,9	120	13,6	120	10,1	120
17,1	140	14,8	140	10,8	140
19,6	160	16,7	160	11,8	160
23,4	180	19,5	180	13,2	180
30,0	200	24,2	200	15,2	200
40,9	220	32,8	220	18,5	220
58,1	240	48,8	240	27,1	240
84,2	260	77,3	260	41,7	255
111,6	275	104,0	270	56,6	265
136,4	285	143,0	280	79,0	275
172,2	295	200,9	290	97,5	280
240,5	305	323,6	300	129,7	285
365,0	315	401,5	305	182,3	290

Tabell 7.46: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for betonger med ulike sementtyper.

Sementtype	Avbindingstid [timer]		Differanse 12kJ-2°C
	12 kJ -metoden	2 °C -metoden	

ANL FA	6,4	6,4	0
STD FA	7,0	7,1	-0,1
IND	5,6	5,6	0

7.4.2 Flygeaske

Tabell 7.47 viser varmfunksjonsparametere av STD FA B45 M40 betonger med total flygeaskeinnhold på 18% (referanse betong uten ekstra tilsatt flygeaske), 25%FA, 30%FA og 35%FA. For hver betongtype er det beregnet varmfunksjonsparametere ved bruk av A og B konstanter fra manuell tilpasning, automatisk tilpasning og trendlinjen til automatisk tilpasning. Dette for å sammenligne forskjellen de tre A og B konstantene gir. Videre er verdiene i tabellene 7.48 til 7.51 funnet ved å bruke A og B fra trendlinjen til automatisk tilpasning for hver betongtype. Grunnen til dette er A og B funnet ved trendlinjen til automatisk tilpasning, gir den beste tilpasningen i forhold til økende mengde flygeaske. Tabell 7.5 viser A og B konstantene for betongene i flygeaske serien.

Tabell 7.47: Varmefunksjonsparametere for betonger med økende flygeaskeinnhold.

Resept nr.	Flygeaskeinnhold	A - B konstant	W_{∞} [kJ/kg]	t_1 [t]	k_1 [-]	Varmetapstall	dQ/dm
1	Referanse	Manuell	327,76	8,69	1,75	0,0183	0
		Automatisk	328,38	8,34	1,83	0,0186	0
		Trendlinje*	327,94	8,38	1,83	0,0186	0
10	25% FA	Manuell	270,14	8,02	2,36	0,0194	0,01
		Automatisk	270,17	7,97	2,38	0,0194	0
		Trendlinje*	271,57	7,94	2,38	0,0196	0
16	30% FA	Manuell	272,56	8,31	2,10	0,0184	0
		Automatisk	271,42	8,19	2,16	0,0183	0
		Trendlinje*	272,42	8,25	2,13	0,0184	0
9/17**	35% FA	Manuell	256,82	8,23	2,10	0,0181	0
		Automatisk	254,16	8,20	2,13	0,0178	0
		Trendlinje*	253,57	8,44	2,15	1,0177	0

*Trendlinje til automatisk tilpasning av A og B konstanter.

**Resept nr. 9 og 17 er slått sammen.

Tabell 7.48: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for betonger med økende flygeaskeinnhold.

Flygeaskeinnhold	Adiab. T_{maks} [°C]	Relativ til REF	Varme [kJ/kg] ved 300 mh	Relativ til REF
Referanse	71,8	100%	298	100%
25% FA	62,7	87%	258	87%
30% FA	61,4	86%	255	86%
35% FA	57,8	81%	238	80%

Tabell 7.49: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for betonger med økende flygeaskeinnhold.

Modenhetsintervall (M)	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400
Referanse	0,175	0,099	0,075	0,053	0,078

25% FA	0,072	0,034	-	0,022	0
30% FA	0,119	0,039	-	0,017	0,01
35% FA	0,100	0,030	-	0	0

Tabell 7.50: Tabellert verdi av varmeutvikling for betonger med økende flygeaskeinnhold.

Referanse		25% FA		30% FA		35% FA	
Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]
0,0	0	0	0	0,0	0	0,0	0
5,4	10	6,2	10	6,2	10	6,2	10
7,3	20	7,9	20	7,9	20	8,1	20
9,1	40	9,7	40	9,7	40	10,1	40
10,4	60	11,1	60	11,2	60	11,8	60
11,6	80	12,4	80	12,5	80	13,2	80
12,6	100	13,4	100	13,6	100	14,5	100
13,6	120	14,6	120	15,1	120	16,5	120
14,8	140	16,5	140	17,4	140	20,1	140
16,7	160	19,5	160	21,3	160	25,8	160
19,5	180	24,5	180	28,0	180	36,6	180
24,2	200	28,5	190	33,4	190	45,0	190
32,8	220	37,6	205	41,0	200	57,3	200
48,8	240	46,8	215	51,4	210	65,2	205
77,3	260	59,1	225	65,0	220	75,2	210
104,0	270	77,9	235	84,4	230	86,5	215
143,0	280	90,1	240	112,4	240	99,4	220
200,9	290	106,7	245	134,3	245	117,1	225
323,6	300	126,6	250	163,6	250	138,2	230
401,5	305	167,2	255	233,5	255	178,2	235

Tabell 7.51: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for betonger med økende flygeaskeinnhold.

Flygeaskeinnhold	Avbindingstid [timer]		Differanse 12kJ-2°C
	12 kJ-metoden	2 °C-metoden	
Referanse	7,0	7,1	-0,1
25% FA	7,8	7,8	0
30% FA	7,5	7,7	-0,2
35% FA	7,9	8,0	-0,1

7.4.3 Silikastøv

Tabell 7.52 viser varmefunksjonsparametere av STD FA B45 M40 25%FA betonger med silikastøvinnhold på 0% (referanse), 4%, 8% og 11%. For hver betongtype er det beregnet varmefunksjonsparametere ved bruk av A og B konstanter fra manuell tilpasning, automatisk tilpasning og trendlinjen til automatisk tilpasning. Dette for å sammenligne forskjellen de tre A og B konstantene gir. Videre er verdiene i tabellene 7.53 til 7.56 funnet ved å bruke A og B fra trendlinjen til automatisk tilpasning for hver betongtype. Tabell 7.8 viser A og B konstantene for betongene med silikastøv.

Tabell 7.52: Varmefunksjonsparametere for betonger med økende silikastøv.

Resept nr.	Silikastøv innhold	A - B konstant	W_{∞} [kJ/kg]	t_1 [t]	k_1 [-]	Varmetapstall	dQ/dm
10	Referanse	Manuell	270,14	8,02	2,36	0,0194	0,01
		Automatisk	270,17	7,97	2,38	0,0194	0
		Trendlinje**	271,57	7,94	2,38	0,0196	0
12	4% S	Manuell	286,67	8,63	1,95	0,0197	0
		Automatisk	284,55	8,48	2,01	0,0196	0
		Trendlinje*	284,72	8,51	2,00	0,0196	0
13	8% S	Manuell	277,89	9,02	2,10	0,0187	0
		Automatisk	273,89	8,70	2,23	0,0185	0,01
		Trendlinje*	272,62	8,92	2,19	0,0184	0
14	11% S	Manuell	265,29	9,38	2,20	0,0179	0
		Automatisk	270,39	9,69	2,06	0,0181	0
		Trendlinje*	268,78	9,56	2,10	0,0179	0

**Trendlinje for resept nr. 10 fra flygeaske serien.

* Trendlinje til automatisk tilpasning av A og B konstanter.

Tabell 7.53: Maks adiabatisk og målt temperatur med tilhørende tid for betonger med økende silikastøvinnehold.

Silikastøv-innhold	Adiab. T_{maks} [°C]	Relativ til REF	Varme [kJ/kg] ved 300 mh	Relativ til REF
Referanse	62,7	100%	258	100%
4% S	62,1	99%	263	102%
8% S	59,7	95%	257	99%
11% S	57,4	91%	251	97%

Tabell 7.54: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for betonger med økende silikastøvinnehold.

Modenhetsintervall (M)	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400
Referanse	0,072	0,034	-	0,022	0
4% S	0,108	0,054	0	-	0
8% S	0,075	0,031	0,022	-	0,01
11% S	0,085	0,037	-	-	-

Tabell 7.55: Tabellert verdi av varmeutvikling for betonger med økende silikastøvinnehold.

Res.nr. 10 REF		Res.nr. 12, 4% S		Res.nr. 13, 8% S		Res.nr. 14, 11% S	
Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [h]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [h]	Varme [kJ/kg sem.]
0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0
6,2	10	5,8	10	6,0	10	7,0	10
7,9	20	7,6	20	8,1	20	8,6	20
9,7	40	9,5	40	10,1	40	10,7	40
11,1	60	11,1	60	11,9	60	12,5	60
12,4	80	12,4	80	13,4	80	14,2	80

13,4	100	13,6	100	14,8	100	15,7	100
14,6	120	15,1	120	16,5	120	18,0	120
16,5	140	17,6	140	19,5	140	21,9	140
19,5	160	21,4	160	24,2	160	28,2	160
24,5	180	25,9	175	32,0	180	38,7	180
28,5	190	32,8	190	45,3	200	45,6	190
37,6	205	44,1	205	55,2	210	54,4	200
46,8	215	60,3	220	67,2	220	64,9	210
59,1	225	74,3	230	82,1	230	77,6	220
77,9	235	93,5	240	90,9	235	85,9	225
90,1	240	106,3	245	102,9	240	95,2	230
106,7	245	123,1	250	116,9	245	123,5	240
126,6	250	146,7	255	139,6	250	151,3	245
167,2	255	189,0	260	195,5	255	459,6	250

Tabell 7.56: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for betonger med økende silikastøvinnehold.

Silikastøv innhold	Avbindingstid [timer]		Differanse 12kJ-2°C
	12 kJ-metoden	2 °C-metoden	
REF	7,8	7,8	0
4% S	7,2	7,2	0
8% S	7,6	7,6	0
11% S	7,9	8,0	-0,1

7.4.4 Bestandighetsklasse

Tabell 7.57 viser varmefunksjonsparametere for betong med bestandighetsklassene M40, M45, M60 og M90. Masseforholdet for disse betongtypene er på 0,4 for M40, 0,45 for M45, 0,53 for M60 og 0,62 for M90. Verdiene i tabellene 7.58 til 7.61 er funnet ved å bruke A og B fra automatisk tilpasning for M45, M60 og M90 betongene, mens for M40 betongen er A og B hentet fra trendlinjen til den automatiske tilpasningen fra flygeaske serien.

Tabell 7.57: Varmefunksjonsparametere for betonger med ulike bestandighetsklasser.

Resept nr.	Bestandighets-klasse	A - B konstant	W_{∞} [kJ/kg]	t_1 [t]	k_1 [-]	Varmetapstall	dQ/dm
1	M40	Manuell	327,76	8,69	1,75	0,0183	0
		Automatisk	325,65	8,27	1,87	0,0185	0
		Trendlinje*	327,94	8,38	1,83	0,0186	0
3	M45	Manuell	322,84	8,38	1,91	0,0185	0
		Automatisk	325,51	8,47	1,88	0,0187	0
4	M60	Manuell	310,72	8,02	2,30	0,0178	0,04
		Automatisk	340,02	8,59	1,92	0,0199	0,02
5	M90	Manuell	358,18	8,23	1,81	0,0181	0,05
		Automatisk	358,25	8,48	1,74	0,0178	0

*Trendlinje til automatisk tilpasning av A og B fra flygeaske serien.

Tabell 7.58: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for betonger med ulike bestandighetsklasser.

Bestandighets- klasse	Adiab. T _{maks} [°C]	Relativ til M40	Varme [kJ/kg] ved 300 mh	Relativ til M40
M40	71,7	100%	298	100%
M45	67,5	94%	298	100%
M60	62,9	88%	313	105%
M90	59,4	83%	325	109%

Tabell 7.59: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for betonger med ulike bestandighetsklasser.

Modenhetsintervall (M)	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400
M40	0,175	0,099	0,075	0,053	0,078
M45	0,168	0,087	0,068	0,068	0,052
M60	0,158	0,098	0,032	-	-
M90	0,171	0,130	0,108	0,100	0

Tabell 7.60: Tabellert verdi av varmeutvikling for betonger med ulike bestandighetsklasser.

M40		M45		M60		M90	
Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]
0,0	0	0,0	0	0	0	0	0
5,4	10	5,8	10	5,8	10	4,9	10
7,3	20	7,4	20	7,2	20	6,4	20
9,1	40	9,2	40	9,0	40	8,3	40
10,4	60	10,5	60	10,4	60	9,7	60
11,6	80	11,8	80	11,7	80	11,1	80
12,6	100	12,9	100	12,9	100	12,3	100
13,6	120	14,0	120	13,9	120	13,4	120
14,8	140	15,2	140	15,2	140	14,6	140
16,7	160	17,1	160	16,9	160	16,2	160
19,5	180	20,0	180	19,6	180	18,8	180
24,2	200	24,6	200	23,6	200	22,3	200
32,8	220	33,3	220	30,0	220	27,4	220
48,8	240	49,2	240	40,7	240	38,6	245
77,3	260	68,8	255	49,2	250	55,1	265
104,0	270	88,6	265	65,6	265	78,2	280
143,0	280	118,1	275	90,7	280	99,7	290
200,9	290	169,2	285	118,0	290	131,2	300
323,6	300	261,3	295	158,6	300	182,8	310
401,5	305	337,0	300	229,1	310	255,2	320

Tabell 7.61: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for betonger med ulike bestandighetsklasser.

Bestandighetsklasse	Avbindingstid [timer]		Differanse 12kJ-2°C
	12 kJ -metoden	2 °C -metoden	

M40	7,0	7,1	-0,1
M45	7,7	7,5	0,2
M60	7,4	7,9	-0,5
M90	7,1	7,4	-0,3

7.4.5 Lavkarbonklasser

Herdekkasse resultatene for betonger forskjellige lavkarbonklasser presenteres i dette kapittelet. Først presenteres resultatene for lavkarbonklassene for B30 M90 betongkvalitet, etterfulgt av B30 M60, B35 M45 og til slutt B45 M40.

Lavkarbonbetonger med B30 M90 betongkvalitet

Tabell 7.62 viser varmefunksjonsparametere for B30 M90 betonger med lavkarbonklassene A (REF), A (35%FA) og Pluss (35%FA 11%S). Verdiene i tabellene 7.64 til 7.66 er funnet ved å bruke A og B fra automatisk tilpasning.

Tabell 7.62: Varmefunksjonsparametere for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Resept nr.	Lavkarbon-klasse	A – B Konstant	W_{∞} [kJ/kg]	t_1 [t]	k_1 [-]	Varmetapstall	dQ/dm
5	A	Manuell	358,18	8,23	1,81	0,0181	0,05
		Automatisk	358,25	8,48	1,74	0,0178	0
7	A	Manuell	297,25	8,68	1,59	0,0179	0,01
		Automatisk	301,97	9,12	1,46	0,0178	0
8	Pluss	Manuell	290,08	10,79	1,46	0,0179	0,03
		Automatisk	298,51	12,53	1,21	0,0174	0

Tabell 7.63: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonklasse	Adiab.T _{maks} [°C]	Relativ til REF	Varme [kJ/kg] ved 300 mh	Relativ til REF
Lavkarbon A, (REF)	59,4	100%	325	100%
Lavkarbon A, 35% FA	51,4	87%	259	80%
Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	48,8	82%	235	72%

Tabell 7.64: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Modenhetsintervall (M)	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400
Lavkarbon A, REF	0,171	0,130	0,108	0,100	0
Lavkarbon A, 35% FA	0,145	0,123	0,088	0,029	0,034
Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	0,171	0,109	0,048	0,070	0,032

Tabell 7.65: Tabellert verdi av varmeutvikling for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbon A, REF		Lavkarbon A, 35% FA		Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	
Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]
0	0	0	0	0	0
4,9	10	3,4	10	5,1	10

6,4	20	5,8	20	7,1	20
8,3	40	8,3	40	9,9	40
9,7	60	10,3	60	12,6	60
11,1	80	12,3	80	15,3	80
12,3	100	14,2	100	18,1	100
13,4	120	16,2	120	22,5	120
14,6	140	19,3	140	30,8	140
16,2	160	24,9	160	43,1	160
18,8	180	33,3	180	51,9	170
22,3	200	39,5	190	63,7	180
27,4	220	47,8	200	79,4	190
38,6	245	60,4	210	98,0	200
55,1	265	76,8	220	123,8	210
78,2	280	103,0	230	156,4	220
99,7	290	145,5	240	179,6	225
131,2	300	171,1	245	229,5	230
182,8	310	211,7	250	313,1	235
255,2	320	317,6	260	527,0	240

Tabell 7.66: Avbindingstid ved 1 2kJ- og 2 °C-metoden for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonklasse	Avbindingstid [timer]		Differanse 12kJ-2°C
	12 kJ -metoden	2 °C -metoden	
Lavkarbon A, REF	7,1	7,4	-0,3
Lavkarbon A, 35% FA	8,9	9,5	-0,6
Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	8,5	9,3	-0,8

Lavkarbonbetonger med B30 M60 betongkvalitet

Tabell 7.67 viser varmfunksjonsparametere for B30 M60 betonger med lavkarbonklassene B (REF) og A (35%FA). Verdiene i tabellene 7.68 til 7.71 er funnet ved å bruke A og B fra automatisk tilpasning.

Tabell 7.67: Varmefunksjonsparametere for B30-M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Resept nr.	Lavkarbon-klasse	A – B Konstant	W_{∞} [kJ/kg]	t_1 [t]	k_1 [-]	Varmetapstall	dQ/dm
4	B	Manuell	310,72	8,02	2,30	0,0178	0,04
		Automatisk	340,02	8,59	1,92	0,0199	0,02
11	A	Manuell	265,95	8,86	2,01	0,0174	0
		Automatisk	267,34	9,03	1,97	0,0176	0

Tabell 7.68: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for B30-M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonklasse	Adiab. T_{maks} [°C]	Relativ til REF	Varme [kJ/kg] ved 300 mh	Relativ til REF
Lavkarbon B, REF	62,9	100%	313	100%
Lavkarbon A, 35%FA	57,9	92%	245	78%

Tabell 7.69: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for B30-M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Modenhetsintervall (M)	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400
Lavkarbon B, REF	0,158	0,098	0,032	-	-
Lavkarbon A, 35%FA	0,122	0,061	0,040	0,003	0,020

Tabell 7.70: Tabellert verdi av varmeutvikling for B30-M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbon B, REF		Lavkarbon A, 35%FA	
Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]
0	0	0	0
5,8	10	6,8	10
7,2	20	8,2	20
9,0	40	10,2	40
10,4	60	12,0	60
11,7	80	13,6	80
12,9	100	15,1	100
13,9	120	17,0	120
15,2	140	20,4	140
16,9	160	25,8	160
19,6	180	35,3	180
23,6	200	43,2	190
30,0	220	53,7	200
40,7	240	68,5	210
49,2	250	90,2	220
65,6	265	104,9	225
90,7	280	123,9	230
118,0	290	146,1	235
158,6	300	181,0	240
229,1	310	245,1	245

Tabell 7.71: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for B30-M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonklasse	Avbindingstid [timer]		Differanse 12kJ-2°C
	12 kJ -metoden	2 °C -metoden	
Lavkarbon B, REF	7,4	7,9	-0,5
Lavkarbon A, 35%FA	8,3	8,1	0,2

Lavkarbonbetonger med B35 M45 betongkvalitet

Tabell 7.72 viser varmefunksjonsparametere for B35 M45 betonger med lavkarbonklassene B (REF) og Pluss (35%FA 11%S). Verdiene i tabellene 7.73 til 7.76 er funnet ved å bruke A og B fra automatisk tilpasning.

Tabell 7.72: Varmefunksjonsparametere for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Res.nr.	Lavkarbon-klasse	A – B Konstant	W^∞ [kJ/kg]	t_1 [t]	k_1 [-]	Varmetapstall	dQ/dm
3	B	Manuell	322,84	8,38	1,91	0,0185	0
		Automatisk	325,51	8,47	1,88	0,0187	0
19	Pluss	Manuell	267,05	10,25	1,88	0,0178	0
		Automatisk	278,94	12,00	1,53	0,0175	0

Tabell 7.73: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonklasse	Adiab.T _{maks} [°C]	Relativ til REF	Varme [kJ/kg] ved 300 mh	Relativ til REF
Lavkarbon B, REF	67,5	100%	298	100%
Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	53,6	79%	240	83%

Tabell 7.74: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Modenhetsintervall (M)	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400
Lavkarbon B, REF	0,168	0,087	0,068	0,068	0,052
Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	0,200	0,092	0,066	0,021	0

Tabell 7.75: Tabellert verdi av varmeutvikling for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbon B, REF		Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	
Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]
0,0	0	-0,8	0
5,8	10	7,0	10
7,4	20	8,8	20
9,2	40	11,4	40
10,5	60	13,8	60
11,8	80	15,9	80
12,9	100	18,4	100
14,0	120	22,8	120
15,2	140	30,4	140
17,1	160	41,8	160
20,0	180	60,9	180
24,6	200	74,1	190
33,3	220	91,7	200
49,2	240	102,2	205
68,8	255	113,1	210
88,6	265	141,3	220
118,1	275	159,4	225

169,2	285	183,0	230
261,3	295	225,6	235
337,0	300	298,4	240

Tabell 7.76: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonklasse	Avbindingstid [timer]		Differanse 12kJ-2°C
	12 kJ -metoden	2 °C -metoden	
Lavkarbon B, REF	7,7	7,5	0,2
Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	7,9	8,2	-0,3

Lavkarbonbetonger med B45 M40 betongkvalitet

Tabell 7.77 viser varmfunksjonsparametere for B45 M40 betonger med lavkarbonklassene B (REF), A (35%FA) og Pluss (35%FA 11%S). Verdiene i tabellene 7.78 til 7.81 er funnet ved å bruke A og B fra automatisk tilpasning for resept nr. 18, og for resept 1 og 9/17 er det benyttet A og B fra trendlinjen.

Tabell 7.77: Varmefunksjonsparametere for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Resept nr.	Lavkarbon-klasse	A – B Konstant	W_{∞} [kJ/kg]	t_1 [t]	k_1 [-]	Varmetapstall	dQ/dm
1 (REF)	B	Manuell	327,76	8,69	1,75	0,0183	0
		Automatisk	328,38	8,34	1,83	0,0186	0
		Trendlinje*	327,94	8,38	1,83	0,0186	0
9/17*	A	Manuell	250,30	8,23	2,30	0,0179	0,033
		Automatisk	254,89	8,48	2,13	0,0179	0
		Trendlinje**	255,38	8,50	2,11	0,0179	0
18	Pluss	Manuell	255,04	10,68	1,93	0,0177	0
		Automatisk	261,13	11,69	1,71	0,0177	0

*resept 9 og 17 er slått sammen.

Tabell 7.78: Maks adiabatisk temperatur og varme ved 300 mh for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonklasse	Adiab. T_{maks} [°C]	Relativ til REF	Varme [kJ/kg] ved 300 mh	Relativ til REF
Lavkarbon B, REF	71,8	100%	298	100%
Lavkarbon A, 35%FA	58,1	81%	239	80%
Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	53,6	75%	232	78%

Tabell 7.79: dQ/dm ved ulike modenhetsintervall for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Modenhetsintervall (M)	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400
Lavkarbon B, REF	0,175	0,099	0,075	0,053	0,078
Lavkarbon A, 35%FA	0,105	0,035	-	0	0
Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	0,16	0,081	0,033	0,012	0

Tabell 7.80: Tabellert verdi av varmeutvikling for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbon B, REF		Lavkarbon A, 35%FA		Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	
Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]	Ekv.tid [mh]	Varme [kJ/kg sem.]
0,0	0	0,0	0	0,0	0
5,4	10	6,2	10	7,1	10
7,3	20	8,1	20	9,4	20
9,1	40	10,1	40	12,1	40
10,4	60	11,8	60	14,4	60
11,6	80	13,2	80	16,5	80
12,6	100	14,5	100	19,0	100
13,6	120	16,5	120	23,9	120
14,8	140	20,1	140	32,6	140
16,7	160	25,9	160	45,8	160
19,5	180	36,6	180	55,6	170
24,2	200	45,1	190	67,1	180
32,8	220	57,3	200	81,5	190
48,8	240	65,2	205	97,0	200
77,3	260	75,2	210	106,6	205
104,0	270	85,1	215	118,3	210
143,0	280	98,9	220	132,6	215
200,9	290	114,8	225	153,4	220
323,6	300	137,3	230	181,9	225
401,5	305	173,3	235	235,1	230

Tabell 7.81: Avbindingstid ved 12 kJ- og 2 °C-metoden for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonklasse	Avbindingstid [timer]		Differanse 12 kJ-2 °C
	12 kJ -metoden	2 °C -metoden	
Lavkarbon B, REF	7,0	7,1	-0,1
Lavkarbon A, 35%FA	7,9	8,0	-0,1
Lavkarbon Pluss, 35%FA 11%S	8,5	8,9	-0,4

7.4.6: Resultat fra kubikk kasse forsøk

Tabell 7.82 viser varmfunksjonsparametere for forsøkene gjennomført på 1 m³ herdekasser. B45 M40 og B45 M40 35%FA betongene er gjennomført av masterstudentene ved Nenset betongfabrikk, mens B45 M40 30%FA er fått inn fra en entreprenør i bransjen.

Tabell 7.82: Varmefunksjonsparametere av 1m³ herdekasseforsøk.

Betongtype	Tilhørende lab. Resept	W_{∞} [kJ/kg]	t_1 [t]	k_1 [-]	Varmetapstall	Varme [kJ/kg] ved 300 mh
B45 M40	1	323	8,19	2,03	0,0029	304
B45 M40 35%FA	9/17	313	9,85	1,70	0,0032	281
B45 M40 30%FA	16	304	10,17	1,66	0,0037	270

7.5 Herdeteknologiske parametere til HETT²²

I dette delkapittelet presenteres de herdeteknologiske parametere som er valgt ut og benyttes som inndata til HETT²². Tabell 7.83 viser A og B konstantene funnet ved manuell tilpasning for hver betongtype. Tabell 7.84 viser fasthetsfunksjonsparametere til hver betongtype. Her er f_{c28} verdiene oppgitt som den karakteristiske terningfasthet til hver betongkvalitet. Ved simulering i HETT²², skal denne verdien erstattes med den faktisk målte verdien for en betongtype. Tabell 7.85 viser varmfunksjon parametere som er valgt ut til HETT²². En liste over alle betongtypene, med sine bindemiddelmengde, densitet og egenskapsparametere, er vist i vedlegg 12.1.

Tabell 7.83: Temperaturfølsomhet parametere til HETT²².

Betongkvalitet	A [J/mol]	B [J/(mol*K)]
IND - B45 - M40	32000	1250
ANL FA - B45 - M40	37000	450
STD FA - B45 - M40	33000	700
STD FA - B45 - M40 - 25%FA	33300	650
STD FA - B45 - M40 - 30%FA	33400	640
STD FA - B45 - M40 - 35%FA	33800	550
STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 4%S	34000	680
STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 8%S	34400	700
STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 11%S	35000	750
STD FA - B35 - M45	31200	1000
STD FA - B30 - M60	29000	1250
STD FA - B30 - M90	27500	1600
STD FA - B30 - M90 - 35%FA	34200	600
STD FA - B30 - M90 - 35%FA - 11%S	37500	450
STD FA - B30 - M60 - 35%FA	33400	650
STD FA - B35 - M45 - 35%FA - 11%S	33000	600
STD FA - B45 - M40 - 35%FA - 11%S	36000	500

Tabell 7.84: Fasthetsfunksjon parametere til HETT²².

Betongkvalitet	f_{c28} [MPa]	s [-]	t_0 [t]
IND - B45 - M40	55.0	0.07	10.18
ANL FA - B45 - M40	55.0	0.26	7.11
STD FA - B45 - M40	55.0	0.14	10.26
STD FA - B45 - M40 - 25%FA	55.0	0.17	10.06
STD FA - B45 - M40 - 30%FA	55.0	0.18	9.55
STD FA - B45 - M40 - 35%FA	55.0	0.19	9.22
STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 4%S	55.0	0.19	9.27
STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 8%S	55.0	0.24	7.97
STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 11%S	55.0	0.27	7.47
STD FA - B35 - M45	45.0	0.15	9.86
STD FA - B30 - M60	37.0	0.16	9.64
STD FA - B30 - M90	37.0	0.19	8.07

STD FA - B30 - M90 - 35%FA	37.0	0.25	7.36
STD FA - B30 - M90 - 35%FA - 11%S	37.0	0.34	4.46
STD FA - B30 - M60 - 35%FA	37.0	0.21	8.93
STD FA - B35 - M45 - 35%FA - 11%S	45.0	0.39	3.48
STD FA - B45 - M40 - 35%FA - 11%S	55.0	0.30	6.78

Tabell 7.85: Varmefunksjon parametere til HETT²².

Betongkvalitet	W_{∞} [kJ/kg]	t_1 [t]	k_1 [-]	Avbindingstid [t]
IND - B45 - M40	300600	5.56	2.59	5.6 timer
ANL FA - B45 - M40	384900	10.5	1.25	6.4 timer
STD FA - B45 - M40	327940	8.38	1.83	7.1 timer
STD FA - B45 - M40 - 25%FA	271570	7.94	2.38	7.8 timer
STD FA - B45 - M40 - 30%FA	272420	8.25	2.13	7.7 timer
STD FA - B45 - M40 - 35%FA	253570	8.44	2.15	8.0 timer
STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 4%S	284720	8.51	2.0	7.2 timer
STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 8%S	272620	8.92	2.19	7.6 timer
STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 11%S	268780	9.56	2.1	8.0 timer
STD FA - B35 - M45	325510	8.47	1.88	7.5 timer
STD FA - B30 - M60	340020	8.59	1.92	7.9 timer
STD FA - B30 - M90	358250	8.48	1.74	7.4 timer
STD FA - B30 - M90 - 35%FA	301970	9.12	1.46	9.5 timer
STD FA - B30 - M90 - 35%FA - 11%S	298510	12.53	1.21	9.3 timer
STD FA - B30 - M60 - 35%FA	267340	9.03	1.97	8.1 timer
STD FA - B35 - M45 - 35%FA - 11%S	278940	12.0	1.53	8.2 timer
STD FA - B45 - M40 - 35%FA - 11%S	261130	11.69	1.71	8.9 timer

8. Diskusjon

I dette kapitlet vil virkningen av forskjellige bindemidler bli vurdert i forhold til kriterier som temperaturfølsomhet, fasthets- og varmeutvikling. Resultatene vil bli sett i sammenheng med kunnskapsbakgrunn for å evaluere hvor godt de ulike materialene representerer disse egenskapene.

8.1 Egenskaper for fersk betong

Tabell 7.1 viser oppnådde testresultater av fersk betong, med begge blandesatsene for hver resept. Reseptene benyttet i denne oppgaven ble proporsjonert til en tilsiktet synk på omtrent 220mm. Fra tabell 7.1 kan vi se at alle betongene har fått en synk på rundt dette området. Unntaket er resept nummer 9 blandesats 1, hvor synk ble målt 180mm. Derfor ble resept nummer 17 gjennomført som en repetisjon av resept nummer 9, bare med korrigert mengde bindemiddelvolum for å øke synk, som ble målt 230mm. I tillegg var resept nummer 2 en ren repetisjon av resept nummer 1. Denne repetisjonen ble gjort for å sikre oss at framgangsmåten som ble benyttet på laboratoriet er riktig, og at ved gjentakelse av samme resept flere ganger kan vi forvente omtrent samme målte egenskaper.

8.2 Temperaturfølsomhet

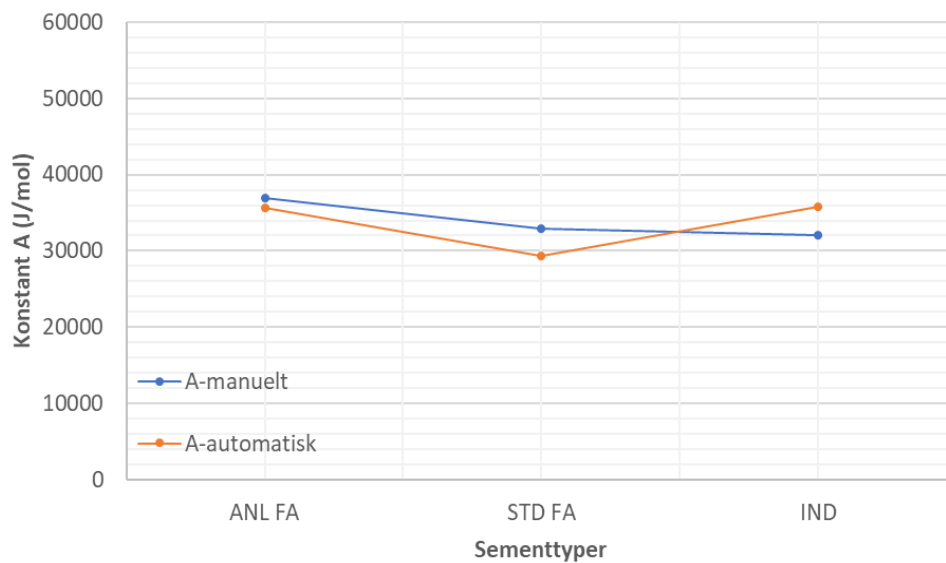
De kommende delkapitlene tar for seg ulike betongenes temperaturfølsomhet. Det vil bli diskutert hvordan resultatene er relatert til teorien og hvordan de ulike resultatene henger sammen med hverandre.

Resultater av A og B konstanter i form av figurer er funnet for variablene sementtyper, flygeaske, silikastøv, bestandighetsklasser og lavkarbonklasser med tilhørende aktiveringsenergi $E(\theta)$ og hastighetsfunksjoner $H(\theta)$. For aktiveringsenergien og hastighetsfunksjonen presenteres og diskuteres det kun resultater fra de manuelle tilpasninger. Resultatene av A og B konstanter som diskuteres i dette kapitlet er både fra manuelle og automatiske tilpasninger. Den automatiske tilpasningen er beregnet ettersom de brukes av betongbransjen. Den manuelle tilpasningen er beregnet ettersom de viser en bedre tilpasning i tidlig herdeforløp, og skal benyttes som inndata til HETT²². For silikastøv og flygeaske inkludert manuelle og automatiske A og B konstanter, presenteres og diskuteres det også A og B fra lineær trendlinje manuelle og lineær trendlinje automatisk tilpasninger. Resultater av aktiveringsenergi $E(\theta)$ fra de automatiske tilpasninger, som brukes hovedsakelig i betongbransjer er gitt i vedlegg 12.5.

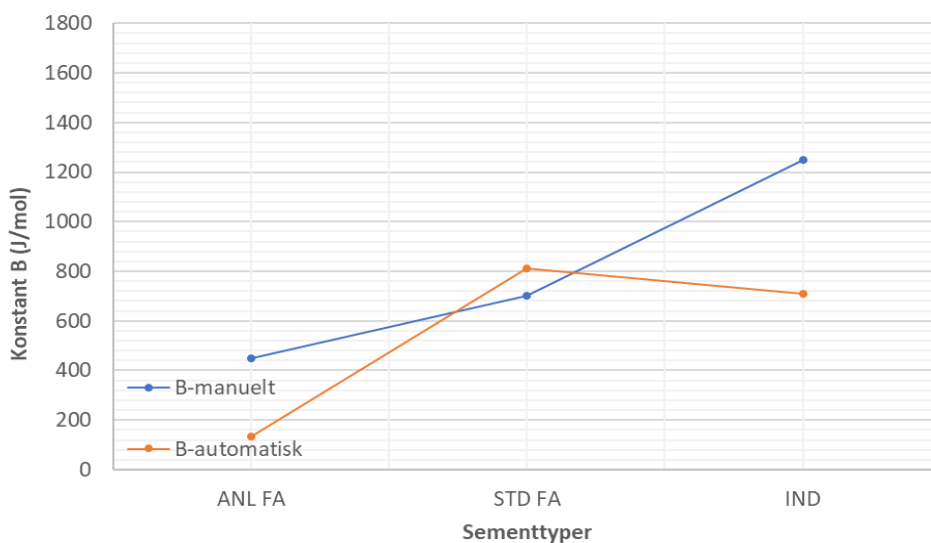
8.2.1 Sementtype

Som vist i figur 8.1 og 8.2 er det to trendlinjer basert på A og B resultatene fra delkapittel 7.2.1, tabell 7.2, som er plottet i form av figurer. Figurene viser tydelige variasjoner i A og B konstantene mellom de tre sementtypene. Konstanten A har høyest verdi for ANL FA sammenlignet med STD FA, med en differanse på 4000 J/mol, og Industriebetongen med en differanse på 5000 J/mol. Disse variasjonene oppstår på grunn av klinkertyper som finnes i de tre kategoriene. ANL FA er den tregeste sementtypen, mens IND er den mest reaktive. Både STD FA og Industri-sementen er laget av en standard klinkertype, men forskjellen er at IND er finere malt enn STD FA. IND er dermed den mest reaktive sementen, etterfulgt av STD FA. ANL FA har en annen klinkertype enn STD FA og IND, og derfor er den tregeste sementen. Som beskrevet i kunnskapsbakgrunn delkapitlene 3.1.2, 3.1.4 og 3.1.7, viser det seg at finhetsgraden og klinkertypen er viktige faktorer for sluttresultatet i betongen.

Videre har STD FA 18% flygeaske, ANL FA 15% flygeaske og Industri 0% flygeaske. Hvis man hadde støpt tre sementtyper med kun klinker som er malt i forhold til finhet, viser det seg at ANL FA ville kommet ut med lavest reaktivitet. Dette vises også fra figur 8.1 og 8.2 med den manuelle tilpasningen av A og B konstanter. I de to sist nevnte figurene vises A og B konstanter, hvor A representerer aktivitetseffekten, og tar hensyn til temperaturen i betongen over en referansetemperatur, og konstant B representerer den totale temperaturavhengigheten i betongens modning. Den tar hensyn til både den direkte temperaturpåvirkningen og effekten av betongens aktuelle temperatur i forhold til referansetemperaturen. I dette tilfelle har ANL FA (tregeste sementen) størst A-verdi på 37000 J/mol, og lavest B-verdi på 450 J/mol fra de manuelle tilpasningene. STD FA som nr. 2 med A-verdi på 33000 J/mol og B-verdi på 700 J/mol, etterfulgt av IND med A-verdi på 32000 J/mol og B-verdi på 1250 J/mol. Dette er fordi jo tregere er sementen, desto høyere A-verdi og lavere B-verdi motsatt.



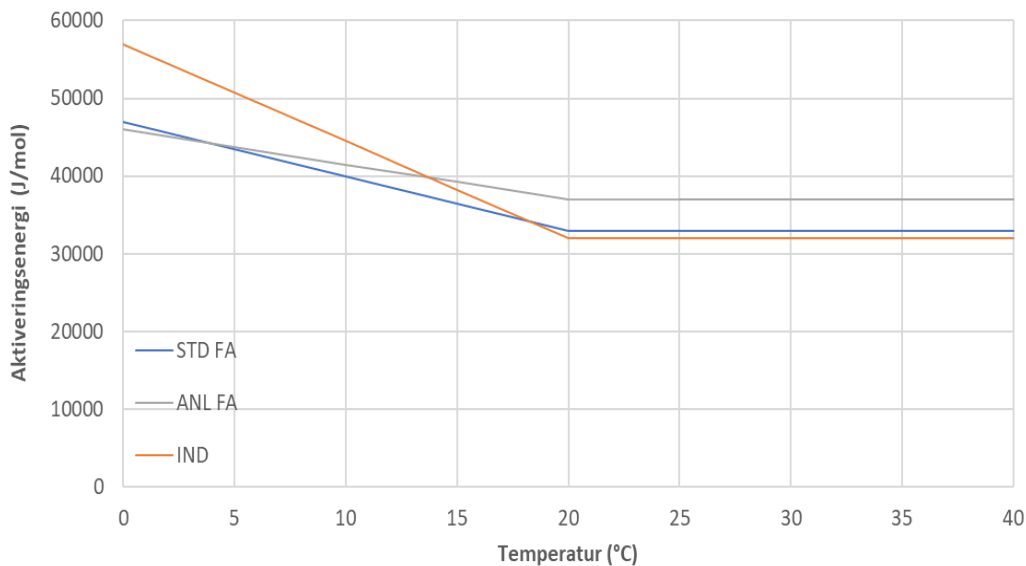
Figur 8.1: A konstant for ulike sementtyper.



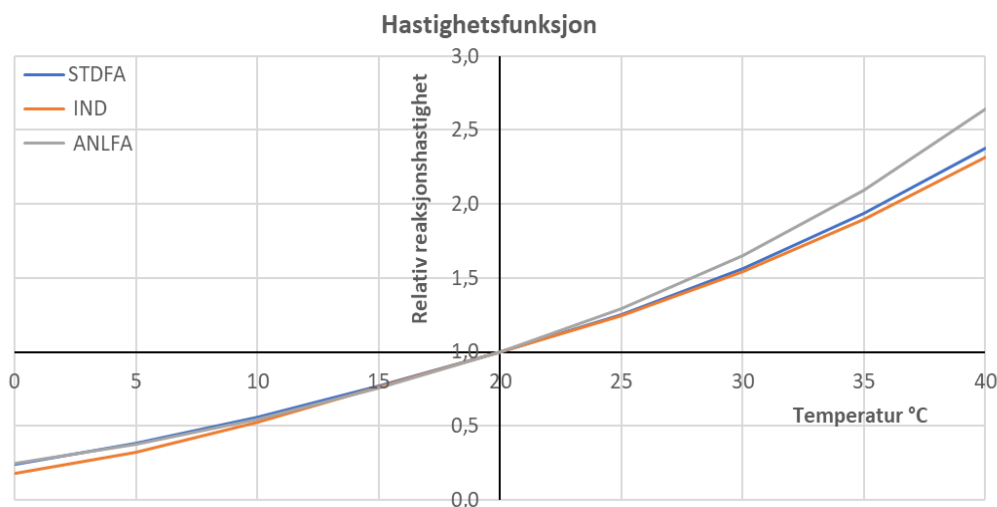
Figur 8.2: B konstant for ulike sementtyper.

I figurene 8.1 og 8.2 er A og B fra både automatisk og manuell tilpasning plottet. Dette er først og fremst for å se trenden for A og B konstanter, samt sammenligne nøyaktighetsgraden mellom de to metodene. Automatiske tilpasninger er det som brukes generelt i betongbransjer i Norge. Som det er vist i figur 6.9 i delkapittel 6.11, ligger noen verdier utenfor den trendlinjen, dermed var det nødvendig med mest mulig tilnærming. Dette er noe som bekreftes gjennom figurene 8.1 og 8.2.

Figuren 8.3 viser at de to betongene med ANL FA og STD FA har høyere aktiveringsenergi enn IND betongen over 20 °C og lavere aktiveringsenergi under 20 °C. Dette betyr at både ANL FA og STD FA (betonger med flygeaskeinnhold) har større relativ reaksjonshastighet enn IND betongen både over og under 20 °C, se figur 8.4 (figur som viser hastighetsfunksjonen fremstilt grafisk). Redusert temperaturfølsomhet ved lave temperaturer betyr at ANL FA og STD FA betongene ikke er spesielt følsom for vinterforhold, selv om de er tregere enn IND betongen ved 20 °C. Høy temperaturfølsomhet ved høye temperaturer (spesielt for ANL FA betongen) fører til at økt utgangstemperatur på betongen, eller å tilføre varme på byggeplass, vil gi en god effekt.



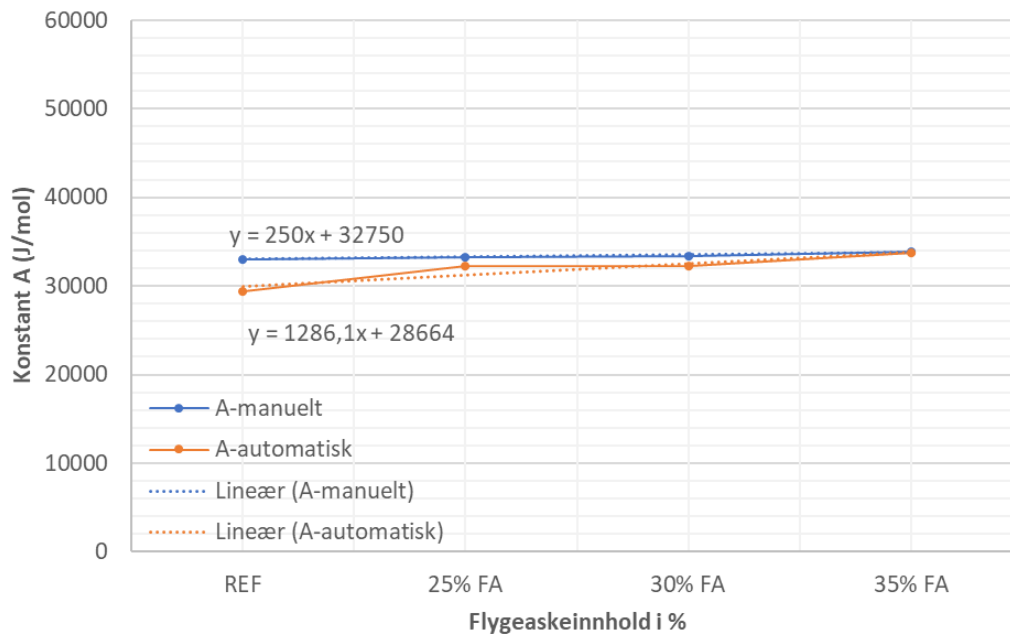
Figur 8.3: Aktiveringsenergi for ulike sementtyper.



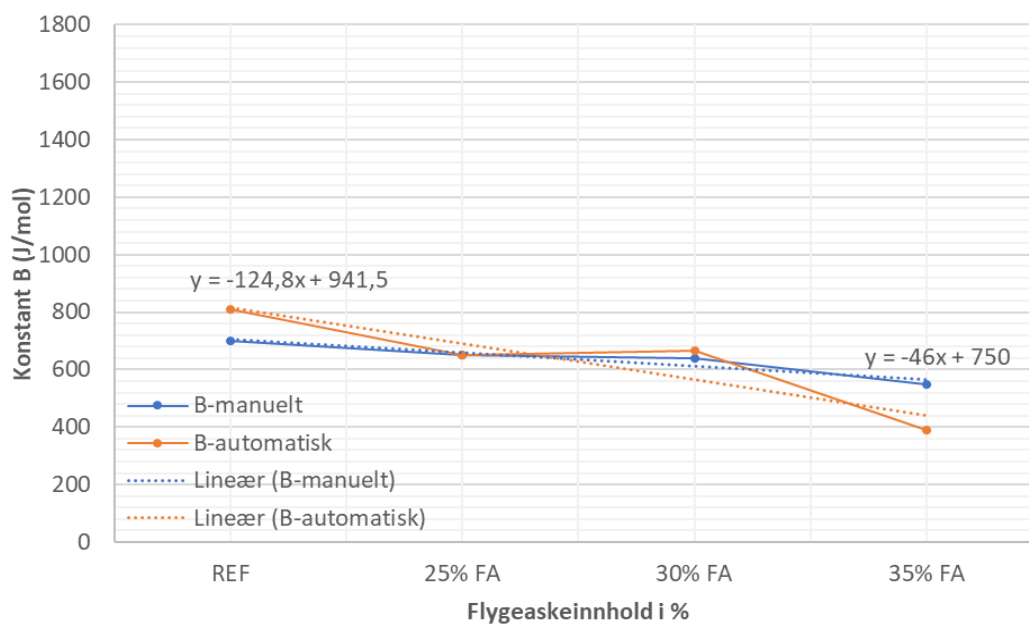
Figur 8.4: Hastighetsfunksjon for ulike sementtyper.

8.2.2 Flygeaske

Resultatene fra figur 8.5 og 8.6 viser verdiene for A og B konstantene for både manuelle og automatiske tilpasninger. Det bemerkes at konstanten A øker med økende flygeaskeinnhold, mens konstanten B avtar. Resultatene av økende flygeaskeinnhold viser tydelige trender for A og B konstantene. Basert på disse resultatene kan det antas at en lavvarmebetong i henhold til N400 (betong med maksimalt flygeaskeinnhold på 40%) vil konstanten A øke ytterligere, og konstanten B avta ytterligere.



Figur 8.5: A konstant for betong med ulike mengde flygeaskeinnhold gitt i prosent (%).



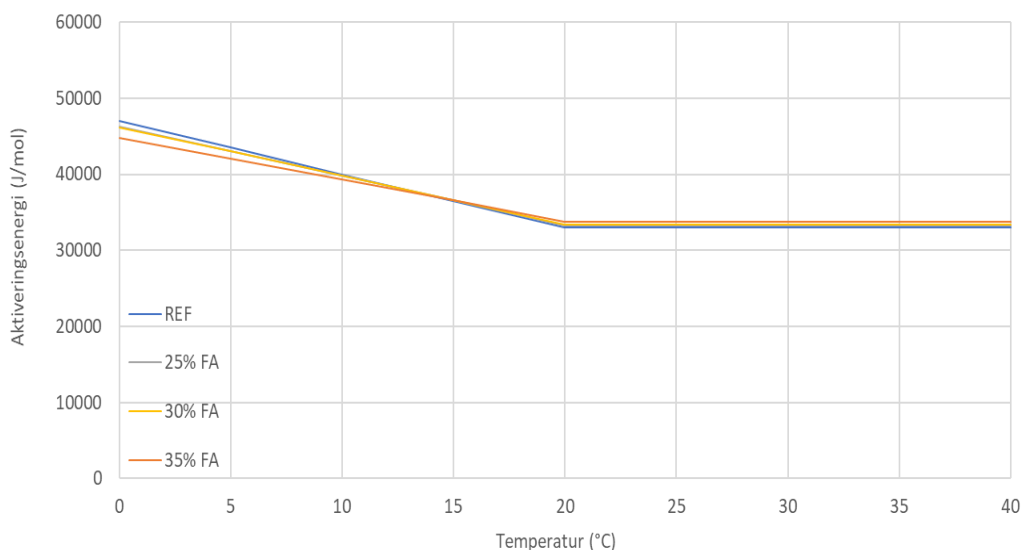
Figur 8.6: B konstant for betong med ulike mengde flygeaskeinnhold gitt i prosent (%).

Videre viser figur 8.5 og 8.6 at differansen i A-konstanten mellom referansebetongen og betong med 25% flygeaskeinnhold var 300 J/mol for manuelle tilpasninger, mens differansen for betong med 30%

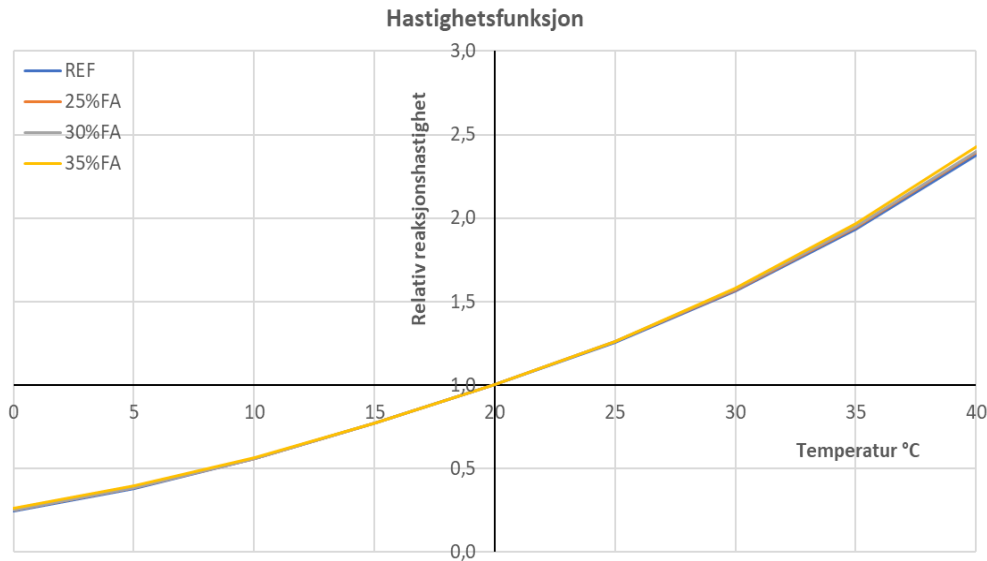
og 35% flygeaskeinnhold var 400 J/mol. For konstant B ble differansen 50 J/mol når betongen innehar 25% flygeaske, mens for betong med 30% og 35% flygeaskeinnhold ble differansen 90 J/mol. For automatiske tilpasninger ble differansen i A-konstanten ($32191-29410 = 2781$ J/mol) mellom referansebetongen og betong med 25% flygeaskeinnhold. Betong med 30% til 35% flygeaskeinnhold har differansen ($33683-32233 = 1450$ J/mol). Disse verdiene ble utjevnet til et akseptabelt nivå, samtidig som en akseptabel tilpasning ble tatt hensyn til i forhold til tidligfastheten. Det bør imidlertid bemerkes at automatiske tilpasninger ikke tar hensyn til den tidligfastheten på lik linje som manuelle, som illustrert i delkapittel 6.11, figur 6.10. I tillegg A og B konstantene fra manuelle tilpasninger blir brukt som inndata til HETT²².

Det ble beregnet A og B konstanter for lineær trendlinje manuell og automatisk ved bruk av enhetsformelen, som vist i de overnevnte figurene. Disse kan bidra med å interpolere verdier av A og B konstanter, som er mellom de utvalgte reseptene. Videre gir de lineære trendlinjene en indikasjon på en helhetlig vurdering av figurene, og viser tydelige trender med en jevn stigning for konstant A og minskning for konstanten B. Trendlinjen kan også benyttes, dersom man trenger verdier av A og B konstanter eksempelvis mellom 25 og 30% flygeaskeinnhold i betongen.

Figur 8.7 demonstrerer at de tre betongene med 25% FA, 30% FA og 35% FA har høyere aktiveringsenergi (dvs. høyere temperaturfølsomhet) enn REF betongen over 20 °C og lavere aktiveringsenergi under 20 °C. Dette betyr at de tre flygeaskebetongene har større relativ reaksjonshastighet både over og under 20 °C selv om forskjellene mellom de er ganske liten, se figur 8.8 (figur som viser hastighetsfunksjonen fremstilt grafisk). Redusert temperaturfølsomhet ved lave temperaturer betyr at 35% FA, 30% FA og 25% FA betongene ikke er spesielt følsom for vinterforhold, selv om de er tregere enn REF betongen ved 20 °C. Høy temperaturfølsomhet for høye temperaturer (spesielt for 35% FA og 30% FA betongene) fører til at økt utgangstemperatur på betongene, eller å tilføre varme på byggeplass, vil gi en positiv effekt.



Figur 8.7: Aktiveringsenergi for betong med ulike mengde flygeaskeinnhold gitt i prosent (%).

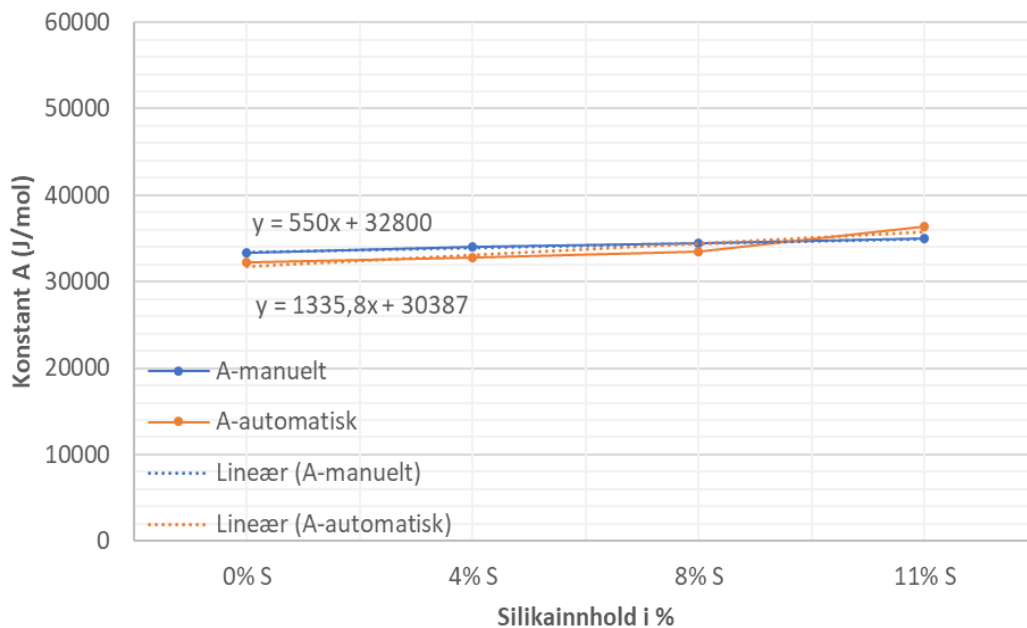


Figur 8.8: Hastighetsfunksjon for betong med ulike mengde flygeaskeinnhold gitt i prosent (%).

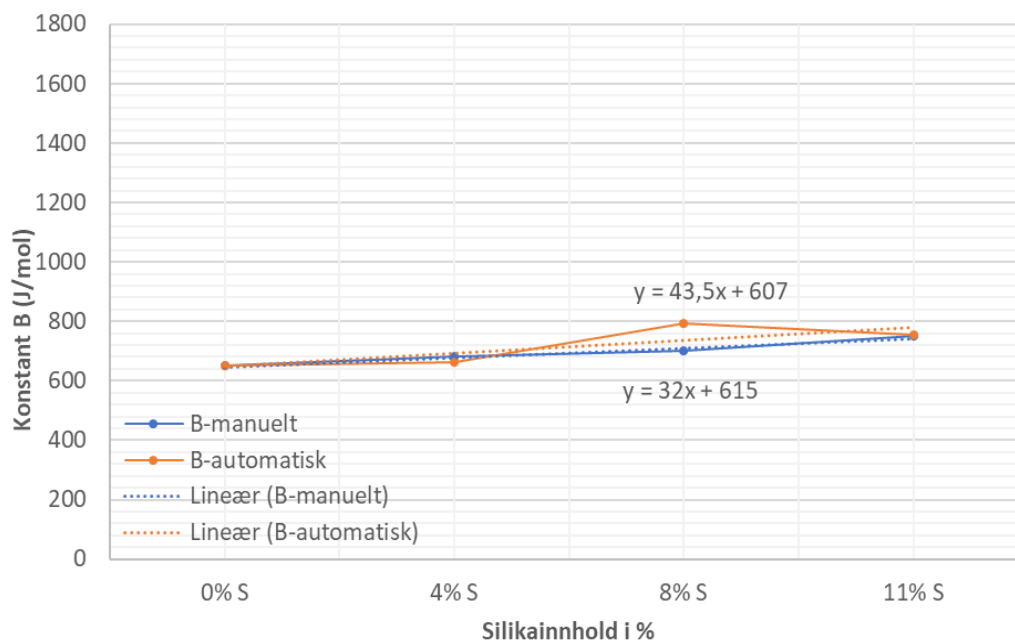
Videre resultatene basert på figur 8.7 stemmer godt overens med teorien beskrevet i delkapittel 3.2.1, som beskriver at betonger med flygeaskeinnhold er langsomme til å reagere sammenlignet med betonger uten flygeaskeinnhold. Det er også viktig å merke seg at det ikke er mye forskjell i aktiveringsenergi for betonger fra 25% til 30% flygeaskeinnhold generelt sett. Videre må det nevnes at aktiveringsenergien fra 35% FA, er et middel verdi av resept nr. 9 og 17. Dette er fordi at resept nr. 17 er en repetisjon av resept nr. 9, dermed middel verdien av de reseptene førte til et mer troverdig resultat.

8.2.3 Silikastøv

Det kommer frem fra resultatene at små mengder av silikastøv i betongen kan føre til betydelige endringer i A og B konstantene, som vist i figur 8.9 og 8.10. Ved tilsetning av silikastøv øker både konstant A og B, noe som kan også observeres i den automatiske tilpasningen. Imidlertid kan det oppstå unøyaktigheter på grunn av et lite knekkpunkt i grafene som viser seg når det er 8% silikastøvinnhold i betongen fra den automatiske tilpasningen. De små justeringene i den manuelle tilpasninger som gjøres i A og B konstantene ved tidligfastheten, er også årsaken til disse unøyaktighetene. Basert på disse resultatene kan det bestemmes med at det er nødvendig å etterkontrollere tilpasninger av konstantene, spesielt når det er høye nivåer av silikastøv i betongen.



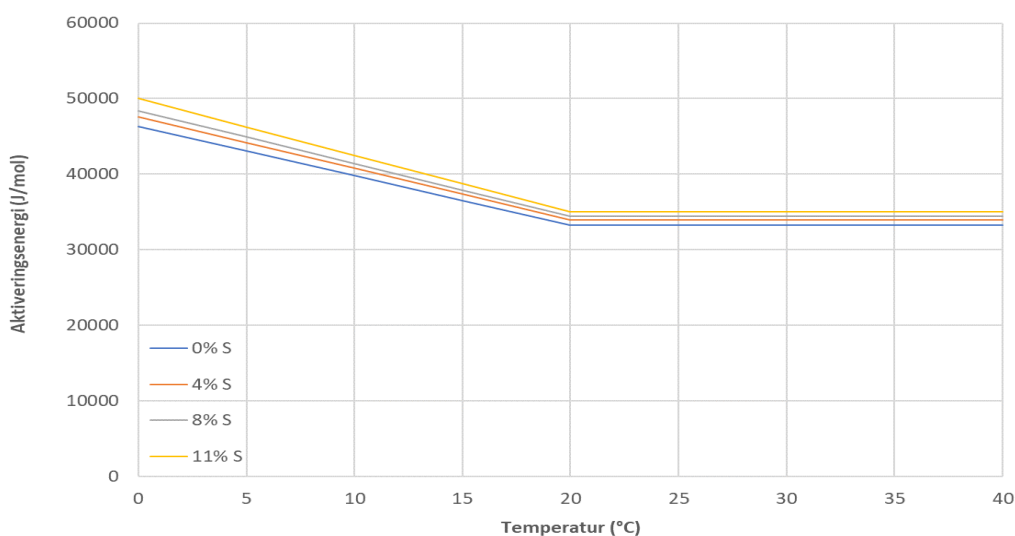
Figur 8.9: A konstant for betong med ulike mengde silikastøvinhold gitt i prosent (%).



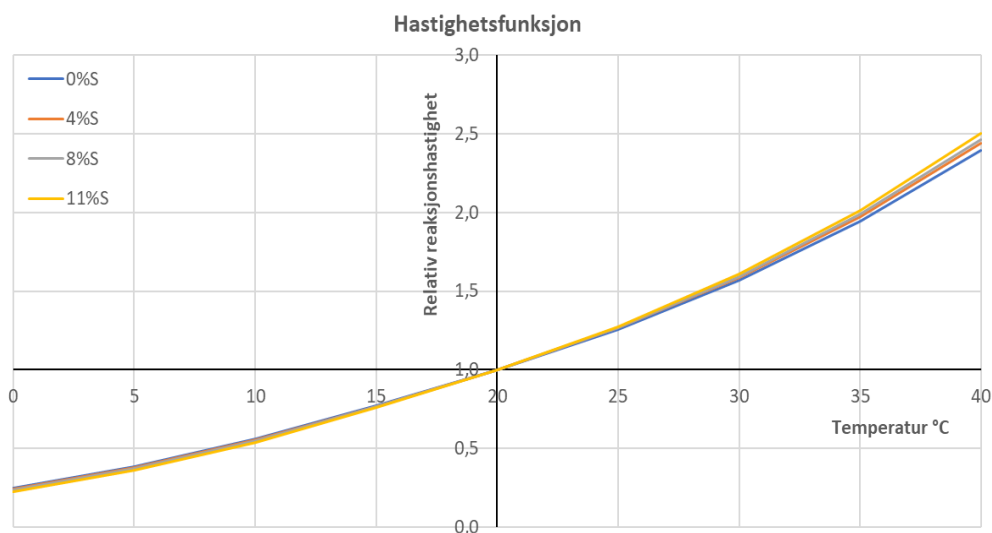
Figur 8.10: B konstant for betong med ulike mengde silikastøvinhold gitt i prosent (%).

Videre som det er vist i de to figurene, ble det også gjort manuelle og automatiske lineære trendlinjer for A og B konstanter. Disse lineære trendlinjene viser også stigning for både A og B konstanter. I tillegg gir disse lineære trendlinjene informasjon om økningen av A og B konstanter og aktiveringsenergi ved økende silikastøvinhold i betongen. Dette kan også observeres ved sammenligning av referansebetongen med 0% og betong med 11% silikastøvinhold fra manuelle tilpasningene. Forskjellen i A konstant var $(35000 - 33300 = 1700 \text{ J/mol})$ og B konstant var $(750 - 650 = 100 \text{ J/mol})$, mens forskjellen i aktiveringsenergien ved 0 °C temperatur var $(50000 - 46300 = 3700 \text{ J/mol})$. Det skal også nevnes at det var en utfordring å oppdage de ubestemte trendene, men med justeringer basert på resultat kunne man tilnærme resultatene på en akseptabel måte.

Grafen i figur 8.11 indikerer at økende mengder silikastøv i betong fører til høyere temperaturfølsomhet. Økende silikastøvinnhold i betongen fører til økende aktiveringsenergi enn 0% silikastøvinnhold både over og under 20 °C. Dette betyr at de silikastøvbetongene har større relativ reaksjonshastighet over 20 °C og mindre relativ reaksjonshastighet under 20 °C, som vist i figur 8.12 (figur som viser hastighetsfunksjonen fremstilt grafisk). Økt temperaturfølsomhet ved lave temperaturer betyr at betongen med silikastøv er mer følsom for vinterforhold enn betong uten silikastøv. Høy temperaturfølsomhet for høye temperaturer (spesielt for betong med 11% silikastøv) fører til at økt utgangstemperatur på betongen, eller å tilføre varme på byggeplass, vil gi en positiv effekt.



Figur 8.11: Aktiveringsenergi for betong med ulike mengde silikastøvinnhold gitt i prosent (%).



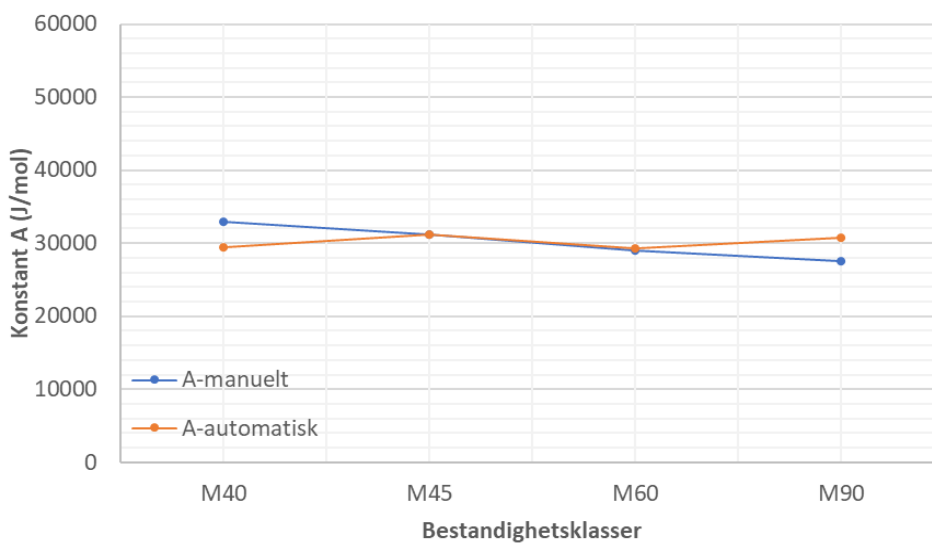
Figur 8.12: Hastighetsfunksjon for betong med ulike mengde silikastøvinnhold gitt i prosent (%).

Det er viktig å nevne at figuren 8.11 skiller seg fra det som ble diskutert i delkapittel 8.2.2, hvor referansebetongen hadde høyest aktiveringsenergi i forhold til betonger med flygeaske. Selv om begge materialene tilhører gruppen pozzolaner, viser figuren at de har ulik effekt på temperaturfølsomheten. Dette skyldes sannsynligvis at silikastøv har høyere reaktivitet i betongen, slik det beskrives i

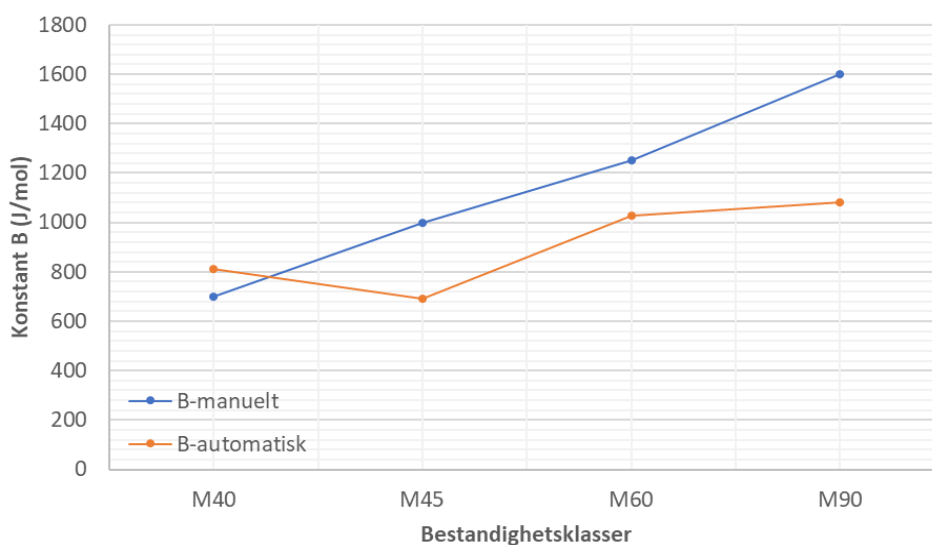
litteraturen i delkapittel 3.2.2. I tillegg demonstrerer figur 8.11 at med økende silikastøvinnhold øker temperaturfølsomheten både over og under 20 °C, mens med økende flygeaskeinnhold i betongen, se figur 8.7, minker temperaturfølsomhet under 20 °C og øker over 20 °C.

8.2.4 Bestandighetsklasser

Det kommer frem fra figur 8.13 og 8.14 at A konstanten avtar for lavere bestandighetsklasser, mens konstant B stiger for lavere bestandighetsklasser. Dette bestemmes direkte av aktiveringsenergi regnearket basert på de angitte bestandighetsklasser, samt funksjonsoppbygging og de innvirkningene de forskjellige bestandighetsklassene har i forhold til hverandre. Som de to figurene viser er det ujevnheter i den automatiske A og B konstantene, dermed ble det gjort en manuell tilpasning av de trendlinjene både for at en kan lett lese om trendlinjen øker eller avtar. I tillegg ga de manuelle tilpasningene en bedre tilnærming når det gjelder tidligfasthet for betongene.

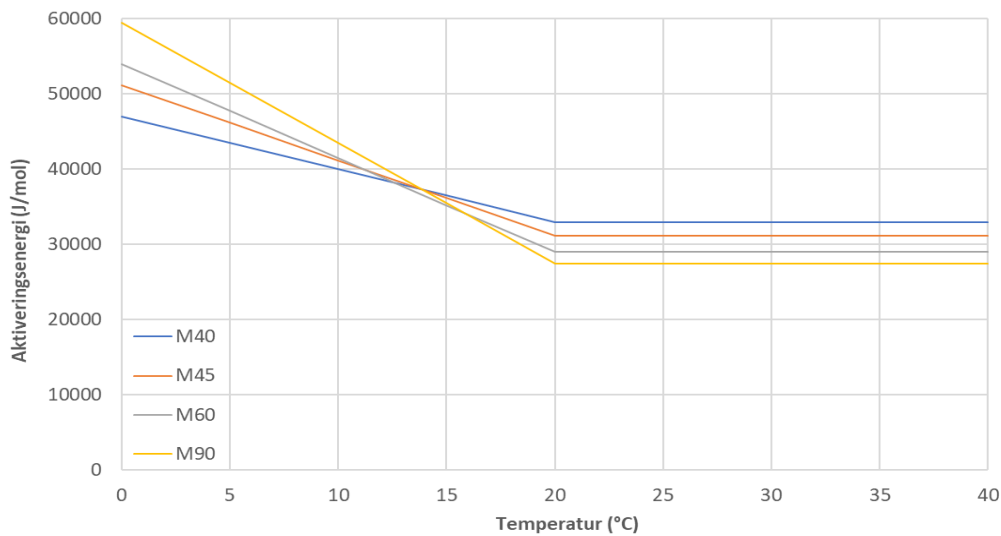


Figur 8.13: A konstant for betong med ulike bestandighetsklasser.

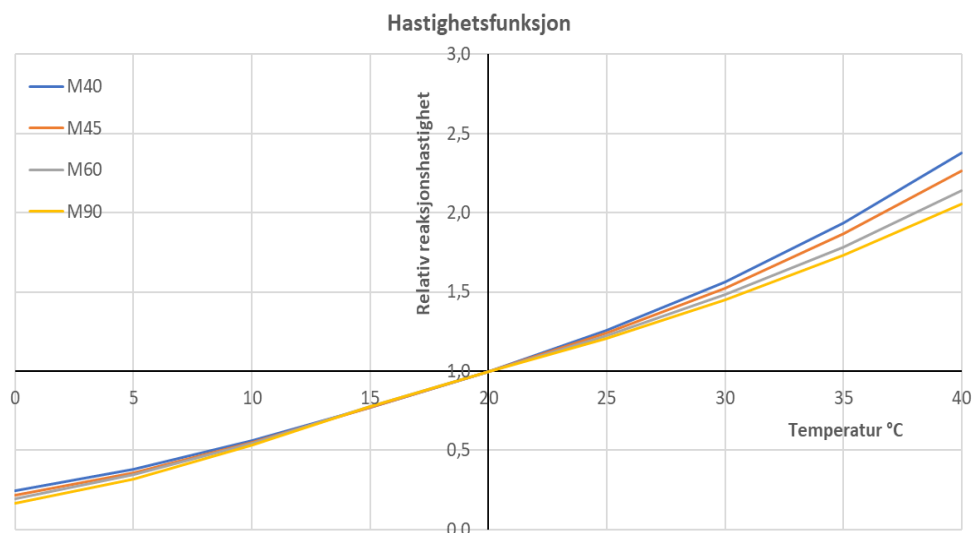


Figur 8.14: B konstant for betong med ulike bestandighetsklasser.

Grafen i figur 8.15 indikerer at betong med lavere bestandighetsklasse har en høyere temperaturfølsomhet. Blandingene med bestandighetsklassene M45, M60 og M90 har lavere aktiveringsenergi enn M40 over 20 °C og høyere aktiveringsenergi under 20 °C. Dette indikerer at de tre betongblandingene med lavere bestandighetsklasse har lavere relativ reaksjonshastighet både ved temperaturer over og under 20 °C, som illustrert i figur 8.16 (figur som viser hastighetsfunksjonen fremstilt grafisk). Redusert temperaturfølsomhet ved lave temperaturer betyr at betongen med bestandighetsklasse M40 er ikke spesielt følsom for vinterforhold, selv om den herder noe langsommere enn M45, M60 og M90 betongene ved 20 °C. Høy temperaturfølsomhet ved høye temperaturer (spesielt for M90 betongen), betyr at økt utgangstemperatur på betongen eller tilførsel av varme på byggeplassen vil ha en positiv effekt på herdingsprosessen.



Figur 8.15: Aktiveringsenergi for betong med ulike bestandighetsklasser.



Figur 8.16: Hastighetsfunksjon for betong med ulike bestandighetsklasser.

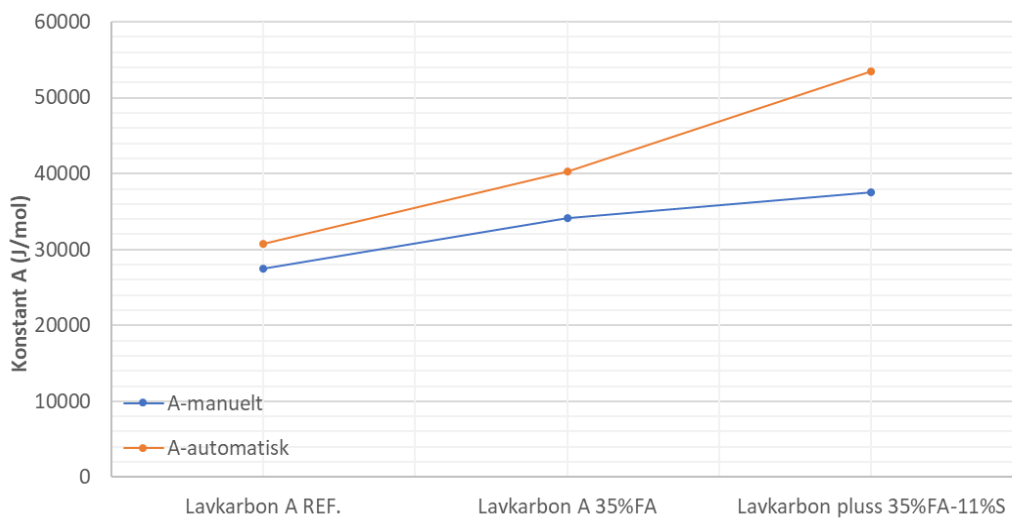
Generelt sett kan det tas en beslutning basert på resultatene at lave bestandighetsklasser er veldig temperaturfølsomme ved lave temperaturer og motsatt, samt A avtar og B stiger jo lavere en velger

bestandighetsklassene. Videre for hastighetsfunksjonen ble referanse temperaturen valgt lik 20 °C ($H(\theta) = 1$), ettersom dette er laboratoriet referanse. Dette er også vist i figur 8.16.

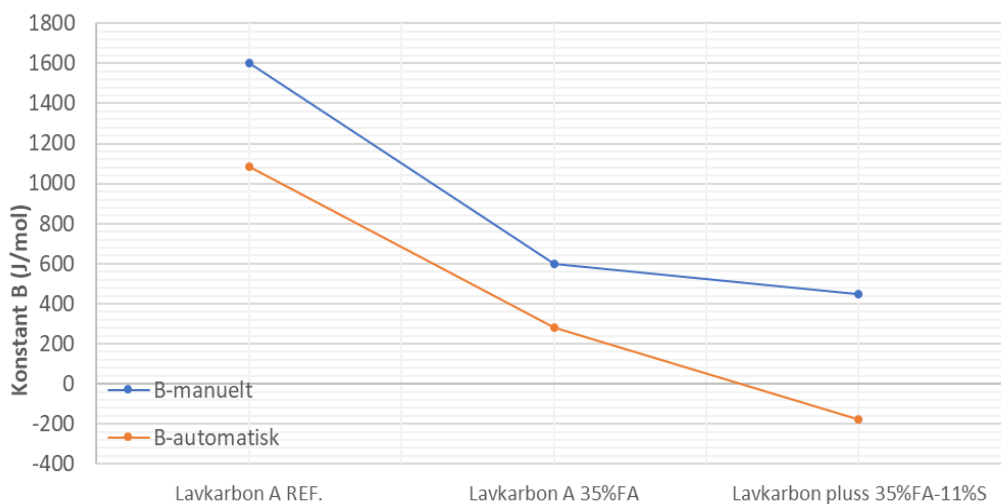
8.2.5 Lavkarbonbetong

Lavkarbonbetonger med B30 M90 betongkvalitet

Figur 8.17 og 8.18 presenterer A og B konstanter som følge av temperaturfølsomheten for de overnevnte betongene. De to figurene resulterer i økende A konstant for høyere lavkarbonklasse, og der imot avtagende B konstant ved høyere lavkarbonklasse. Grunnen til dette er blant annet høy temperaturfølsomhet for lavt lavkarbonklasse, og der imot jo høyere lavkarbonklasse desto mindre temperaturfølsomhet.



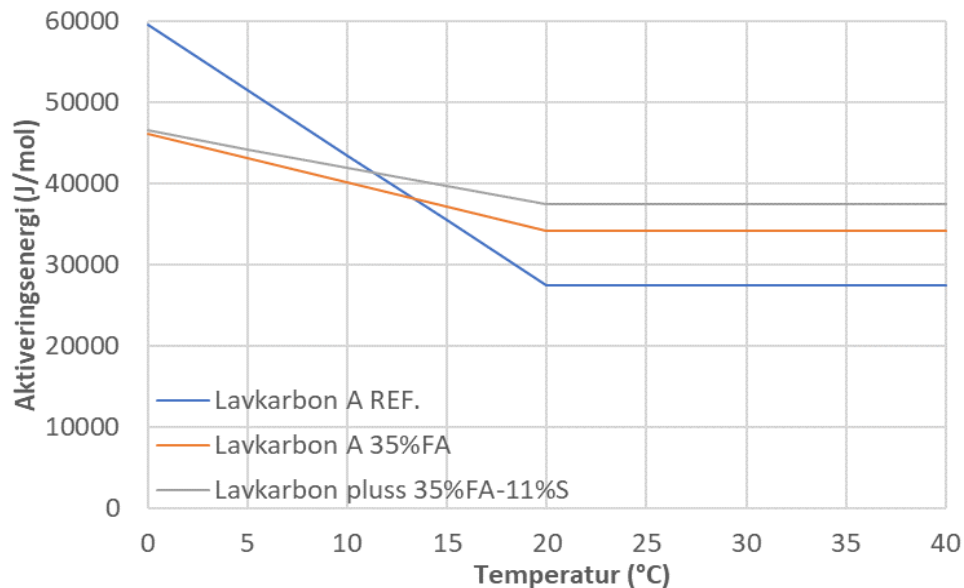
Figur 8.17: A konstant for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.



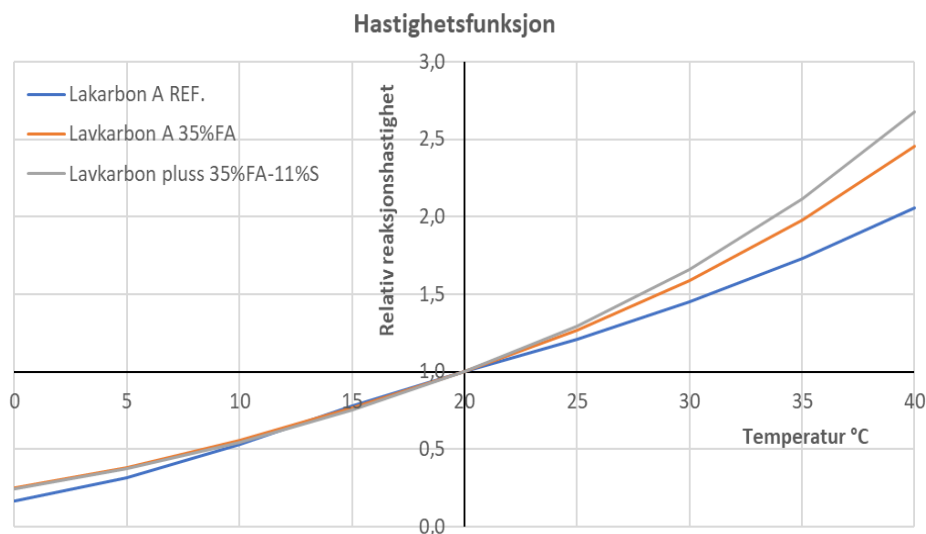
Figur 8.18: B konstant for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Videre for å få bestemte trender for A og B konstanter, ser en forskjellene fra både den manuelle og automatiske tilpasninger vist i de to figurene. Dette er noe som også har ført til en mer nøyaktig tilpasning.

Grafen i figur 8.19 indikerer at betong med høyere lavkarbonklasse har lavere temperaturfølsomhet. De to betongene med lavkarbon A 35%FA og lavkarbon Pluss 35%FA 11%S har høyere aktiveringsenergi enn lavkarbon A REF over 20 °C og lavere aktiveringsenergi under 20 °C. Dette betyr at begge lavkarbonbetongene har større relativ reaksjonshastighet over og under 20 °C, som illustrert i figur 8.20 (figur som viser hastighetsfunksjonen fremstilt grafisk). Betongen med lavkarbon A 35%FA og lavkarbon Pluss 35%FA 11% S viser redusert temperaturfølsomhet ved lave temperaturer, og er derfor ikke spesielt følsom for vinterforhold, selv om de herder noe langsommere enn lavkarbon A REF betongen ved 20 °C. På den annen side viser disse lavkarbonbetongene en høy temperaturfølsomhet ved høye temperaturer, spesielt for lavkarbon Pluss 35%FA 11%S betongen. Dette betyr at økt utgangstemperatur på betongen eller tilførsel av varme på byggeplassen vil ha en positiv effekt på herdingsprosessen. I tillegg viser figur 8.19 at temperaturfølsomheten for lavkarbon Pluss er høyere enn lavkarbon A 35%FA både over og under 20 °C, hvor under 20 °C nærmer grafen seg lavkarbon A 35%FA. Grunnen til det er den motsatte effekten silikastøv har i forhold til flygeaske for temperaturer under 20 °C.



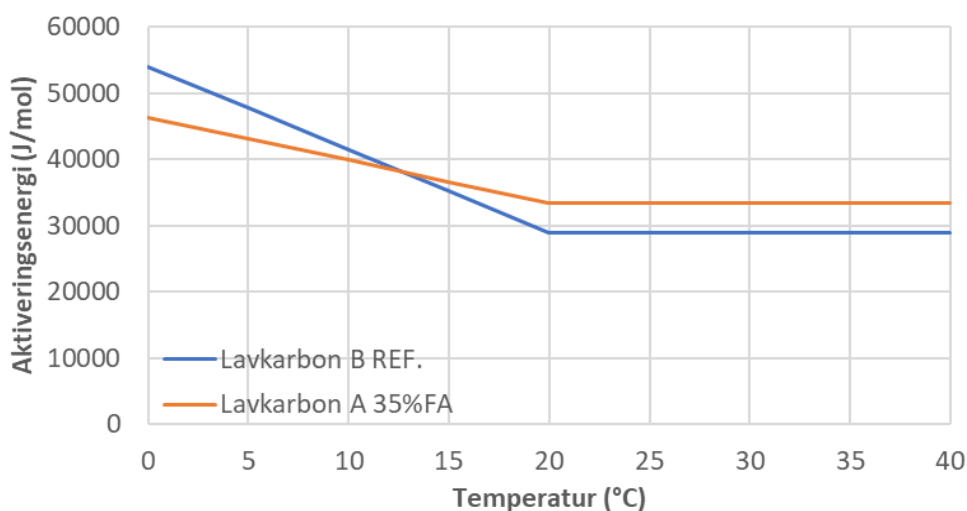
Figur 8.19: Aktiveringsenergi for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.



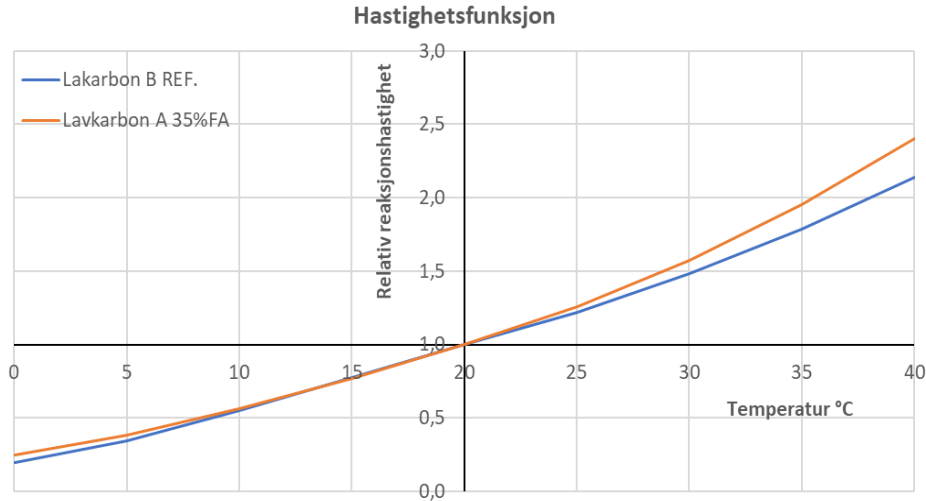
Figur 8.20: Hastighetsfunksjon for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonbetonger med B30 M60 betongkvalitet

Grafen i figur 8.21 indikerer at betong med høyere lavkarbonklasse har lavere temperaturfølsomhet. Betongen med lavkarbon A 35% FA har høyere aktiveringsenergi enn lavkarbon B REF over 20 °C og lavere aktiveringsenergi under 20 °C. Dette betyr at lavkarbon A 35% FA betongen har en større relativ reaksjonshastighet både over og under 20 °C, som illustrert i figur 8.22 (figur som viser hastighetsfunksjonen fremstilt grafisk). Betongen med lavkarbon A 35% FA viser redusert temperaturfølsomhet ved lave temperaturer og er derfor ikke spesielt følsom for vinterforhold, selv om den herder noe langsommere enn lavkarbon B REF betongen ved 20 °C. På den annen side viser lavkarbon A 35% FA betongen en høy temperaturfølsomhet ved høye temperaturer. Dette betyr at økt utgangstemperatur på betongen eller tilførsel av varme på byggeplassen vil ha en positiv effekt på herdingsprosessen. Valg av lavkarbonklassene er stort sett styrt av standarden, type konstruksjon, miljøklasse og hvor høy tidligreaktivitet en ønsker generelt i bransjene.



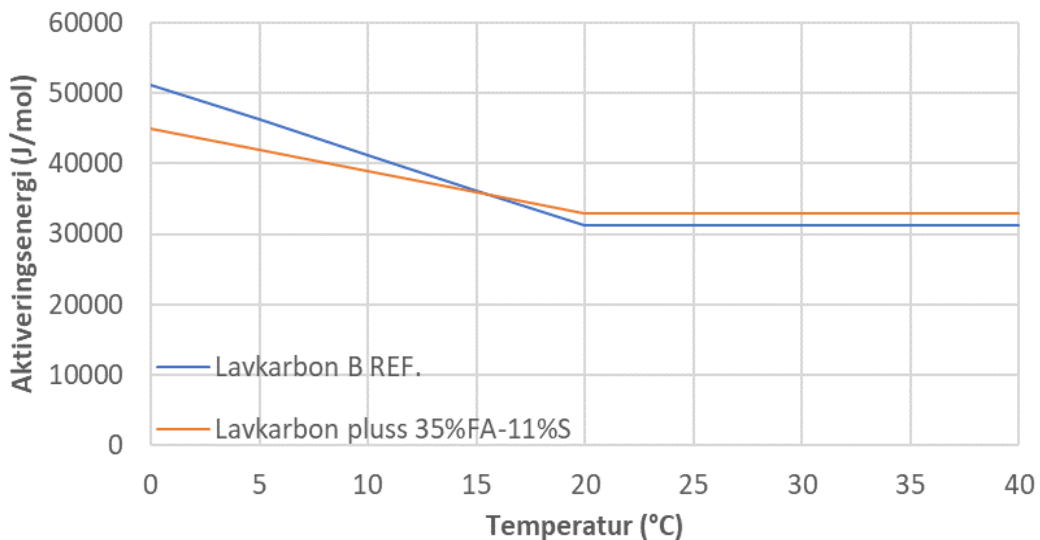
Figur 8.21: Aktiveringsenergi for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.



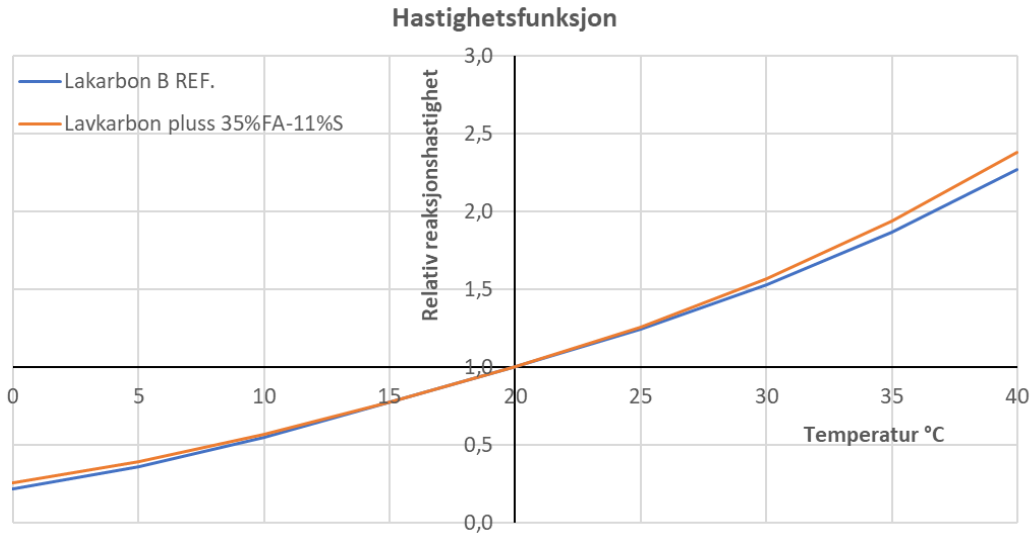
Figur 8.22: Hastighetsfunksjon for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonbetonger med B35 M45 betongkvalitet

Grafen i figur 8.23 indikerer at betong med høyere lavkarbonklasse har lavere temperaturfølsomhet. Betongen med lavkarbon Pluss 35% FA-11%S har høyere aktiveringsenergi enn lavkarbon B REF over 20 °C og lavere aktiveringsenergi under 20 °C. Dette betyr at lavkarbon Pluss 35% FA-11%S betongen har større relativ reaksjonshastighet både over og under 20 °C, som illustrert i figur 8.24 (figur som viser hastighetsfunksjonen fremstilt grafisk). Redusert temperaturfølsomhet ved lave temperaturer betyr at lavkarbon Pluss 35% FA-11%S betongen ikke er spesielt følsom for vinterforhold, selv om den er tregere enn lavkarbon B REF betongen ved 20 °C. Høy temperaturfølsomhet for høye temperaturer (spesielt for lavkarbon Pluss 35% FA-11%S betongen) fører til at økt utgangstemperatur på betongen, eller å tilføre varme på byggeplass, vil gi en god effekt. Lavkarbonklasser med høye mengde av flygeaske og silikastøv er mer reaktive ved høyere temperaturer, og fører til et mest mulig utbytte.



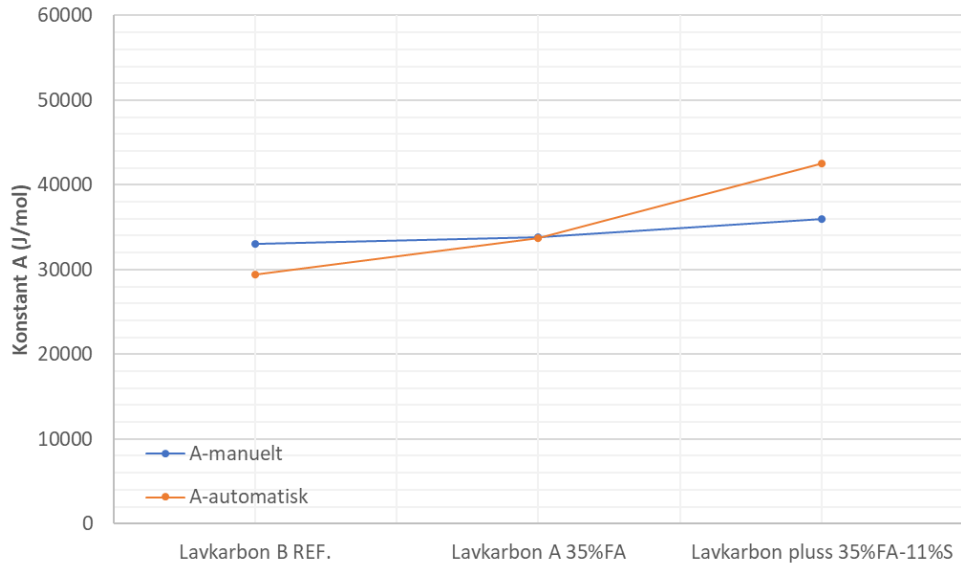
Figur 8.23: Aktiveringsenergi for B35 M45 betong med ulike lavkarbonklasser.



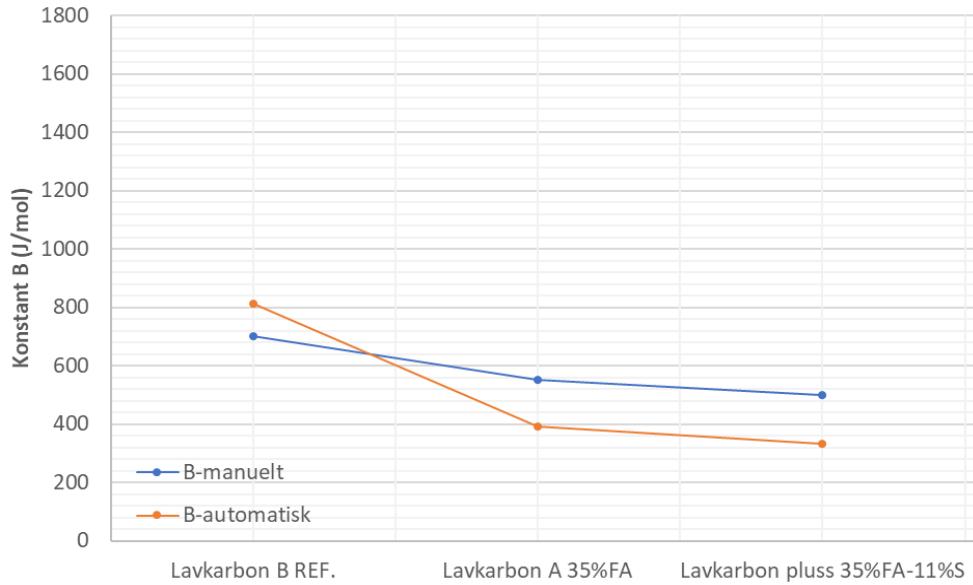
Figur 8.24: Hastighetsfunksjon for B35 M45 betong med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonbetonger med B45 M40 betongkvalitet

Figur 8.25 og 8.26 presenterer resultater av A og B konstanter for tre forskjellige betongblandinger (lavkarbon B REF, lavkarbon A 35%FA og lavkarbon Plus 35%FA 11S). Basert på resultatet vises det at den sistnevnte betongblandingen har høyere A konstant og lavere B konstant enn de andre to betongblandingene, uavhengig av om tilpasningen ble gjort manuelt eller automatisk. Det betyr at denne betongblandingen vil ha bedre egenskaper for blant annet styrke og holdbarhet.

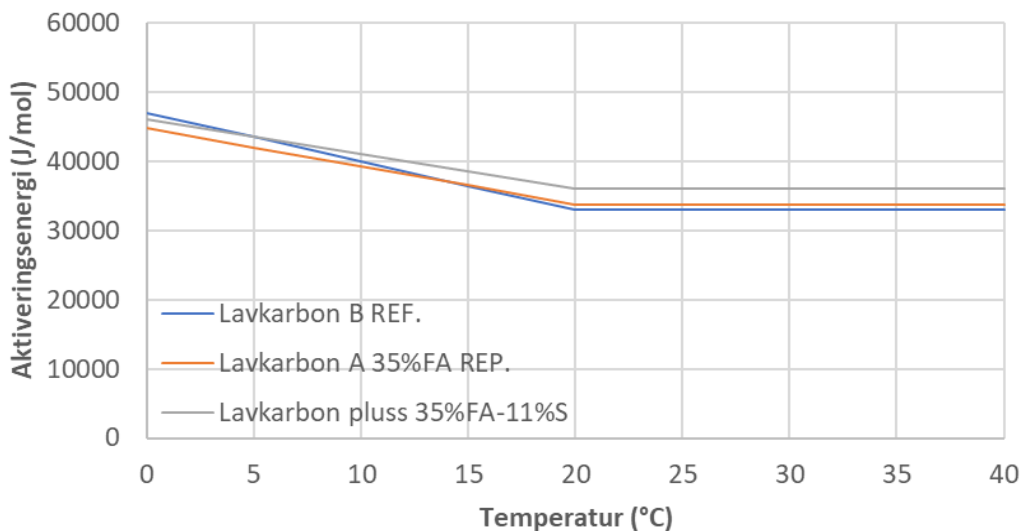


Figur 8.25: Konstant A for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

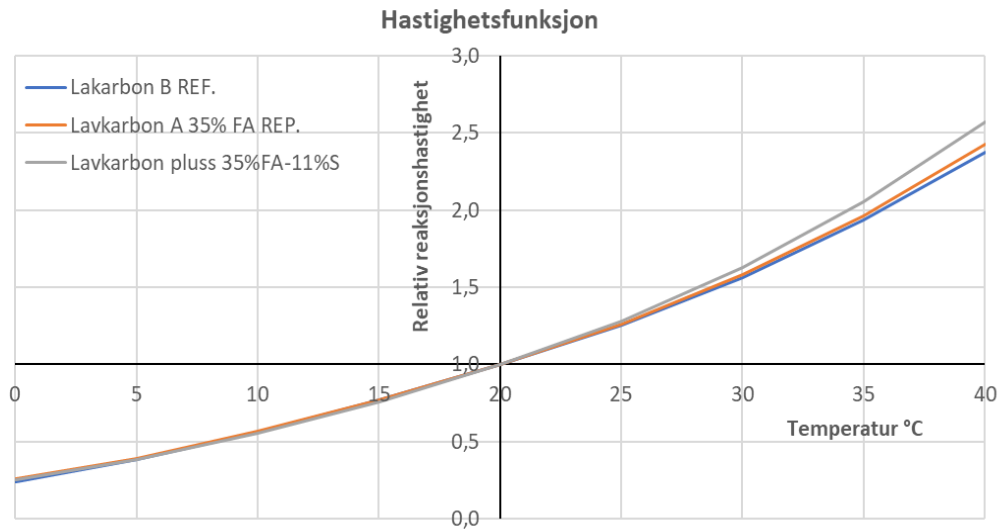


Figur 8.26: Konstant B for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Grafen i figur 8.27 indikerer at betong med høyere lavkarbonklasse har lavere temperaturfølsomhet. Begge lavkarbonbetongene, lavkarbon A 35% FA og lavkarbon Pluss 35% FA-11%S, har høyere aktiveringsenergi enn lavkarbon B REF ved temperaturer over 20 °C og lavere aktiveringsenergi ved temperaturer under 20 °C. Dette betyr at begge lavkarbonbetongene har større relativ reaksjonshastighet både over og under 20 °C, som illustrert i figur 8.28 (figur som viser hastighetsfunksjonen fremstilt grafisk). Redusert temperaturfølsomhet ved lave temperaturer betyr at lavkarbon A 35% FA og lavkarbon Pluss 35% FA-11%S betongene ikke er spesielt følsom for vinterforhold, selv om de er tregere enn lavkarbon B REF betongen ved 20 °C. Høy temperaturfølsomhet for høye temperaturer (spesielt for lavkarbon Pluss 35% FA-11%S betongen) fører til at økt utgangstemperatur på betongen, eller å tilføre varme på byggeplass, vil gi en positiv effekt på herdingsprosessen.



Figur 8.27: Aktiveringsenergi for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

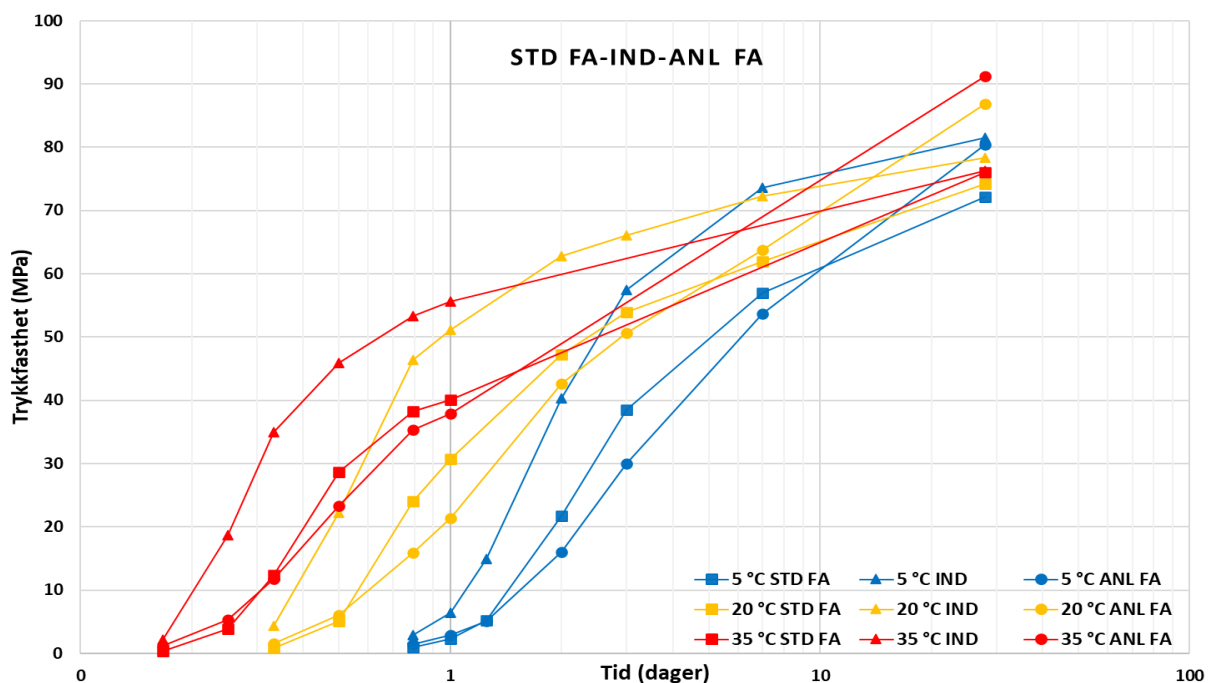


Figur 8.28: Hastighetsfunksjon for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Det bør også merkes at informasjonen om aktiveringsenergien er viktig for å kunne planlegge riktig herdetid for betongen avhengig av temperaturen. Videre er det også viktig å ta hensyn til at betongblandinger kan ha forskjellig temperaturfølsomhet basert på hvilke ingredienser som brukes, og at det derfor er viktig å velge riktig blandingsforhold og herdeprosess for sikre at optimal styrke og holdbarhet oppnås.

8.3 Fasthetsutvikling

8.3.1 Sementtype

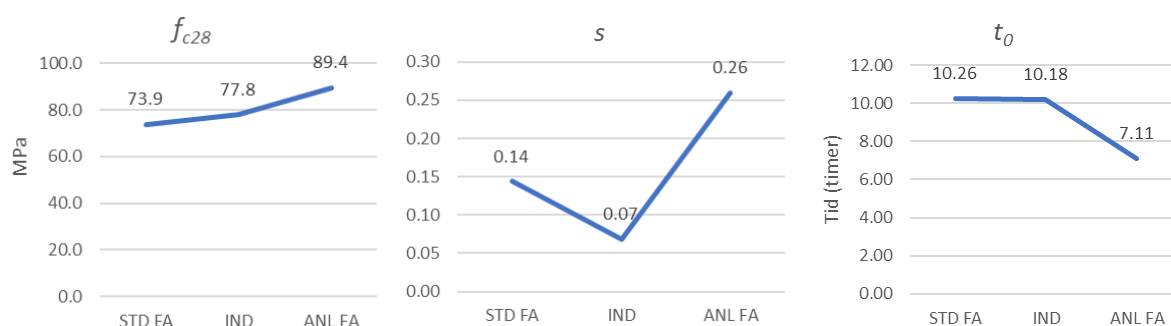


Figur 8.29: Trykkfasthet resultater for STD FA, IND og ANL FA ved ulike temperaturer og tider.

Resultat fra trykkfasthetsutvikling for de tre sementtypene STD FA, IND og ANL FA ved ulike temperaturer og tider kan refereres til tabell 7.26 og figur 8.29. Det kan ses tydelig ved figur 8.29 at betongen med IND-sement har en raskere reaksjon og oppnår høyere fasthetsutvikling enn STD FA og

ANL FA i en tidlig herdefase, men reaksjonshastigheten er avtakende mot slutten av herdetiden sammenlignet med de to andre sementtypene. Ut ifra grafene i figur 8.29 har IND betong allerede fått 10 MPa trykkfasthet etter omtrent 5 timer ved 35 °C, mens betonger med STD FA og ANL FA bruker omtrent 8 timer til å oppnå samme trykkfasthet. Ved 35 °C for ANL FA og STD FA kan man se at betongene har omtrent lik fasthetsutvikling fram til 1 døgn, men ANL FA har en brattere kurve videre mot 28 døgn sammenlignet med STD FA. Ulik mengde flygeaske i sementtypene, ulik finhet og klinkertype er de viktigste årsakene for at betongblandingene med ulike sementtyper oppnår varierende fasthetsutvikling ved ulike temperatur og tid.

Figur 8.30 viser hvordan f_{c28} , s og t_0 har utviklet seg for de ulike sementtypene. Resultatet for f_{c28} viser en økende trend man går fra STD FA til IND og ANL FA. Parameteren s har ikke en trend som kan tolkes, men t_0 verdiene har en minkende trend. Tabell 7.27 viser resultatene i tabellform.



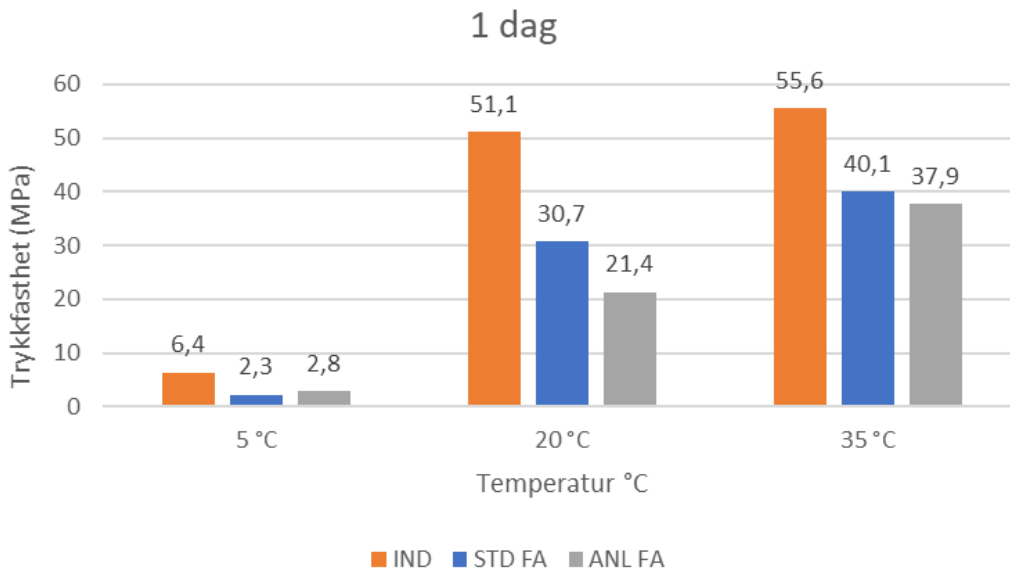
Figur 8.30: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for betonger med ulike sementtyper.

Figur 8.31 illustrer den betydelige innvirkningen av lav temperatur, spesifikt 5 °C i dette tilfellet, på fasthetsutvikling for de tre sementtypene. Fasthetsutvikling for de tre sementtypene ved 5 °C observeres en begrenset trykkfasthet på 3-6 MPa etter ett døgn. På den annen side viser fasthetsutviklingen etter ett døgn ved 20 °C en utbredt rangering på 20-50 MPa for de tre sementtypene, mens fasthetsutviklingen ved 35 °C etter ett døgn er enda høyere enn ved 20 °C og ligger på omtrent 40-60 MPa. Disse funnene indikerer at temperaturforskjeller har betydelig innvirkning på den tidlige fasthetsutviklingen av betongene. Jo lavere temperaturen er, desto lavere fasthetsutviklingen oppnår betongen.

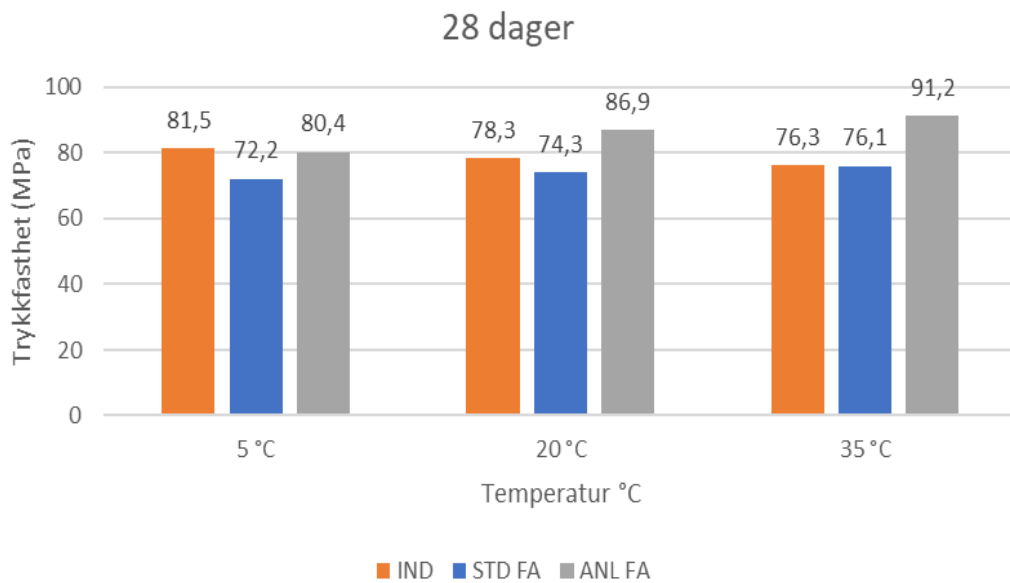
Fasthetsutviklingen etter 28 dager er referert til i figur 8.32, hvor tre betongblandinger med forskjellige sementtyper (STD FA, ANL FA og IND) er presentert i et stolpediagram. For 28 dagers fasthetsutvikling observeres det at betongblandinger med sementtypen ANL FA, som har en tregere sementreaksjon, gradvis begynner å reagere raskere sammenlignet med 1 dages fasthetsutvikling. Det resulterer med høyere fasthetsutvikling mot slutten av herdeforløpet sammenlignet med de andre sementtypene, som inneholder en raskere sementreaksjon i tidligfasthet. Dette gjelder spesifikk for temperatur ved 20 °C og 35 °C.

Fasthetsutviklingen for betongblandinger med IND ved 5 °C viser fortsatt en høyere fasthetsutvikling sammenlignet med STD FA og ANL FA. Dette skyldes at reaksjonene for IND starter tidligere, og betongen oppnår dermed høyere fasthetsutvikling sammenlignet med de to andre betongtypene som har en lavere fasthetsutvikling fram til 28 dager ved 5 °C. Ved 28 døgns fasthet oppnår ANL FA en trykkfasthet på 91 MPa ved 35 °C, mens STD FA og IND har noe lavere trykkfasthet, med omtrent 75 MPa for begge sementtypene. Fasthetsutviklingen for de tre sementtypene ved 20 °C følger samme

trend som ved 35 °C, hvor ANL FA har den høyeste fasthetsutviklingen med 87 MPa, etterfulgt av IND med 78 MPa og STD FA med 74 MPa.

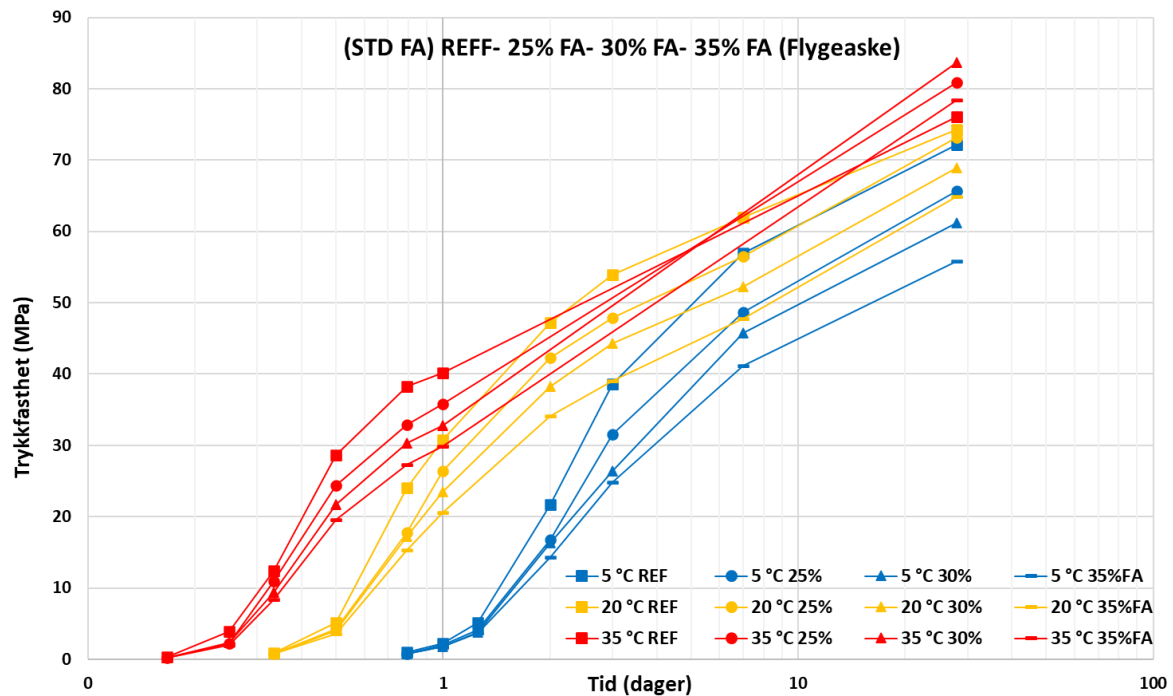


Figur 8.31: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med ulike sementtyper.



Figur 8.32: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med ulike sementtyper.

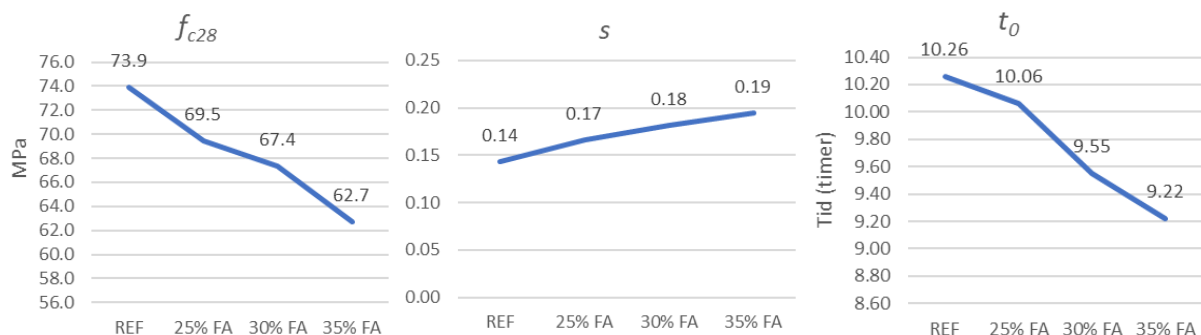
8.3.2 Flygeaske



Figur 8.33: Trykkfasthetsresultater for flygeaske serien ved ulike temperaturer og tider.

Figur 8.33 presenterer resultatene av trykkfastheten for betongblandinger med andeler REF, 25%, 30% og 35% flygeaske ved temperatuene 5 °C, 20 °C og 35 °C over 28 døgns fasthet. Hver temperatur er representert med forskjellige farger, og hver betongblanding med forskjellige mengder flygeaske har blitt merket med et unikt mønster for å skille dem fra hverandre. Grafene i figur 8.33 tydeliggjør at referansebetongen (REF) har en tidligere og høyere fasthetsutvikling sammenlignet med de andre betongblandinger som inneholder ulike mengder flygeaske. Dette er i samsvar med det som ble forklart i kapittel 3.2.1, der det ble påpekt at tilsetningen av flygeaske i betongen fører til en langsommere fasthetsutvikling og en forskyvning av modenhetstiden, noe som medfører at betongen oppnår høyere fasthetsutvikling senere i herdeprosessen. Derfor observeres det at jo høyere andel flygeaske i betongen er, desto lavere blir fasthetsutviklingen i den tidlige herdefasen ved 5 °C, 20 °C og 35 °C.

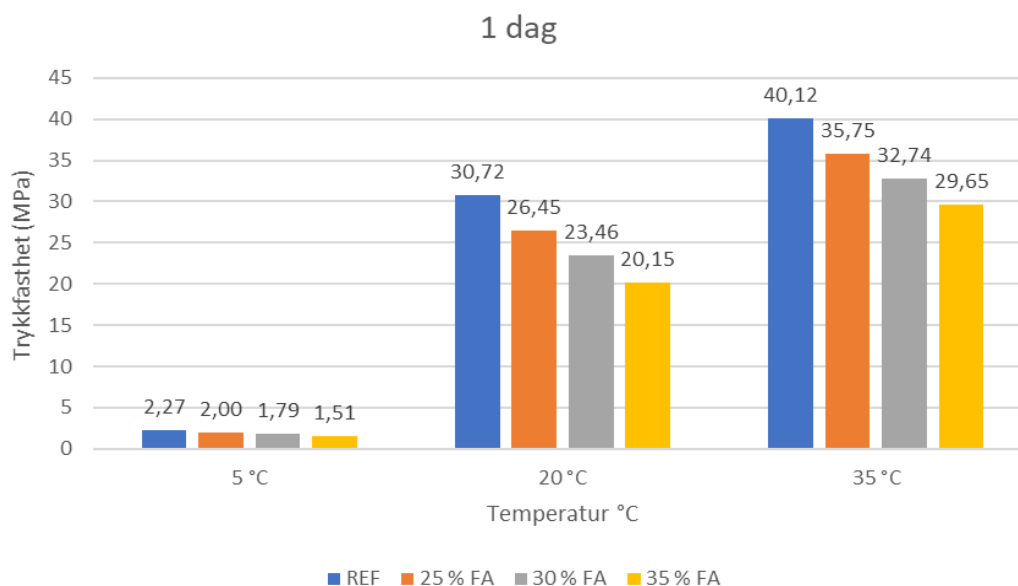
Figur 8.34 viser hvordan f_{c28} , s og t_0 har endret seg med en økende flygeaskeinnhold. Ut ifra tabellen viser f_{c28} en minkende trend for økende flygeaskeinnhold fra 18% til 35% i betongblandingen. Verdiene for parametrene s er motsatte av f_{c28} og har en økende trend med økende flygeaske. Parametrene t_0 har også en minkende trend. Tabell 7.29 viser resultatene i tabellform.



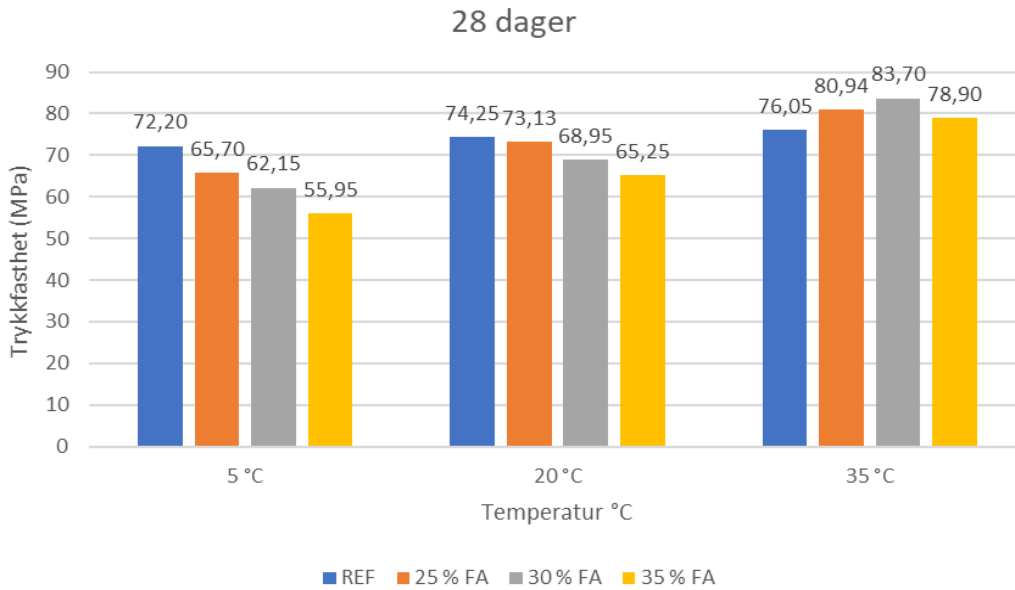
Figur 8.34: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for betonger med ulike flygeaskeinnhold.

Figur 8.35 illustrerer endringen i fasthetsutvikling over en periode på ett døgn for betongblandinger med ulike mengder flygeaske ved 5 °C, 20 °C og 35 °C. Grafen tydeliggjør at tilsetning av 25% flygeaske i betongen fører til en reduksjon i trykkfastheten fra 31 MPa for referansebetongen (REF) til 26 MPa for betongblandingen med 25% flygeaske. Den samme trenden gjelder også ved 35 °C, der referansebetongen oppnår en trykkfasthet på 40 MPa etter ett døgn, mens betongen med 25% flygeaske oppnår en trykkfasthet på 36 MPa. Forskjellen i fasthetsutvikling etter ett døgn ved 5 °C er omtrent den samme. Dette kan forklares med at reaksjonen for flygeaske ikke har kommet godt i gang og betongen har ikke fått tilstrekkelig varme for å starte herdeprosessen.

Figur 8.36 illustrerer endringen for trykkfasthet når ulike mengder flygeaske erstattes med sementen i betongblandinger. Som tidligere nevnt i avsnitt 6 under kapittel 3.2.1, tilsetning av flygeaske vil øke fastheten til betongblanding ved slutfastheten. Dette betyr betongen oppnår en høyere fasthetsutvikling ved et senere modenhetstid, eller ved en høyere temperatur som 35 °C. For eksempel ved en temperatur på 35 °C oppnår referansebetongen (REF) en trykkfasthet på 76 MPa, mens betongblandingen med 25% flygeaske oppnår en trykkfasthet på 81 MPa. Denne trenden fortsetter for 30% flygeaskeinnhold, hvor betongblandingen oppnår en trykkfasthet på 84 MPa. Imidlertid oppnår betongblandingen med 35% flygeaske en lavere trykkfasthet på 78 MPa noe som er det motsatte trenden sammenlignet med betongblandinger med innhold av 25% og 30% flygeaske. Dette kan forklares med at reaksjonen for flygeaske trenger lengre tid for å oppnå sin styrke, derfor oppnår betonger med 35% flygeaskeinnhold en lavere trykkfasthet enn betongblandingene som har 25% eller 30% flygeaske. Ved 20 °C viser at betongblandinger med lavere flygeaskeinnhold har oppnådd høyere trykkfasthet, mens ved 35 °C er effekten motsatt, og betongblandinger med økende dosering av flygeaskeinnhold har oppnådd høyere fasthetsutvikling. Disse to observasjonene kan forklares med at ved senere modenhetstid vil effekten av økende flygeaske i betongblanding resultere med økende trykkfasthet sammenlignet med betongblandinger som inneholder mindre flygeaske.



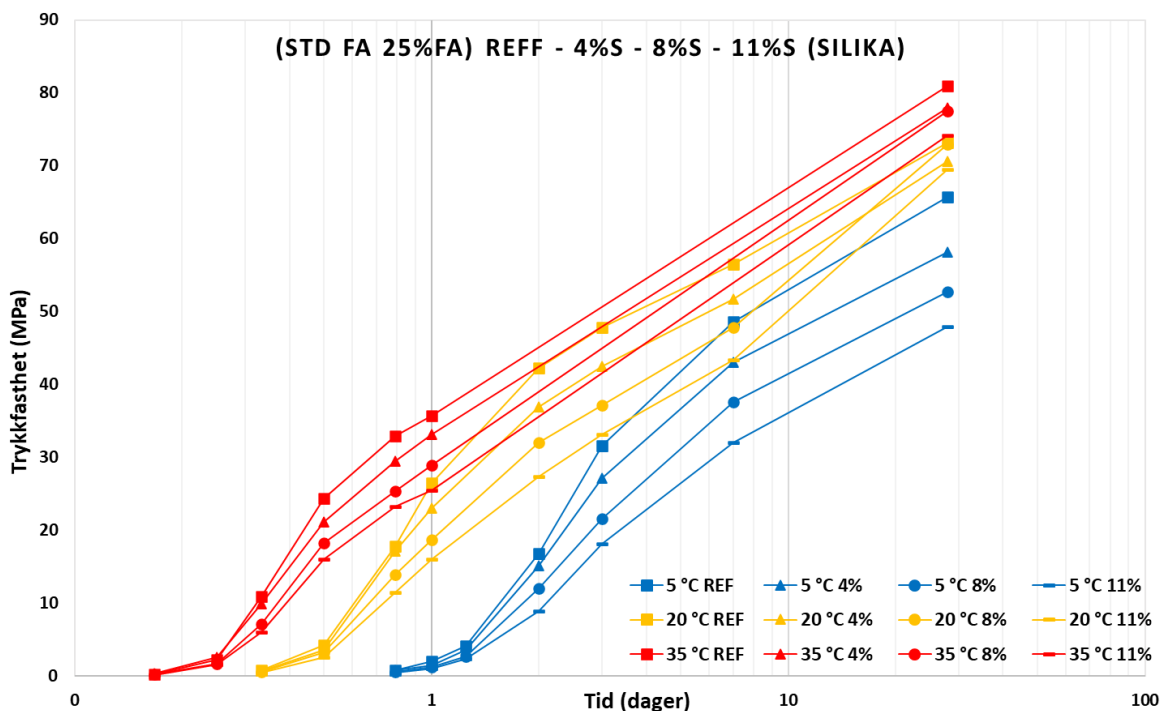
Figur 8.35: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med flygeaskeinnhold.



Figur 8.36: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med flygeaskeinnhold.

Totalt sett vil betongblandinger med 35% flygeaskeinnhold oppnå enda høyere trykkfasthet enn betongblandinger med 25% eller 30% flygeaskeinnhold ved slutfasthet (56 eller 91 dager). Årsaken til den høyere trykkfastheten ved 35 °C for betonger med økende flygeaskeinnhold er den høye temperaturen. For å kunne argumentere denne påstanden kan trykkfasthetsresultatene for 35 °C sjekkes, hvor modenhetstiden for betongblandingen oppnås tidligere på grunn av den høye temperaturen. Høye temperaturer, som 35 °C, akselererer reaksjonen for flygeaskeinnhold, noe som fører til at modenhetstiden og fasthetsutviklingen oppnås tidligere enn ved støping i vanlig temperatur som 20 °C.

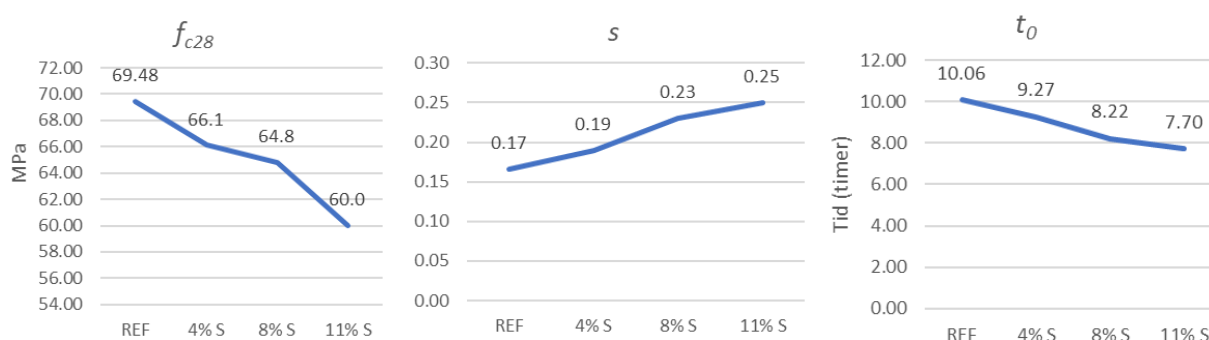
8.3.3 Silikastøv



Figur 8.37: Trykkfasthetsresultater for silikastøv serien ved ulike temperaturer og tider.

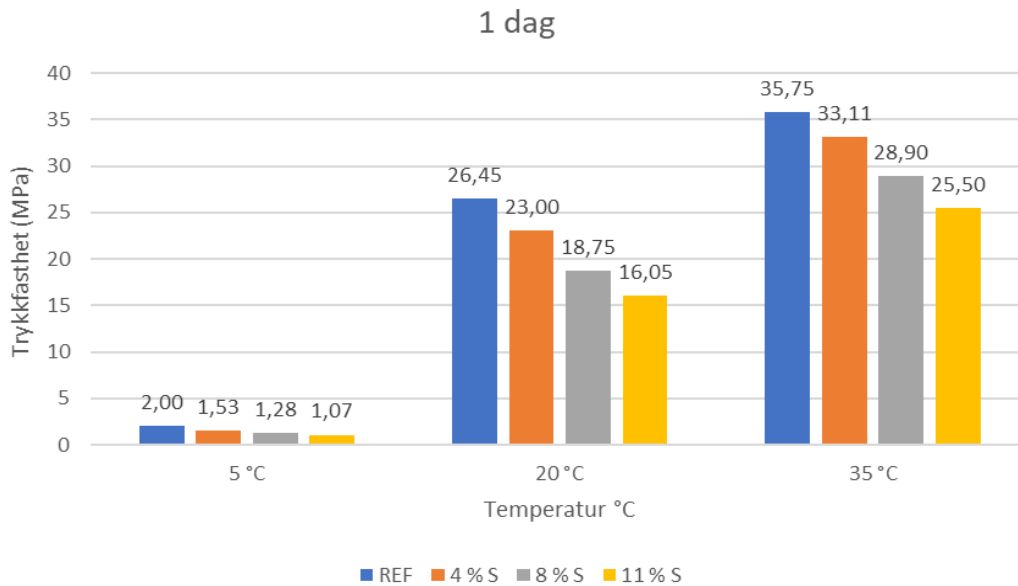
Figur 8.37 viser at betongblandinger uten silikastøv (REF betong) oppnår høyere trykkfasthet ved ulike temperaturer sammenlignet med betongblandinger som inneholder ulike mengder silikastøv fram til 28 døgns fasthet, men spesielt ved 1 døgns fasthet. Som beskrevet i kapittel 3.2.2, vil betongblandinger med silikastøv og lav temperatur ha en lavere fasthetsutvikling sammenlignet med temperaturer på 20 °C eller 35 °C. Dette kan observeres i figur 8.37, hvor betongblandinger ved 5 °C oppnår en fasthetsutvikling på omtrent 1-2 MPa fram til ett døgns fasthetsutvikling, mens ved 20 °C oppnår de betongene en fasthetsutvikling på 16-26 MPa, og ved 35 °C oppnår betongblandinger en fasthetsutvikling på 25-35 MPa for samme aldersperiode. Disse resultatene kan observeres mer nøyaktigere ved tabell 7.30.

Figur 8.38 viser hvordan parameterne f_{c28} , s og t_0 har endret seg med økende silikastøvinnhold. Ut ifra figuren viser f_{c28} verdiene en minkende trend med økende silikastøvinnhold fra 0% til 11%, mens verdiene for parameterne s har en økende trend med økende silikastøvinnhold. Parameterne t_0 har også en minkende trend med økende silikastøvinnhold. Tabell 7.31 viser resultatene i tabellform.

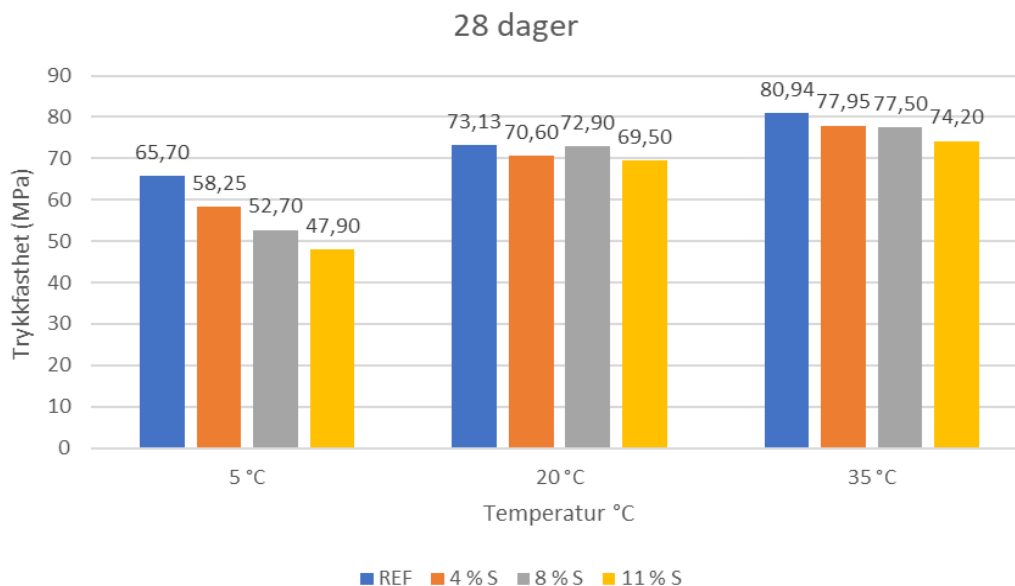


Figur 8.38: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for betonger med ulike silikastøvinnhold.

I henhold til figur 8.39 observeres det at betongblandinger som inneholder ulike mengder silikastøv viser en nedgang i trykkfasthet ved 20 °C. For betong med 4% silikastøv oppnås en trykkfasthet på 23 MPa etter ett døgn, mens 8% silikastøvinnhold fører til en reduksjon i trykkfasthet til 18 MPa. Videre, 11% silikastøvinnhold reduserer trykkfastheten igjen til 16 MPa etter ett døgns fasthet, noe som tydelig viser en minkende trykkfasthet med økende silikastøvinnhold. Dette indikerer at økende mengder silikastøv i betongblandinger resulterer i lavere trykkfasthet ved 20 °C. Den samme trenden gjelder også for betong ved 35 °C. For referanse betong oppnås en trykkfasthet på omtrent 38 MPa etter ett døgn, mens betongblandinger med 4%, 8% og 11% silikastøv oppnår henholdsvis 33 MPa, 29 MPa og 25 MPa trykkfasthet ved ett døgns fasthet. Dette indikerer at effekten av økende silikastøvinnhold i betongblandingen fører til en nedgang i trykkfasthet etter ett døgn, uavhengig av temperaturer 5 °C, 20 °C og 35 °C.



Figur 8.39: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med silikastøvinnhold.

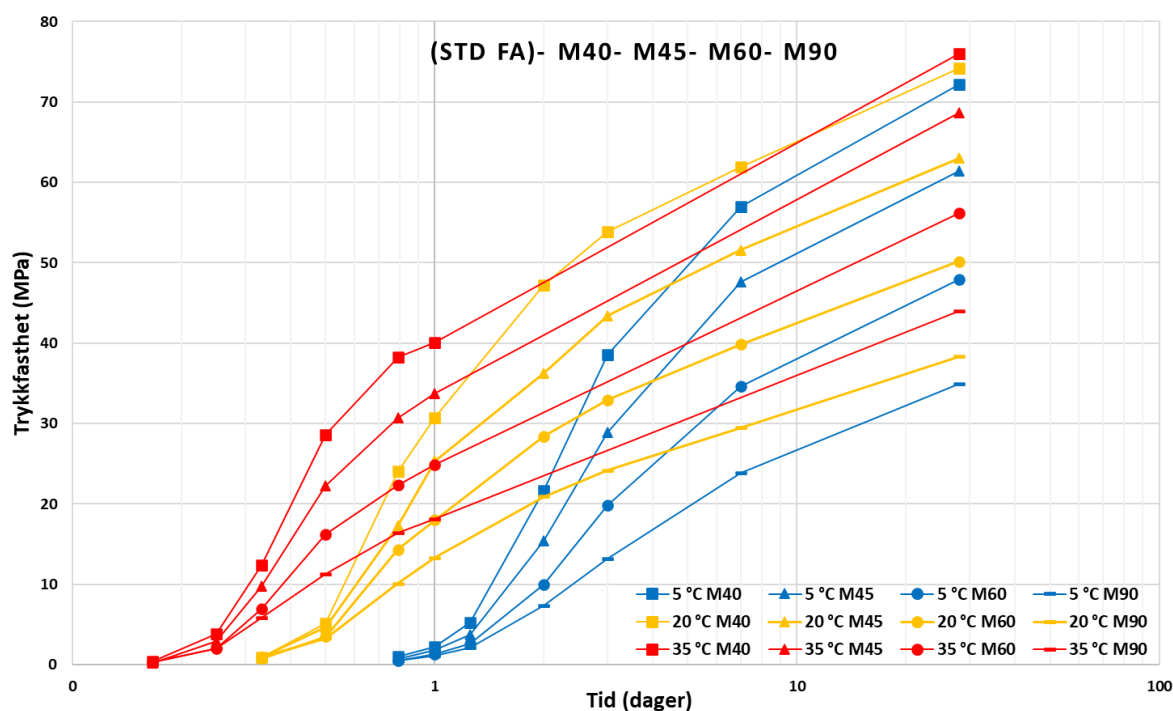


Figur 8.40: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med silikastøvinnhold.

Figur 8.40 viser trykkfasthetsutviklingen etter 28 dager ved ulike temperaturer for betongblandinger med forskjellige mengder silikastøv. Silikastøv har en positiv innvirkning på tidlig fasthetsutvikling, det vil si frem til 28 dager, men fasthetsutviklingen fortsetter å øke i senere faser av herdeprosessen. Dette skyldes blant annet den spesifikke overflateegenskapen til silikastøv, som er grundig forklart i kapittel 3.2.2. Ved en temperatur på 5 °C opprettholdes den samme minkende trenden som ved 1 døgns fasthetsutvikling. Dette kan skyldes at betongblandingen, i tillegg til forskjellige mengder silikastøv, også inneholder flygeaske, noe som forskyver herdeprosessen ytterligere sammenlignet med vanlig betong uten flygeaske. Silikastøv er også sterkt temperaturavhengig. Basert på figur 8.40 har referansebetongen (REF) en trykkfasthet på 66 MPa ved 5 °C, mens betong med 4% silikastøv oppnår en trykkfasthet på 58 MPa. For betongblandinger med 8% og 11% silikastøv oppnås trykkfastheter på henholdsvis 53 MPa og 48 MPa etter 28 dager. Dette tyder tydelig på at økende mengder silikastøv ved 5 °C ved 28 dager resulterer i reduksjon av trykkfasthet.

Trykkfastheten ved 20 °C ved 28 dager er omtrent den samme for de ulike betongblandingene, noe som kan tolkes som at silikastøvinnhold i betongen har hatt en høyere fasthetsutvikling ved denne temperaturen sammenlignet med 5 °C. Trykkfastheten ved 28 dager ved 20 °C ligger rundt 70-73 MPa. Dette kan indikere at temperaturen har bidratt til bedre utvikling av silikastøv og gitt høyere fasthet enn ved 5 °C. For betong ved 35 °C viser også fasthetsutviklingen en nedadgående trend med økende mengder silikastøv. Høy temperatur som 35 °C kan føre til at betongen med silikastøvinnehold, får høyere fasthetsutvikling på grunn av dannelse av mer porøse reaksjonsprodukter. Imidlertid har denne betongblandingen i dette tilfellet oppnådd motsatt effekt, og det kan være flere årsaker til dette, blant annet at det fortsatt er en tidlig fase av herdeprosessen. Hvis vi hadde vurdert fasthetsutviklingen etter 56 eller 91 dager, ville resultatene vært annerledes enn det som vises ved 28 dager.

8.3.4 Bestandighetsklasse

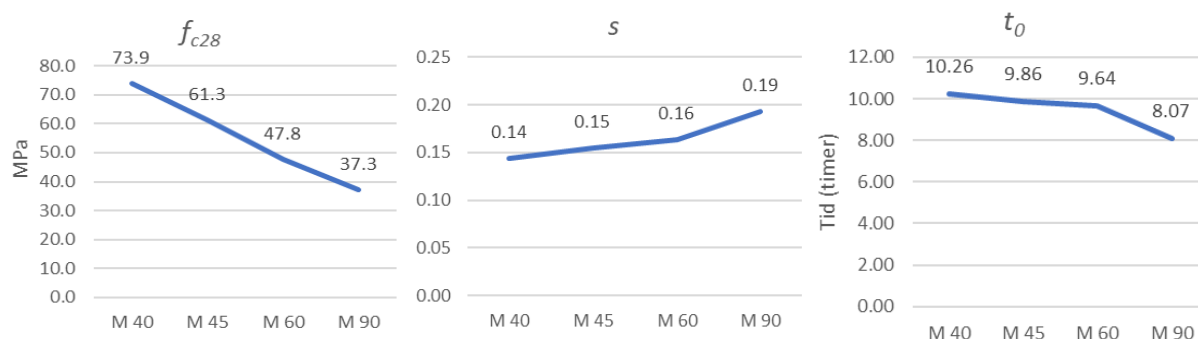


Figur 8.41: Trykkfasthetsresultater for bestandighetsklasse serien ved ulike temperaturer og tider.

I figur 8.41 vises endringen i trykkfasthet over 28 dager for betong med ulike bestandighetsklasser, M40, M45, M60 og M90. Fargene i grafene indikerer vanntemperaturen i badekaret der betongprøvene ble plassert. De røde grafene representerer en vanntemperatur på 35 °C, de gule grafene representerer 20 °C, og blå grafene representerer 5 °C. Hver bestandighetsklasse er markert med forskjellige mønstre for bedre lesbarhet. For eksempel den røde grafen med firkantmønsteret indikerer trykkfasthetsutviklingen for M40 ved 35 °C, mens den blå grafen med strekmønsteret representerer trykkfasthetsutviklingen for M90 ved 5 °C.

Grafene i figur 8.41 tydeliggjør at lavere bestandighetsklasse fører til lavere fasthetsutvikling. For eksempel viser den røde grafen med trekantmønsteret trykkfastheten for M45 ved 35 °C, mens den røde grafen med strekmønsteret representerer trykkfastheten for M90 ved 35 °C. Betongblandingen med bestandighetsklasse M45 oppnår en trykkfasthet på omtrent 30 MPa, mens betongblandingen med M90 oppnår en lavere trykkfasthet på omtrent 10 MPa i samme tidsperiode. Dette kan tolkes som at lavere bestandighetsklasse resulterer i lavere fasthetsutvikling ved 5 °C, 20 °C og 35 °C.

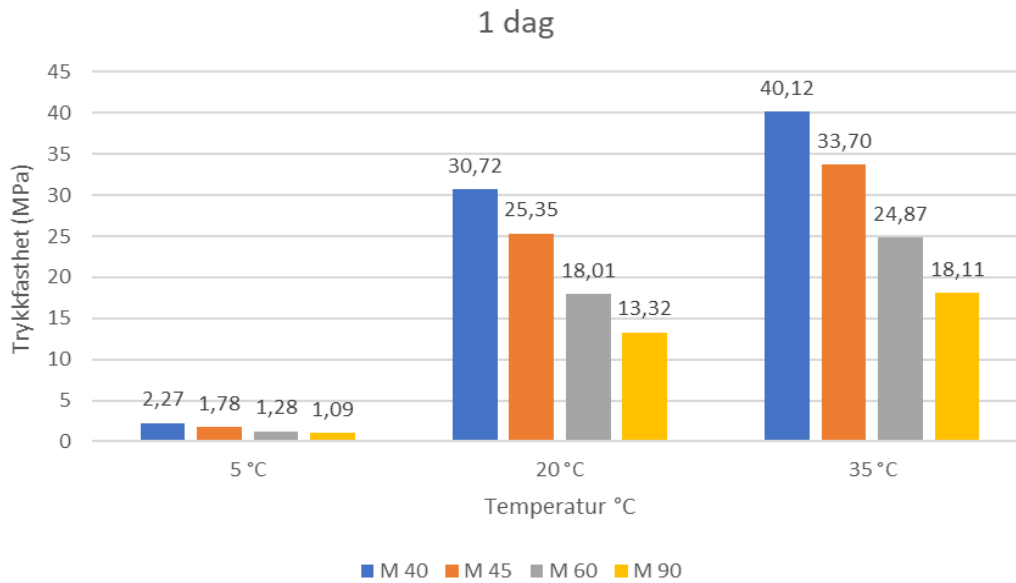
Figur 8.42 viser hvordan parameterne f_{c28} , s og t_0 har endret seg med lavere bestandighetsklasse. Figuren viser en tydelig minkende verdi for f_{c28} med lavere bestandighetsklasse fra M40 til M90. Parameteren s har en økende trend, mens t_0 viser minkende verdier med lavere bestandighetsklasse. Tabell 7.33 viser resultatene i tabellform.



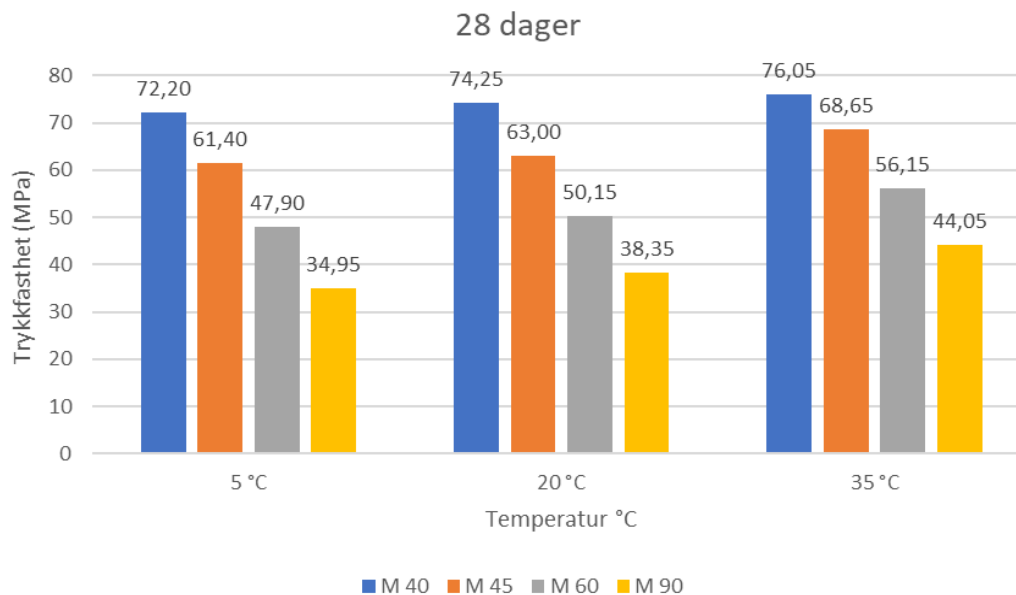
Figur 8.42: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for betonger med ulike bestandighetsklasser.

Figur 8.43 viser trykkfasthetsutvikling for betongblandingene med M40, M45, M60 og M90 etter et døgn ved ulike temperaturer. Fasthetsutvikling ved 5 °C viser et lav verdi sammenlignet med 20°C og 35 °C. Fasthetsutvikling for bestandighetsklassene M40 ved 5 °C har oppnådd en trykkfasthet på 2,3 MPa, mens samme blandingen har oppnådd omtrent 13 ganger høyere fasthetsutvikling, noe som tilsvarer en økning på omtrent 1300% ved å bare sette dem i 20 °C temperatur. Ved 35 °C oppnår betongen en trykkfasthet på omtrent 18 ganger høyere enn ved 5°C noe som tilsvarer en økning på omtrent 1800%. Dette er en tydelig trend som viser at lavere bestandighetsklasse fører til en minkende fasthetsutviklingen for betongblandinger. Ved å øke temperaturen fra 5 °C til 20 °C er det tydelig at betongen får en mye raskere fasthetsutvikling enn ved å øke temperaturen fra 20 °C til 35 °C. Dette kan sjekkes ved å finne differansen mellom de to temperaturene som ble vist for betongblanding med M40 bestandighetsklasse.

Fasthetsutvikling ved 28 døgn, figur 8.44, for ulike bestandighetsklassene og temperaturene viser omtrent like verdier noe som betyr at betongblandingene har oppnådd sine fasthetsutvikling etter 28 døgn og samtidig betongen er ikke lenger følsom for temperaturen den er utsatt for sammenlignet med fasthetsutvikling ved 1 døgn. Ut ifra figur 8.44 kan det tolkes at temperaturfølsomheten ved 28 døgn fasthet ved lavere bestandighetsklasse er mindre påvirket enn de andre bestandighetsklassene.



Figur 8.43: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med ulike bestandighetsklasser.

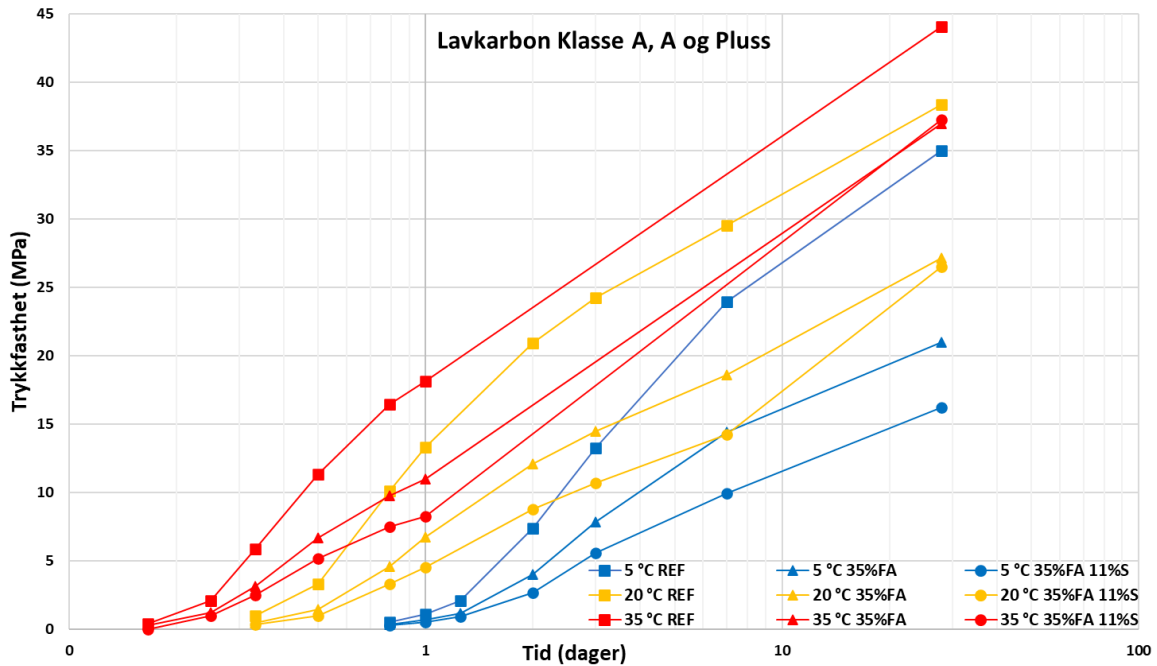


Figur 8.44: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for betonger med ulike bestandighetsklasser.

Betongblanding med bestandighetsklasse M40 har oppnådd en topp trykkfasthet på 76 MPa etter 28 døgn ved 35 °C, men ved å bare øke bestandighetsklassen til M45 får betongen en lavere trykkfasthets på 68 MPa for samme perioden og ved samme temperatur. Samme minkende trend fortsetter videre når bestandighetsklassen økes til M60 får betongen en trykkfasthet på 56 MPa etter 28 dager og for bestandighetsklasse M90 ligger trykkfastheten på 44 MPa etter 28 døgn. Lavere bestandighetsklasse har gitt lavere trykkfasthet ifølge både 1 døgns fasthetsutvikling og 28 døgns fasthetsutvikling, dermed kan det tolkes temperatur forskjell ved 1 og 28 dagers fasthetsutvikling følger samme minkende trend.

8.3.5 Lavkarbonbetong

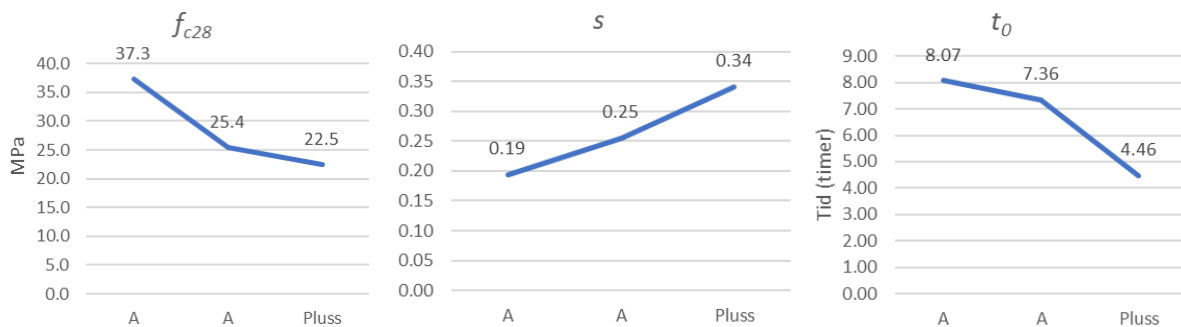
Lavkarbonbetonger med B30 M90 betongkvalitet



Figur 8.45: Trykkfasthetsresultater for lavkarbonklasse M90 serien ved ulike temperaturer og tider.

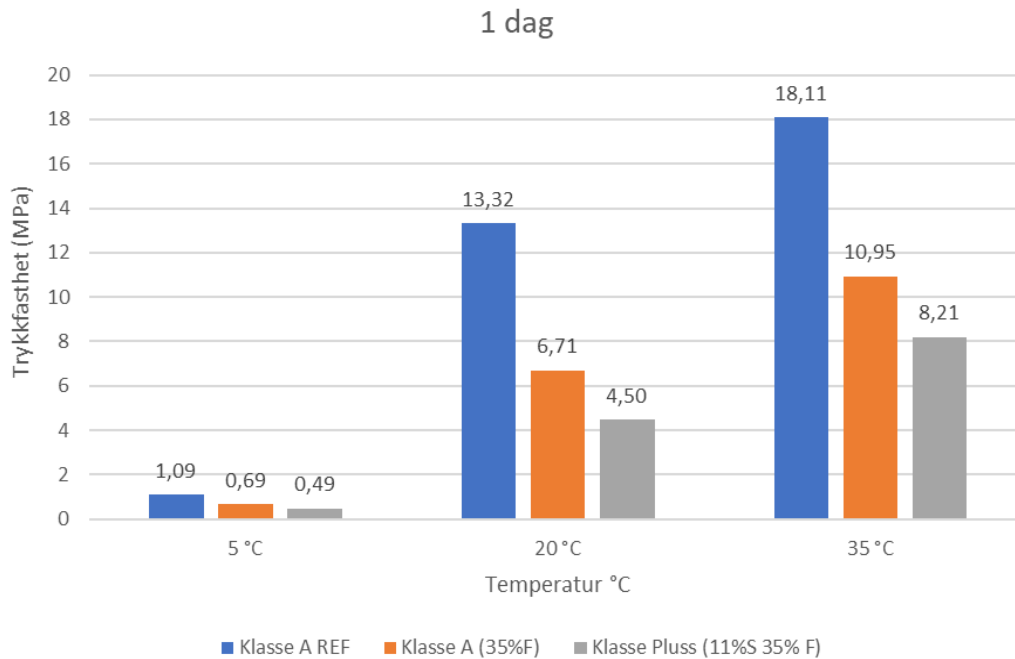
Figur 8.45 viser fasthetsutvikling for de betongblandningene med lavkarbonklassene A (REF), A (35% FA) og Pluss (35% FA 11% S). Alle tre betongblandningene tilhører i samme bestandighetsklasse, altså M90 i dette tilfellet. Lavkarbonklasse A (REF) ved 35 °C viser at betongen har hatt mest fasthetsutvikling sammenlignet med de andre betongene. En av de årsakene som har ført til at fasthetsutvikling for betonger med ekstra tilsatt flygeaske og silikastøv har fått lavere trykkfasthet er at silikastøv og flygeaske vil forskyve modenhetstiden lengre ut i herdeforløpet noe som igjen gir en lavere fasthetsutvikling ved starten av herding. Totalt sett vil fasthetsutvikling for betonger som inneholder økende flygeaske og silikastøv oppnå en høyere fasthetsutvikling enn betonger som har lavere innhold av disse pozzolaner.

Figur 8.46 viser trenden for parametrene f_{c28} , s og t_0 ved økende lavkarbonklasse. f_{c28} fra betong med lavkarbon A (REF) til lavkarbon Pluss har en minkende trend, mens resultatene for parameteren s viser en økende trend. Resultatene for t_0 har også en minkende trend når betongblandinger går fra lavkarbon A til lavkarbon Pluss. Tabell 7.41 viser resultatene i tabellform.

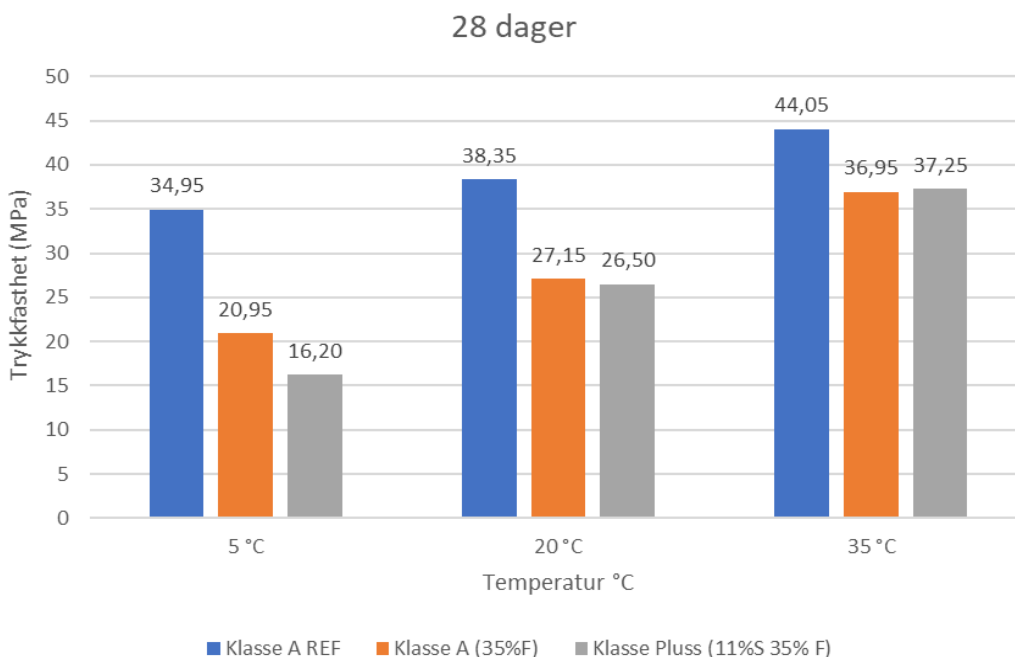


Figur 8.46: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametre for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasse.

Figur 8.47 viser hvordan trykkfastheten har endret seg over 1 døgn for betongblandingene med lavkarbonklasse A (REF), A og Pluss ved ulike temperaturer. Som det har blitt diskutert tidligere endring fra 5 °C til 20 °C har vært enormt sammenlignet med fastheten fra 20 °C til 35 °C. Ved å finne differansen for trykkfasthet mellom de ulike temperaturer, kan dette også argumenteres med tall. For eksempel trykkfastheten for betongblanding med klasse A (REF) ved 5 °C har oppnådd en trykkfasthet på 1 MPa, mens samme betongen ved 20 °C har oppnådd en trykkfasthet på 13 MPa, dette tilsvarer en økning på 210%. Fasthetsutvikling mellom 20 °C til 35 °C har fortsatt vært økende, hvor økning mellom disse temperaturene er på omtrent 5 MPa, noe som tilsvarer en økning på 36%.



Figur 8.47: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

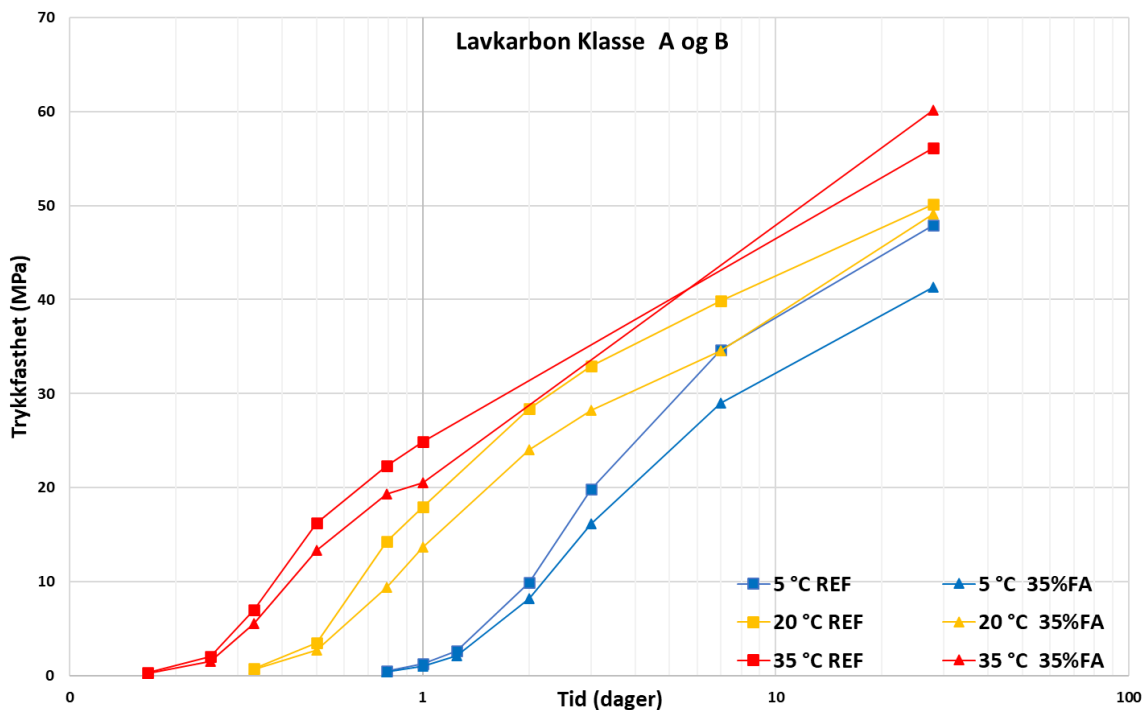


Figur 8.48: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

På grunn av store mengder pozzolaner som har blitt erstattet med sement i betongblandingen, vil betong-blandingene som inneholder høye silikastøv og flygeaske innhold ha en lavere fasthetsutvikling ved tidlig herdetforløp. Med tidlig herdetforløp menes her fram til 28 døgn, i noen tilfelle kalles denne alderen også for ung betong. I dette prosjektet sjekkes fasthetsutvikling fra 4 timer etter blanding har startet fram til 28 dager.

Figur 8.48 viser hvordan fasthetsutvikling for betonger med lavkarbonklassene A (REF), A og Pluss har utviklet seg ved 28 døgn fasthet for de ulike temperaturene. I denne figuren kan det ses at endringen for betongblandingene som har høyere innhold av silikastøv og flygeaske har vært høyere sammenlignet med fasthetsutvikling etter et døgn. Samtidig kan det tolkes at fasthetsutvikling for REF betong har vært økende, men stigning er mindre enn ved et døgn fasthet. I tillegg kan det tolkes at ved 35 °C betongblandingene som har store mengder silikastøv og flygeaske innhold har fått omtrent like fasthetsutvikling sammenlignet med 5 °C, hvor store mengder silikastøv og flygeaske har fått lavere fasthetsutvikling enn de andre betongblandingene som har enten ingen eller lavere silikastøv og flygeaske. For å kunne bevise at økende innhold av silikastøv og flygeaske fører til en økende fasthetsutvikling burde en sjekke fasthetsutvikling ved senere modenhetstid enn 28 dager.

Lavkarbonbetonger med B30 M60 betongkvalitet

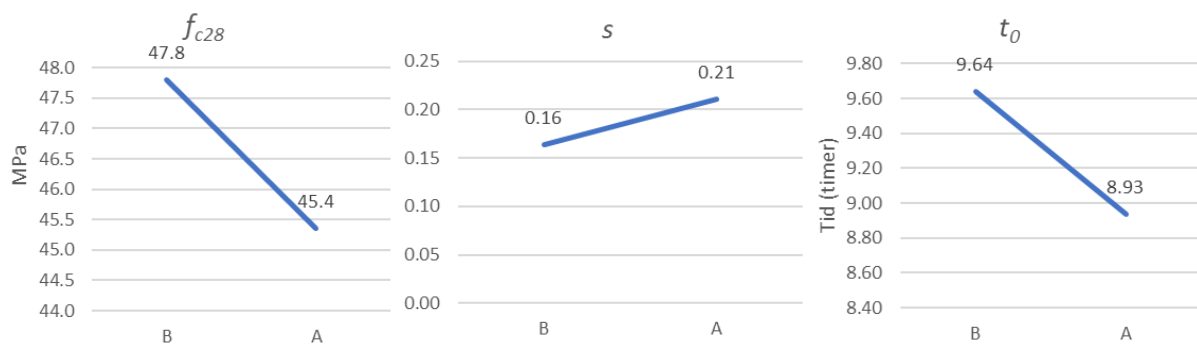


Figur 8.49: Trykkfasthetsresultater for lavkarbonklasse M60 serien ved ulike temperaturer og tider.

Figur 8.49 illustrerer fasthetsutviklingen for betongblandingene med lavkarbonklasse A og B ved ulike temperaturer i løpet av 28 dager. Betongblandingen med betegnelsen "REF" i grafen refererer til en betongblanding med lavkarbonklasse B, mens betongblandingen med 35% flygeaske (FA) blir klassifisert som lavkarbonklasse A. Grafene i figur 8.49 viser at REF betongen oppnår høyere fasthet ved 5 °C og 20 °C sammenlignet med 35 °C. Tidligere i teoridelen om flygeaske og resultatene fra flygeaskeserien ble det forklart at flygeaske forskyver modenhetstiden til betongen. Med andre ord oppnår betongen ikke sin høyeste fasthetsutvikling etter 28 dager. For å bevise at økt innhold av

flygeaske fører til høyere trykkfasthet, kan man undersøke senere modenhetstid, for eksempel trykkfasthet etter 56 eller 91 dager.

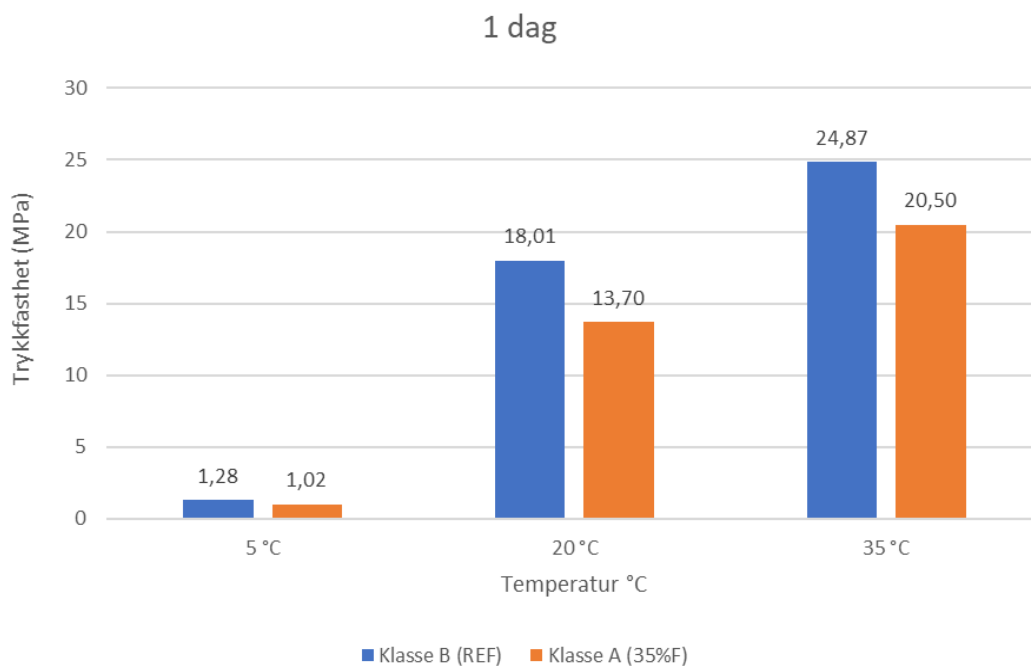
Figur 50 viser hvordan parametere f_{c28} , s og t_0 har endret seg for lavkarbonklassene B og A. Når betongen går fra lavkarbon B til lavkarbon A vil f_{c28} verdiene ha en minkende trend sammenlignet med parameteren s som har en økende trend. Trenden for t_0 verdien er også minkende når betongblanding går fra lavkarbon B til lavkarbon A. Tabell 7.39 viser resultatene i tabellform.



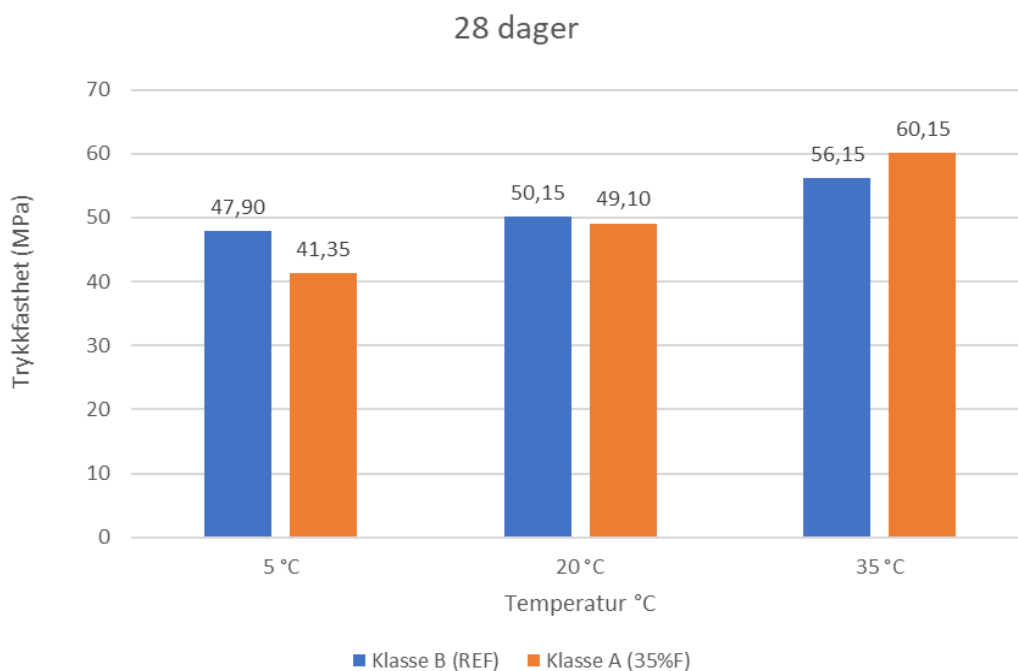
Figur 8.50: Figur 8.: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Figur 8.51 viser fasthetsutvikling for betongblandingene med lavkarbonklassene A og B ved ulike temperaturer etter ett døgn fasthetsutvikling. Resultatene indikerer at betongene med lavkarbonklasse B og A ved 5 °C oppnår ikke en trykkfasthet på mer enn 1 MPa ved 1 døgns fasthet, mens fasthetsutvikling ved 20 °C har oppnådd en trykkfasthet på omtrent 19 MPa for lavkarbonklasse B og 14 MPa for lavkarbonklasse A. Dette representerer en forskjell på omtrent 17 MPa for lavkarbonklasse B og 13 MPa for lavkarbonklasse A, som betyr en økning på 400% for lavkarbonklasse B og 370% for lavkarbonklasse B ved å øke temperaturen fra 5 °C til 20 °C. Forskjellen mellom 20 °C og 35 °C ligger på 7 MPa for begge lavkarbonklassene, noe som tilsvarer en økning på 38% for lavkarbonklasse B og 50% for lavkarbonklasse A. Disse funnene indikerer at betongblandingen er svært temperaturfølsom, spesielt ved lave temperaturer som 5 °C sammenlignet med 20 °C og 35 °C.

Figur 8.52 viser hvordan fasthetsutvikling for betongblandinger med lavkarbonklasse har endret seg over 28 døgn ved de ulike temperaturene. Ut ifra figuren kan det tolkes at økende flygeaskeinnhold har ført til økende fasthetsutvikling. Fasthetsutvikling ved 5 °C viser at betongblanding med lavkarbonklasse B har oppnådd høyere fasthetsutvikling enn betong med lavkarbon A. Dette kan være fordi at flygeaskeinnholdet i betongen har ikke oppnådd sin styrke enda på grunn av flygeaske er veldig følsomme ved lave temperaturer og utviklingen blir langsommere og betongens fasthetsutvikling forskyves lengre ut i herdeforløpet. Dette kan bekreftes ved å sjekke fasthetsutvikling for blanding ved 20 °C hvor begge reseptene har oppnådd omtrent samme fasthetsutvikling ved 28 døgn. Ved 35 °C viser figuren at betongen med lavkarbonklasse A har oppnådd enda høyere trykkfasthet enn betong med lavkarbonklasse B. Ved høyere temperaturer betongens modenhet oppnås raskere og tidligere, derfor kan effekten av flygeaske blir synligere ved 35 °C.

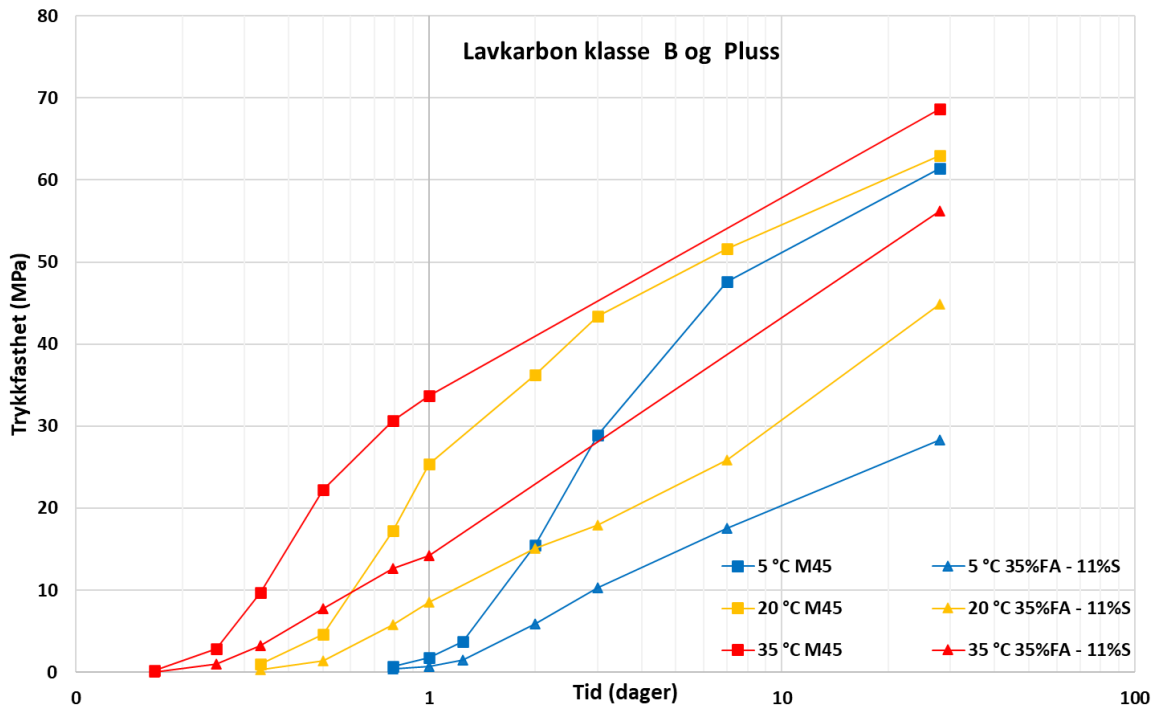


Figur 8.51: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.



Figur 8.52: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.

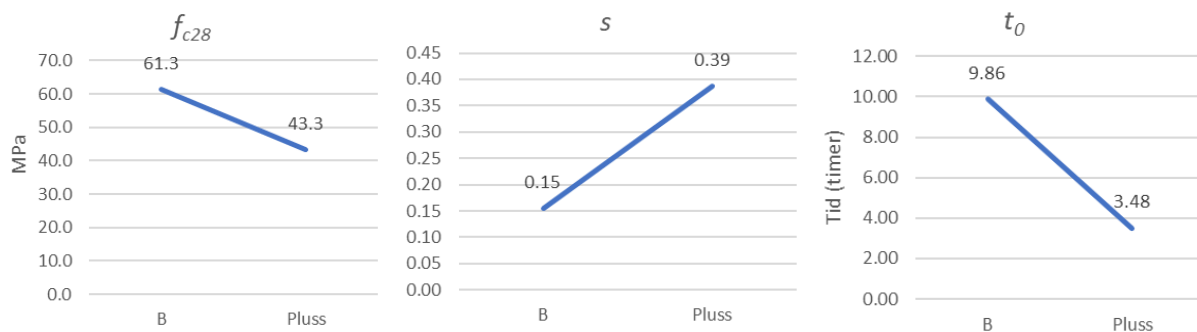
Lavkarbonbetonger med B35 M45 betongkvalitet



Figur 8.53: Trykkfasthetsresultater for lavkarbonklasse M45 serien ved ulike temperaturer og tider.

Figur 8.53 viser hvordan fasthetsutvikling for betongblandingene med lavkarbonklasse B og Pluss har endret seg i løpet av de første 28 dagene ved tre ulike temperaturer altså 5 °C, 20 °C og 35 °C. De grafene med firkant mønsteret indikere trykkfasthetsresultatene for betongblanding med ingen ekstra tilsatt flygeaske og silikastøv, mens grafene som har trekant mønsteret har en ekstra tilsatt mengde av silikastøv (11% S) og flygeaske (35% FA). Fasthetsutvikling for betongblanding som ikke har ekstra tilsatt pozzolaner viser en raskere og høyere fasthetsutvikling fram til 28 dager. Motsatt har utviklingen for betongblanding som har ekstra tilsatt flygeaske og silikastøv en tregere og langsommere fasthetsutvikling. I tillegg betongblanding som har ekstra tilsatt pozzolaner burde hatt en høyere fasthetsutvikling, men grafen viser at ved 28 dager betongen oppnår kun 30 MPa ved 5 °C og omtrent 45 MPa ved 20 °C og 55 MPa ved 35 °C.

Figur 8.54 viser hvordan parametere f_{c28} , s og t_0 har endret seg når betongen går fra lavkarbon B til lavkarbon Pluss. Figuren viser en minkende trend for f_{c28} , økende trend for s , minkende trend for t_0 . Tabell 7.37 viser resultatene i tabellform.

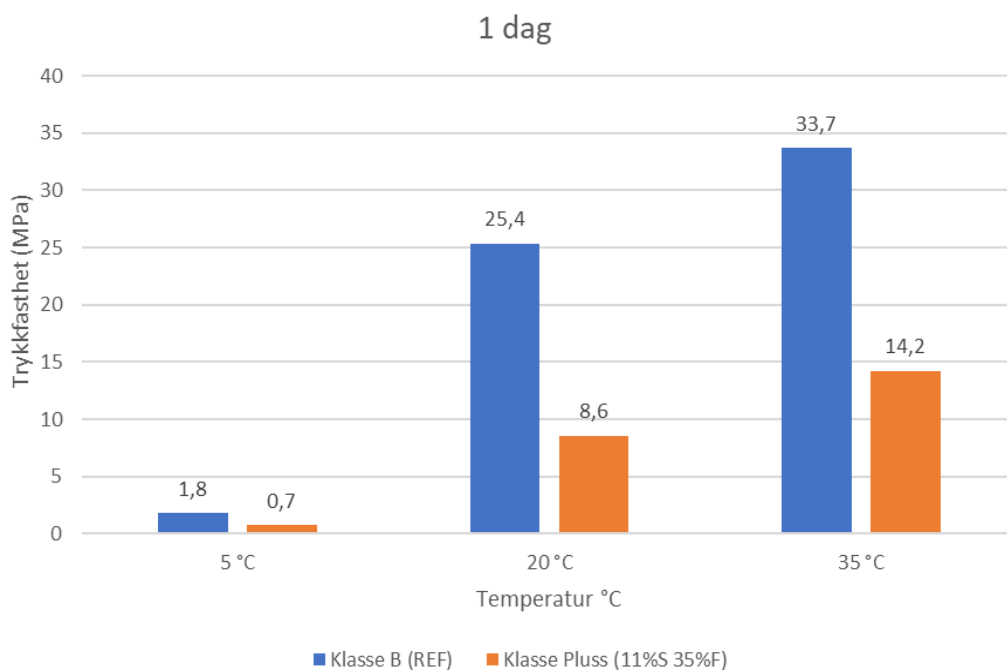


Figur 8.54: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasse.

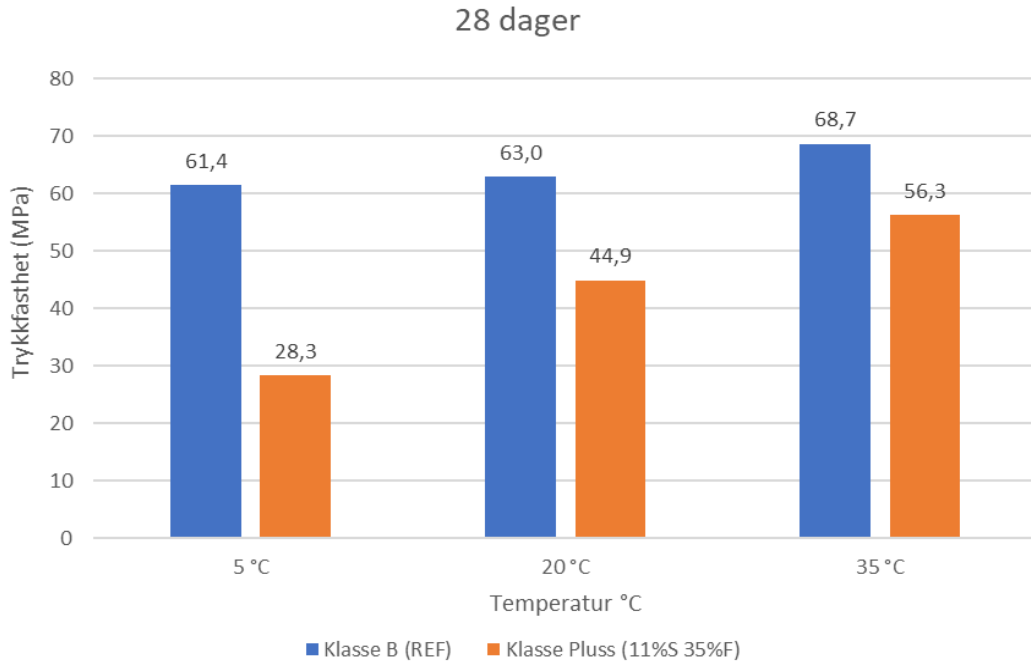
Figur 8.55 viser hvordan betongene har utviklet seg ved de ulike temperaturene etter ett døgn. Figuren for lavkarbonklasse B altså REF betong har hatt en raskere utviklingen fra 5 °C til 20 °C sammenlignet det fra 20 °C til 35 °C. Forskjellen mellom 5 °C tykkfasthet og 20 °C er på 23 MPa noe som tilsvarer 410% økning ved å bare øke 15 °C. Forskjellen mellom 20 °C til 35 °C er også 15 °C, men trykkfasthetsforskjellen er på 13 MPa noe som tilsvarer 33% økning ved et døgn fasthet.

For betongblanding med lavkarbonklasse Pluss er det litt annerledes. På grunn av store mengder av tilsatt flygeaske og silikastøv, har utviklingen ved et døgn har vært litt lavere. Forskjellen mellom 5 °C og 20 °C er 8 MPa, noe som tilsvarer 230% økning. For 20 °C og 35 °C er det omtrent 6 MPa, noe som tilsvarer en 65% økning. Selv om fasthetsutvikling for lavkarbonklasse Pluss er betydelig lavere enn lavkarbonklasse B, er fortsatt utviklingsgraden ved 35 °C omtrent like for begge lavkarbonklassene. Ved 5 °C er utviklingsgraden betydelig lavere for klasse Pluss enn klasse B.

Figur 8.56 viser resultater for trykkfasthet for de to betongblandingene med lavkarbonklasse etter 28 døgn ved ulike temperaturer. Fasthetsutvikling for betongblanding som har mer innhold av silikastøv og flygeaske, oppnår høyere trykkfasthet enn betonger som lavere innhold av disse pozzolaner. Dette gjelder når det sjekkes betongens fasthetsutvikling for hele herdeforløpet, men fram til 28 dager er det omvendt og det er på grunn av betongen har en tregere og langsommere fasthetsutvikling, dermed trenger lengre tid for å oppnå sin styrke. Figuren illustrer at ved økende temperatur vil også trykkfastheten økes for betongblanding med lavkarbonklasse Pluss som har ekstra tilsatt flygeaske og silikastøv. Endringene er større sammenlignet med betongblanding med lavkarbonklasse B som har ingen ekstra tilsatt pozzolaner. Dette fremviser at for betongblanding som ikke har ekstra tilsatt pozzolaner fasthetsutvikling har oppnådd sin styrke, men for betongblanding med ekstra tilsatt pozzolaner er det fortsatt utvikling.



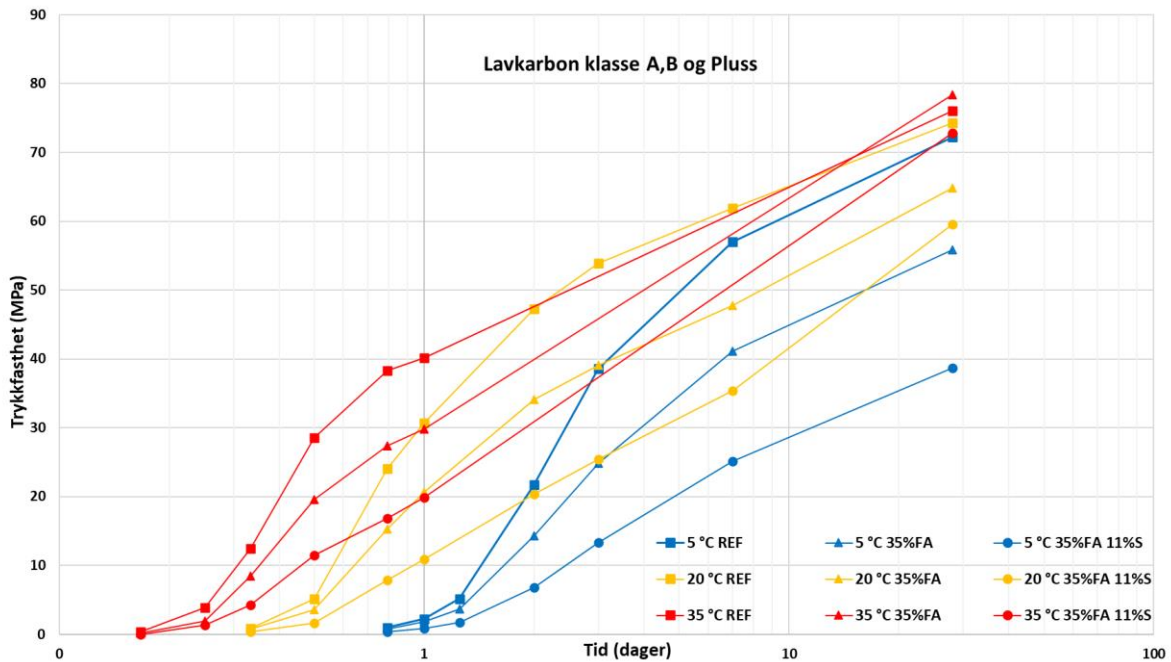
Figur 8.55: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.



Figur 8.56: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Lavkarbonbetong med B45 M40 betongkvalitet

Figur 8.57 viser fasthetsutvikling for betongblandinger med lavkarbonklassene A (REF), klasse B (35% FA) og klasse Pluss (35% FA 11% S). Grafene for hver betongblanding har fått sine mønsteret for å kunne skille seg i figuren, for eksempel firkant mønster er for REF betonger altså lavkarbonklasse A. i tillegg de ulike fargene for grafene indikere temperaturen for vannbadet. Blå grafene illustrere 5 °C, gull farge for 20 °C og rød for 35 °C vannbadet.

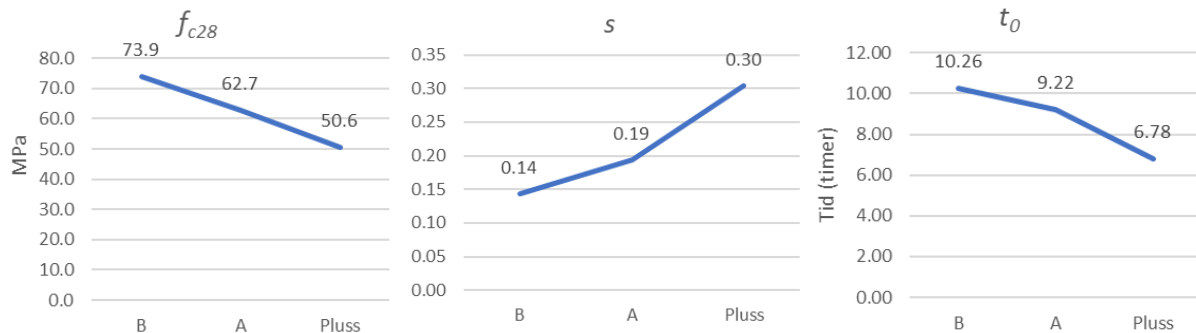


Figur 8.57: Trykkfasthetsresultater for lavkarbonklasse M40 serien ved ulike temperaturer og tider.

Fasthetsutvikling for betonger med uten tilsatt flygeaske og silikastøv oppnår høyere trykkfasthet både ved 1 dags fasthet og 28 døgns fasthet. Tregere og langsommere reaksjon fra pozzolaner fører til at

betongen oppnår en lavere trykkfasthet ved tidlig herdeforløpet. Derfor betongblandinger som inneholder høyere dosering av silikastøv og flygeaske vil oppnå en lavere fasthetsutvikling ved tidlig herdeforløpet enn betongblanding som ikke har ekstra tilsatt pozzolaner.

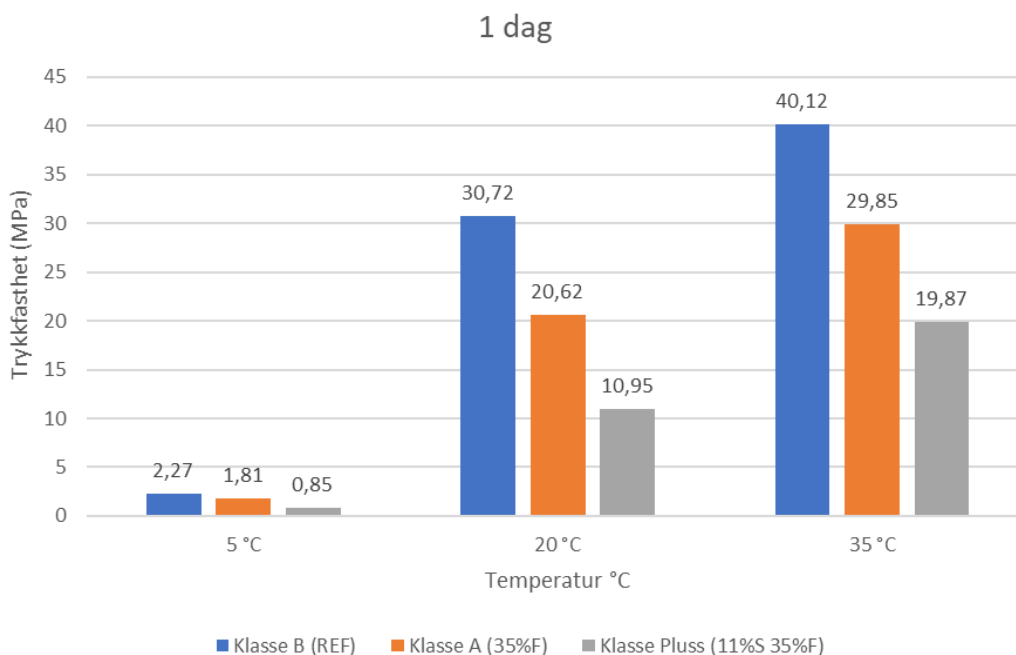
Figur 8.58 viser hvordan parameterne f_{c28} , s og t_0 har endret seg for de ulike betongblandingene med lavkarbonklasse B, A og Pluss. Tabellen viser når betongen med lavkarbon B går til A og Pluss vil f_{c28} minkes, men parameteren s økes. I tillegg t_0 verdiene også minkes når lavkarbon går fra B til A og videre til Pluss. Tabell 7.35 viser resultatene i tabellform.



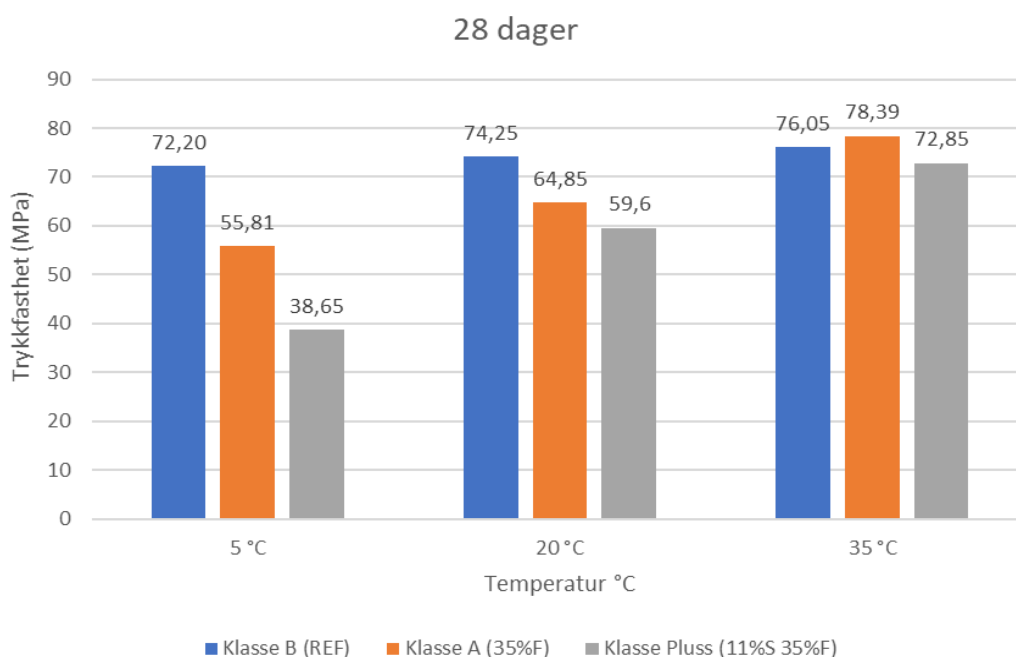
Figur 8.58: Grafisk fremstilling av fasthetsfunksjon parametere for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Figur 8.59 viser hvordan trykkfasthetsutvikling har endret seg over 1 døgn ved de ulike temperatuene. Det er tydelig at endringene fra 5 °C til 20 °C har vært enormt sammenlignet med forskjellen mellom 20 °C til 35 °C. Betongblanding med lavkarbonklasse ved 5 °C har oppnådd en trykkfasthet på 2,3 MPa, mens ved å øke temperaturen til 20 °C vil trykkfastheten økes til 30,7 MPa, noe som er omtrent 29 MPa. Dette tilsvarer en økning på 350% ved å bare øke temperaturen fra 5 °C til 20 °C. Trykkfasthet forskjellen mellom 20 °C og 35 °C er på omtrent 10 MPa noe som tilsvarer 30% økning ved å øke temperaturen med ytterligere 15 °C. Med andre ord kan det sies at fasthetsutvikling ved lavere temperatur er veldig følsomme og betongen får ikke nok reaksjon og energi til å kunne starte herdingen og dermed får lavere fasthetsutvikling. I tillegg viser figur 8.59 at betonger med økende innhold av flygeaske og silikastøv har ført til en lavere fasthetsutvikling ved 1 døgns fasthet. En av de årsakene som har ført til at betongene som inneholder høyere innhold av pozzolaner har oppnådd lavere fasthetsutvikling er at betongens modenhetstid oppnås ved et senere tidspunkt enn betonger som har enten ingen eller lavere pozzolaner.

Figur 8.60 viser fasthetsutvikling for betongblandinger med lavkarbonklasse ved 28 dager fasthet ved ulike temperaturer. Figuren viser ved 5 °C trykkfastheten med økende pozzolaner har ført til en lavere fasthetsutvikling. Ved 20 °C fasthetsutvikling har også en minkende trend med økende innhold av pozzolaner, men forskjellen med 5 °C er at differansen har blitt mindre ved 20 °C. For eksempel ved 5 °C lavkarbonklasse B betongen har oppnådd en trykkfasthet på 72 MPa, mens lavkarbonklasse A oppnådd en fasthet på 56 MPa og lavkarbonklasse Pluss oppnådd en trykkfasthet på 38 MPa.



Figur 8.59: 1-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.



Figur 8.60: 28-døgns trykkfasthet resultater ved 5 °C, 20 °C og 35 °C for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Det er ganske stor forskjell mellom de ulike lavkarbonklassene B, A og Pluss. Ved 20 °C oppnådde betongen en trykkfasthet på 74 MPa for lavkarbon B, for lavkarbon A 64 MPa og for klasse Pluss 60 MPa. Betongblandingene som inneholder ekstra tilsatt flygeaske og silikastøv har hatt større utvikling ved 20 °C derfor har de oppnådd høyere fasthetsutvikling ved 20 °C enn 5 °C. Fasthetsutvikling ved 35 °C viser en annen trend, ettersom høye temperaturer fører til at modenhet oppstår tidligere i herdeforløpet, sammenlignet med lavere temperaturer. Trykkfastheten for betongblanding med lavkarbonklasse B er på 76 MPa, mens for lavkarbon A som inneholder en flygeaske på 35% oppnådde 78 MPa og klasse Pluss som har ekstra tilsatt av både silikastøv og flygeaske har oppnådd en trykkfasthet på 73 MPa. Dette fremviser at økende innhold av pozzolaner som flygeaske og silikastøv

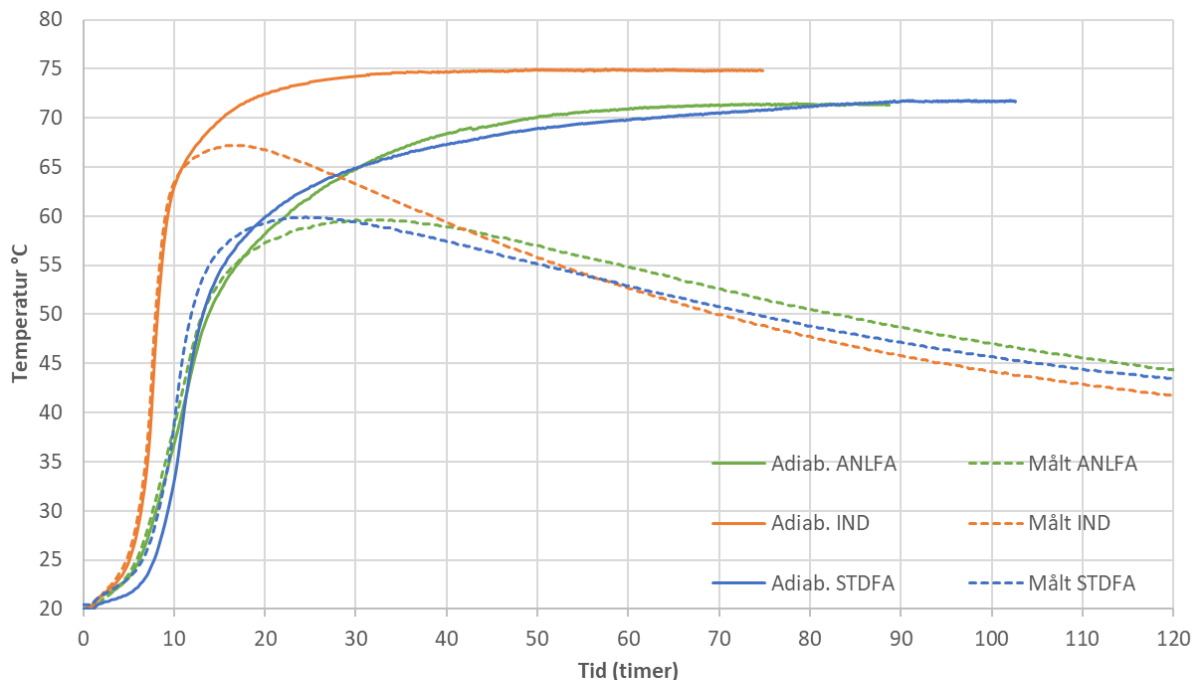
vil fører til en høyere fasthetsutvikling enn betongblandinger som har enten ingen eller lavere pozzolaner.

8.4 Varmeutvikling

I dette kapittelet diskuteres resultatene fra 15L herdekasseforsøkene og kubikk kasse forsøkene.

8.4.1 Sementtype

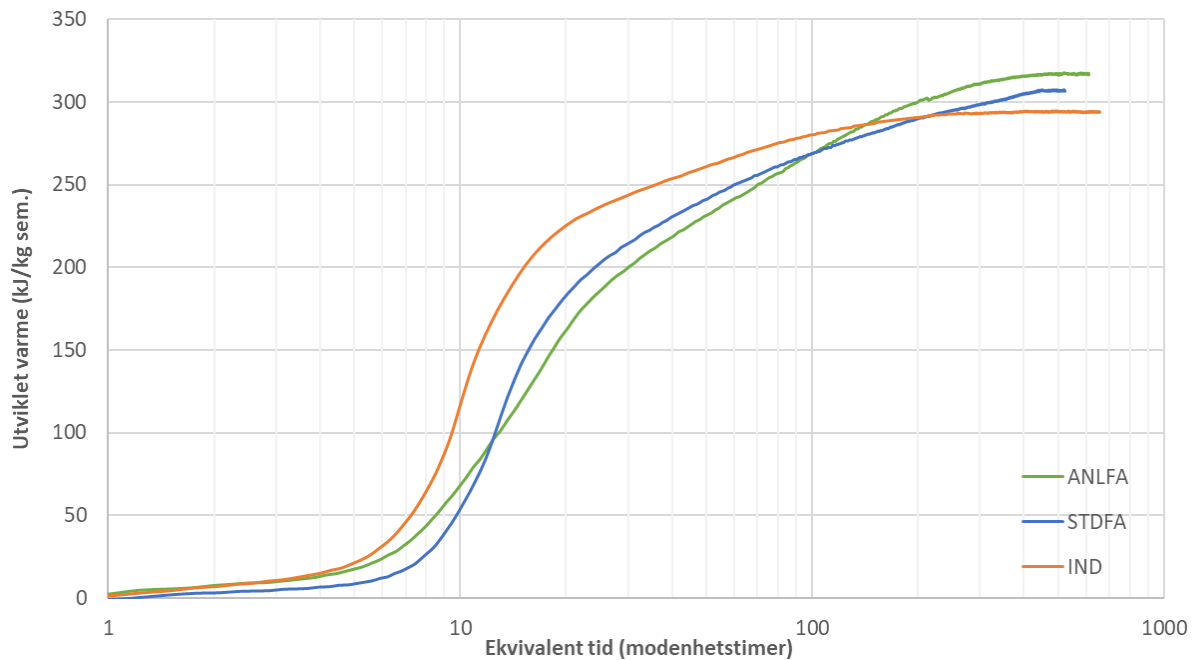
Figur 8.61 viser adiabatisk og målt temperaturutvikling av B45 M40 betonger med sementtypene STD FA, ANL FA og IND. Fra grafen kan man se at det er en klar temperaturforskjell mellom IND-betongen og STD FA- og ANL FA-betong. Temperaturforskjellen er mindre mellom de to sist nevnte betongene, hvor ANL FA-betongen oppnår omtrent samme temperatur som STD FA-betongen etter omtrent 80 timer. Fra tabell 7.43 kan man se at STD FA og ANL FA har oppnådd omtrent samme adiabatisk temperatur, hvor STD FA har kun 0,4% høyere adiabatisk temperatur relativ til ANL FA. IND-betongen oppnår 5% høyere adiabatisk temperatur relativ til ANL FA.



Figur 8.61: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av betonger med ulike sementtyper.

Figur 8.62 viser varmeutviklingen til de samme betongene nevnt i avsnittet over, gitt i ekvivalent tid (modenhetstimer). En tabellert verdi av varmeutviklingen er gitt i tabell 7.45. Her er det en klar forskjell mellom de tre betongene fram til 70 modenhetstimer, hvor IND-betongen har høyest varmeutvikling, etterfulgt av STD FA-betong og ANL FA-betong. Dette stemmer godt overens med teorien om at finmalt sement gir høyere hydrasjonsgrad og omvendt. De tre sementtypene benyttet i dette prosjektet har en finhetsgrad på 575 m²/kg, 452 m²/kg og 398 m²/kg for henholdsvis IND-, STD FA- og ANL FA-sement, se vedlegg 12.7 for analyserapport av sementtypene. Etter omtrent 100 modenhetstimer kan man se at trenden endrer seg, hvor grafen til IND-betongen flater seg gradvis ut og utvikler mindre varme. Motsatt ser man at ANL FA-betongen fortsetter sin varmeutvikling og havner over både STD FA- og IND-betongen. Utviklet varme ved 300 modenhetstimer for de tre betongtypene er vist i tabell 7.43. Tabell 7.44 viser den gjennomsnittlige varmeproduksjonen (grafens stigningstall) for hver betongtype over et gitt modenhetsintervall mellom 150 og 400 modenhetstimer. Fra tabellen ser man at allerede

etter 150 modenhetstimer har ANL FA-betongen større varmeproduksjon enn STD FA- og IND-betongen.

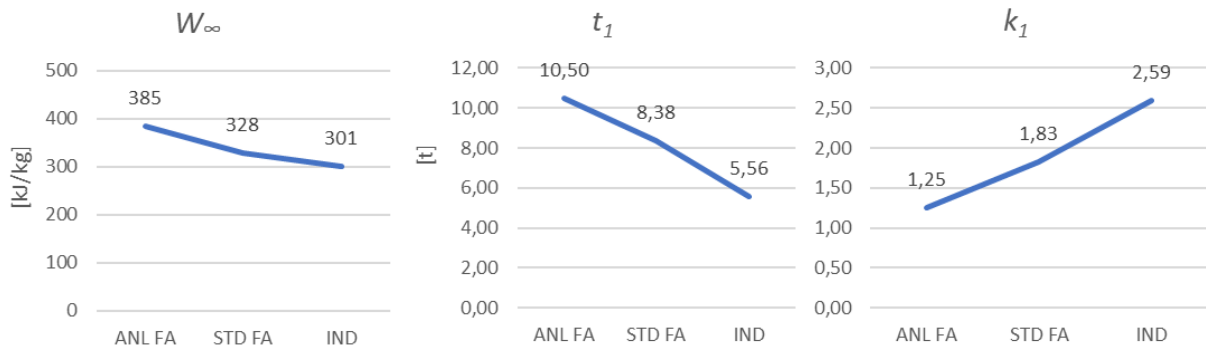


Figur 8.62: Varmeutvikling av betonger med ulike sementtyper.

Det kan være flere grunner til endringen i trenden på varmeutvikling i figur 8.62. ANL FA-sement benyttet i dette prosjektet, har et flygeaskeinnhold på 12,4%, som er 2,5% mindre enn antatt flygeaskeinnhold på 15%, Se vedlegg 12.7 for analyserapport. Dette kan ha ført til litt mer varmeutvikling i ANL FA-betongen enn forventet. Samtidig har STD FA-sementen benyttet i dette prosjektet et flygeaskeinnhold på 17,2%, som er litt mindre enn antatt verdi på 18%, og kalksteinsfillerinnhold på 6%, som er 2% mer enn det som har blitt produsert tidligere, se vedlegg 12.7 for produktdatablad. Dette kan ha ført til at STD FA-betongen har fått litt mindre varmeutvikling og temperaturutvikling enn det som er målt tidligere. Den trege utviklingen av STD FA-betongen i forhold til ANL FA-betongen fram til omtrent 10 modenhetstimer, kan også begrunnes med betongenes forskjellige flygeaskeinnhold.

Tabell 7.46 viser betongtypenes avbindingstid regnet både med 12 kJ- og 2 °C-metoden. Sistnevnte metode, som er en tilnærmet metode benyttet på byggeplasser, ser ut til å samsvare godt med 12 kJ-metoden. Begge metodene viser at IND-betongen avbinder etter 5,4 timer, ANL FA etter 6,4 timer og STD FA etter 7 timer. Både tallene og rekkefølgen på dem var forventet, med tanke på betongenes ulike reaktivitet.

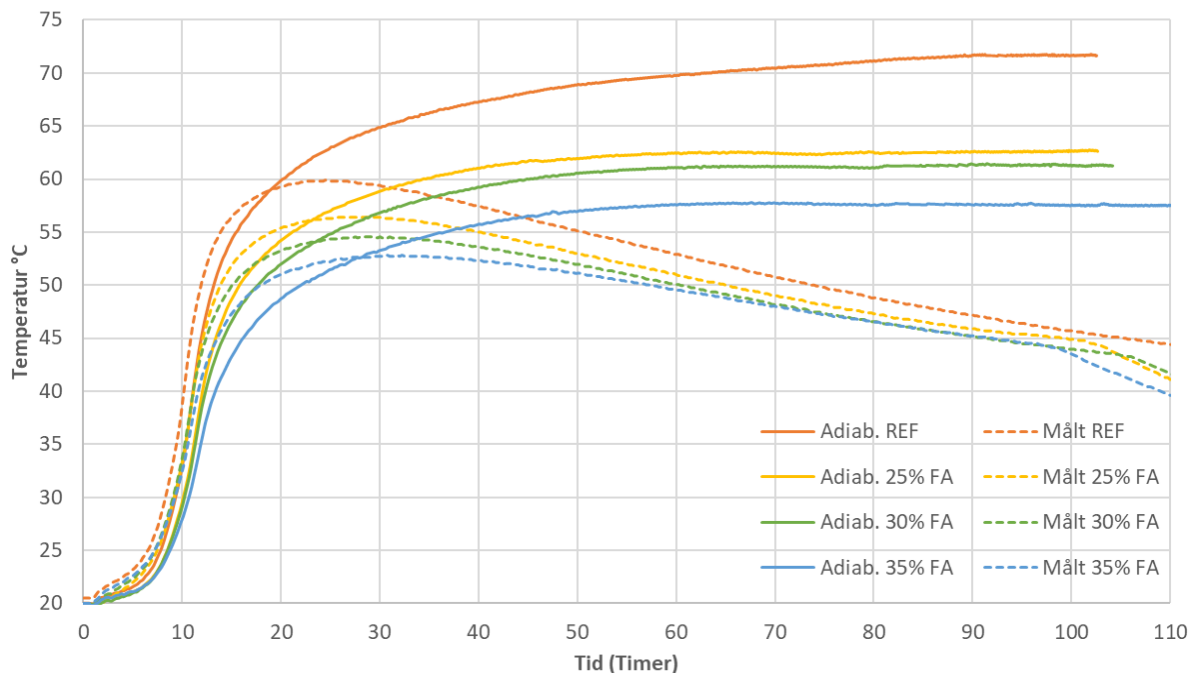
Figur 8.63 viser utviklingen av betongenes varmefunksjonsparametere W_{∞} , t_1 og k_1 som funksjon av sementtyper. Her ser man at W_{∞} viser en minkende trend fra ANL FA til STD FA og dermed IND. Det samme gjelder også t_1 , mens k_1 viser en økende trend. Tabell 7.42 viser varmefunksjonsparametere i tabellform.



Figur 8.63: Figur 8.: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for betonger med ulike sementtyper.

8.4.2 Flygeaske

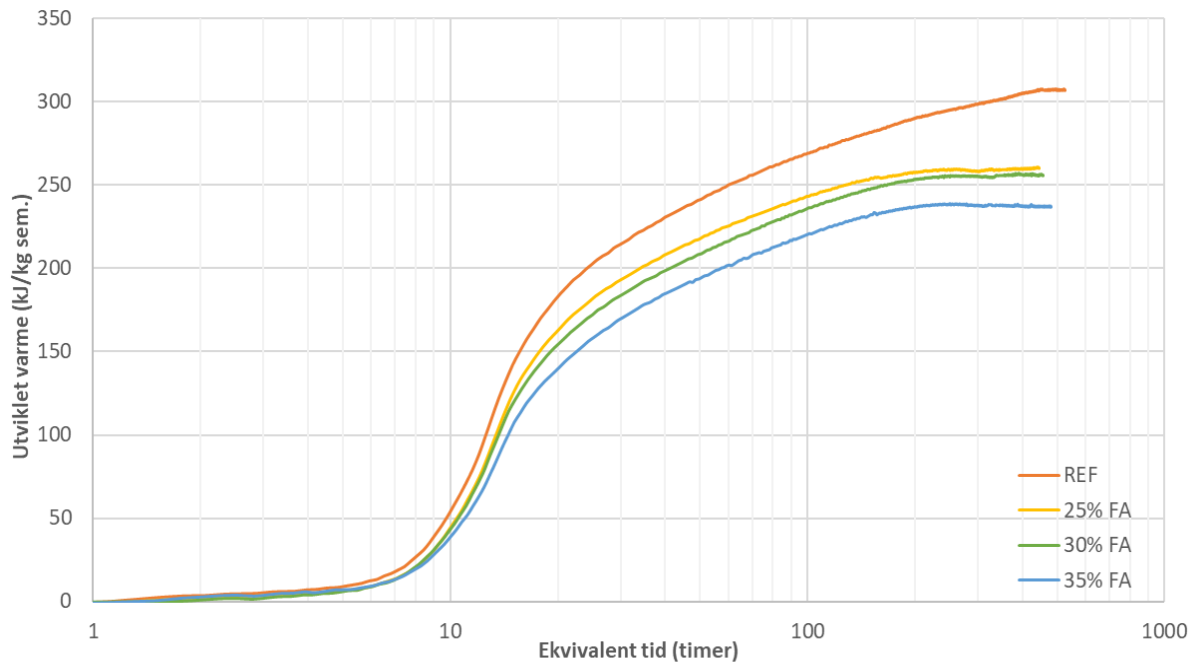
Figur 8.64 viser adiabatisk og målt temperaturutvikling av betonger med økende flygeaskeinnhold. Fra figuren ser man at økende mengde flygeaske gir redusert temperaturøkning. Ved tilsetning av 7% flygeaske (resept nr. 10 med totalt 25%FA) reduseres den adiabatiske temperaturutviklingen med 13%. Videre vil 30% og 35% flygeaskeinnhold redusere den adiabatiske temperaturøkningen med henholdsvis 14% og 19%, se tabell 7.48. Det viser seg at en økning av flygeaskeinnhold fra 25% til 30% påvirker temperaturutviklingen i mindre grad, enn en økning fra 30% til 35% flygeaskeinnhold.



Figur 8.64: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av betonger med økende flygeaske.

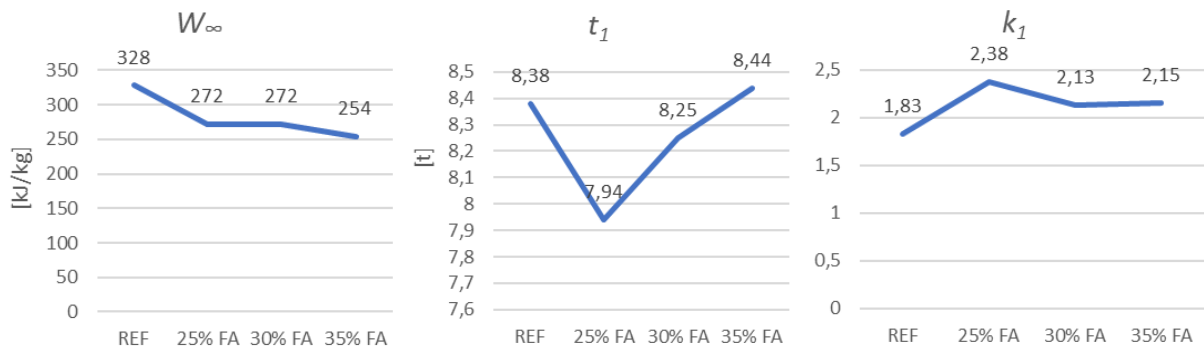
Figur 8.65 viser varmeutviklingen til de samme betongene, gitt i ekvivalent tid. En tabellert verdi av varmeutviklingen er gitt i tabell 7.50. Her ser man at varmeutviklingen følger samme trend som betongens temperaturutvikling. Tabell 7.48 viser at 25%, 30% og 35% flygeaskeinnhold reduserer den isoterme varmeutviklingen ved 300 modenhetstimer med henholdsvis 13%, 14% og 20% relativ til referanse betongen. Tabell 7.49 viser den gjennomsnittlige varmeproduksjonen (dQ/dm) for hver betongtype over et gitt modenhetsintervall mellom 150 og 400 modenhetstimer. Disse verdiene kan benyttes som en pekepinn på forventet varmeproduksjon i et gitt mondenhetsintervall for betonger med økende flygeaskeinnhold.

Ved å benytte mellom 25% til 35% flygeaske i betongen kan man forvente en avbindingstid på rundt 8 timer, se tabell 7.51. Tabellen viser at 12 kJ- og 2 °C-metoden gir ganske lik avbindingstid, noe som ser lovende ut for 2 °C-metoden, med tanke på unøyaktigheten knyttet til denne metoden.



Figur 8.65: Varmeutvikling av betonger med økende flygeaske.

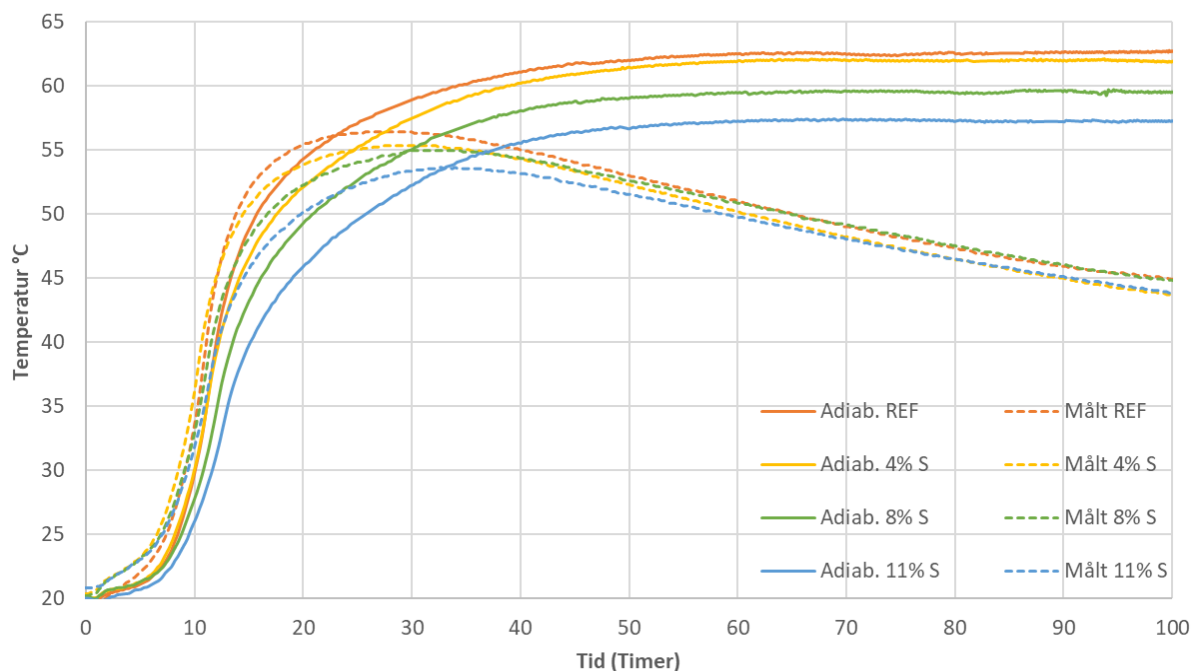
Figur 8.66 viser utviklingen av betongenes varmfunksjonsparametere W_∞ , t_1 og k_1 som funksjon av økende flygeaskeinnhold. Her ser man at W_∞ viser en minkende trend ved økende flygeaskeinnhold. t_1 har ikke en klar trend. k_1 ser ut til å ha en stigende trend ved økende flygeaskeinnhold. Tabell 7.47 viser varmfunksjonsparametere i tabellform.



Figur 8.66: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for betonger med økende flygeaskeinnhold.

8.4.3 Silikastøv

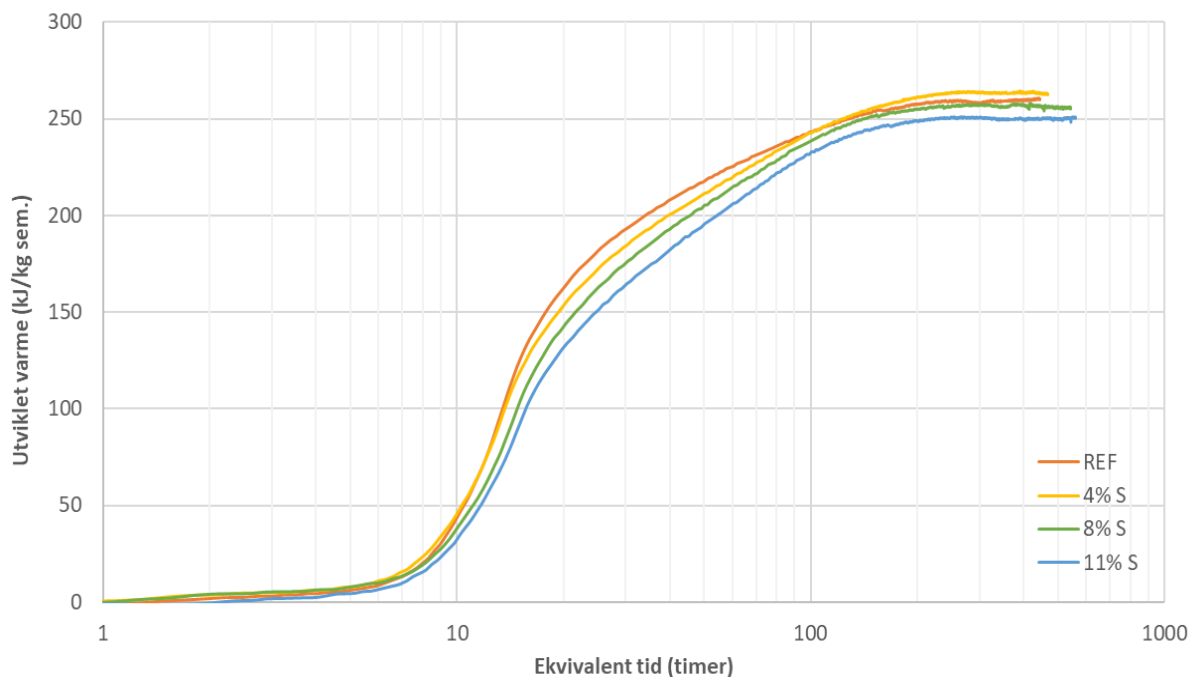
Figur 8.67 viser adiabatisk og målt temperaturutvikling av betonger med økende silikastøvinnhold. Her ser man at ved tilsetning av silikastøv i betong, reduseres temperaturøkningen, samtidig som utviklingen «forsinkes». Ved tilsetning av 4% silikastøv ser man en reduksjon på oppnådd adiabatisk temperatur på kun 1% relativ til referanse betongen, mens 8% og 11% silikastøvinnhold fører til en reduksjon på henholdsvis 5% og 9%, se tabell 7.53.



Figur 8.67: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av betonger med økende silikastøvinnhold.

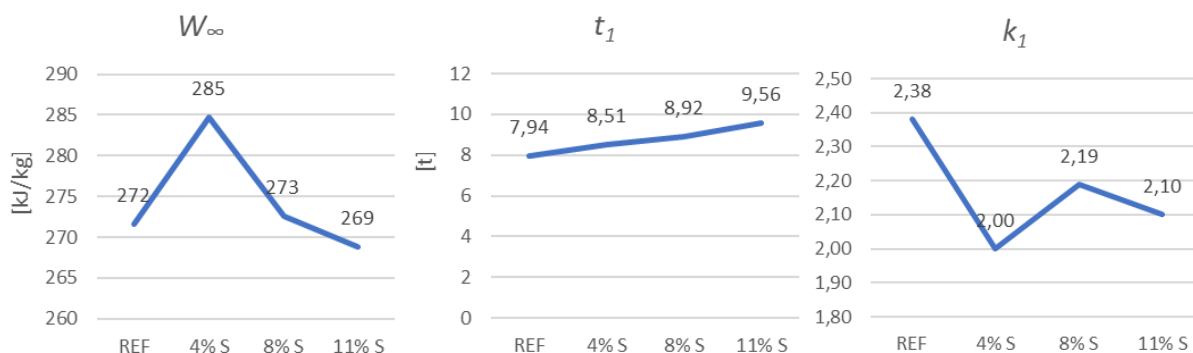
Figur 8.68 viser varmeutviklingen til de samme betongene nevnt over, gitt i ekvivalent tid. En tabellert verdi av varmeutviklingen er gitt i tabell 7.55. Her viser det seg at økende mengde silikastøv vil redusere betongens varmeutvikling, mens etter endt hydratasjon vil det ikke være merkbare forskjeller mellom disse betongene. Tabell 7.53 viser at ved 300 modenhetstimer, vil 4% silikastøvinnhold føre til en økning av den isoterme varmeutvikling på 2% relativ til referanse betongen. Motsatt vil 8% og 11% silikastøvinnhold redusere den isoterme varmeutviklingen ved 300 modenhetstimer med henholdsvis 1% og 3%. Det er viktig å nevne at disse betongene har en flygeaskeinnhold på 25%, noe som kan være med og bidra til trenden vi ser i figur 8.67 og 8.68. Betongenes gjennomsnittlige varmeproduksjon i et gitt modenhetsintervall vises i tabell 7.54. Tabellen mangler noen verdier i noen intervaller, og grunnen til det er at disse intervallene ga et større varmetapstall enn det som er oppnådd ved maks modenhet. Dette kan skyldes ujevnheter i grafens utvikling i disse intervallene.

Avbindingstiden ved økende mengde silikastøv ser ut til å holde seg rundt 7,5-8,0 timer, bortsett fra 4% silikastøvinnhold som gir en avbindingstid på 7,2 timer. 2 °C-metoden ser ut til å gi samme resultat som 12 kJ-metoden, se tabell 7.56.



Figur 8.68: Varmeutvikling av betonger med økende silikastøvinnhold.

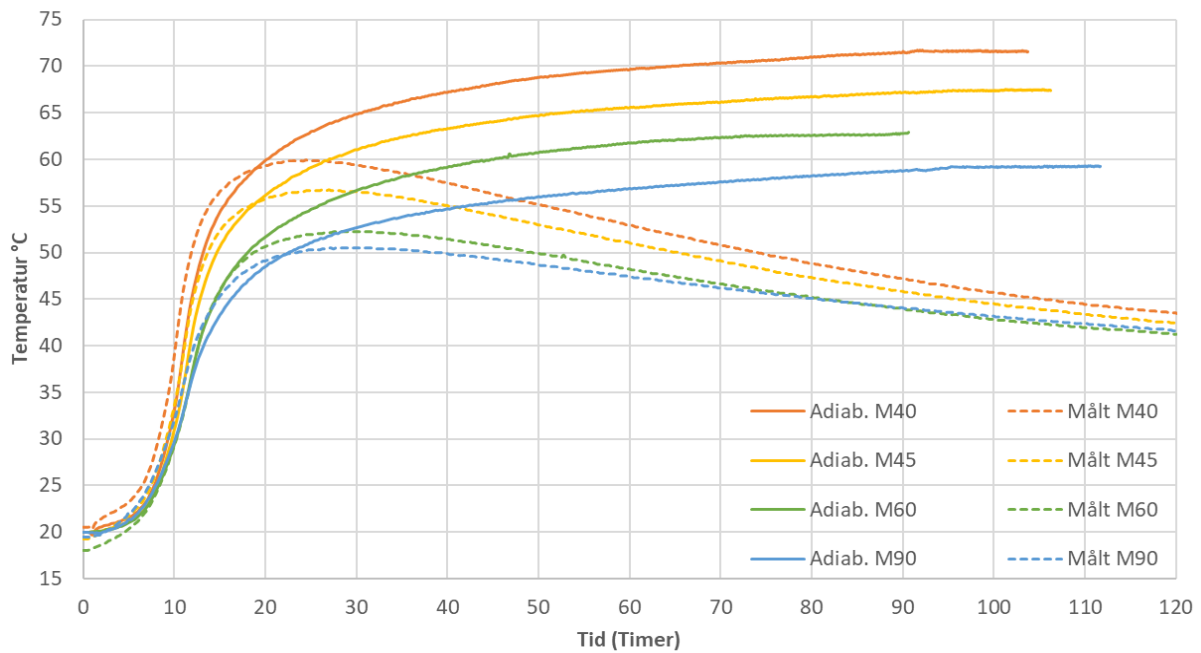
Figur 8.69 viser utviklingen av betongenes varmfunksjonsparametere W_∞ , t_1 og k_1 som funksjon av økende silikastøvinnhold. Her ser man at W_∞ generelt viser en minkende trend ved økende silikastøvinnhold, utenom 4%S som viser noe høyere verdi. t_1 viser en økende trend. k_1 viser ikke en tydelig trend. Tabell 7. 52 viser varmfunksjonsparametere i tabellform.



Figur 8.69: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for betonger med økende silikastøvinnhold.

8.4.4 Bestandighetsklasse

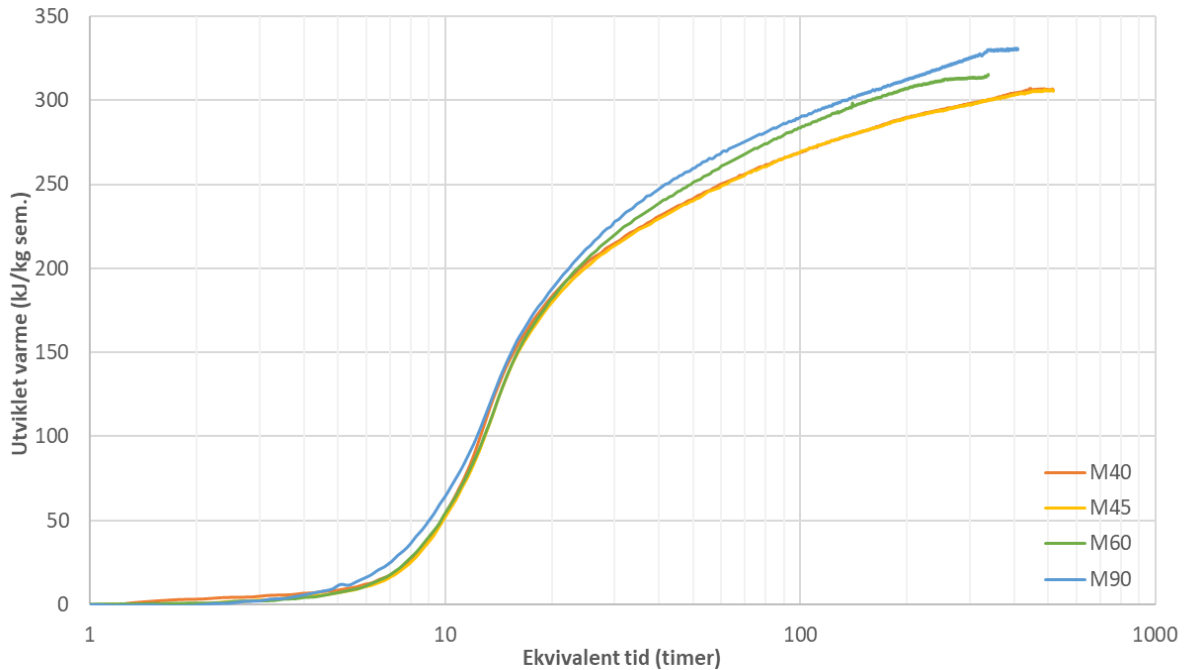
Figur 8.70 viser den adiabatisk og målte temperaturutviklingen av betonger med ulike bestandighetsklasser. Grafen viser at M40 betongen har størst temperaturutvikling, etterfulgt av M45, M60 og M90 betongen. Med det kan man si at lavere bestandighetsklasse fører til lavere adiabatisk temperaturutvikling. Grunnen til det er at økende masseforhold fører til mindre sementpasta og mer aggregat i betongen, og aggregater har vanligvis lavere varmekapasitet enn sementpasta. Dette betyr at det produseres og lagres mindre varme i betongen. Fra tabell 7.58 ser man at temperaturutviklingen i M45 betong reduseres med 6% relativ til M40 betong. Videre reduseres temperaturutviklingen i M60 og M90 betong med henholdsvis 12% og 17% relativ til M40 betongen. Disse verdiene gjelder kun for benyttet masseforhold for disse bestandighetsklassene og kan variere med varierende masseforhold.



Figur 8.70: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av betonger med ulike bestandighetsklasser.

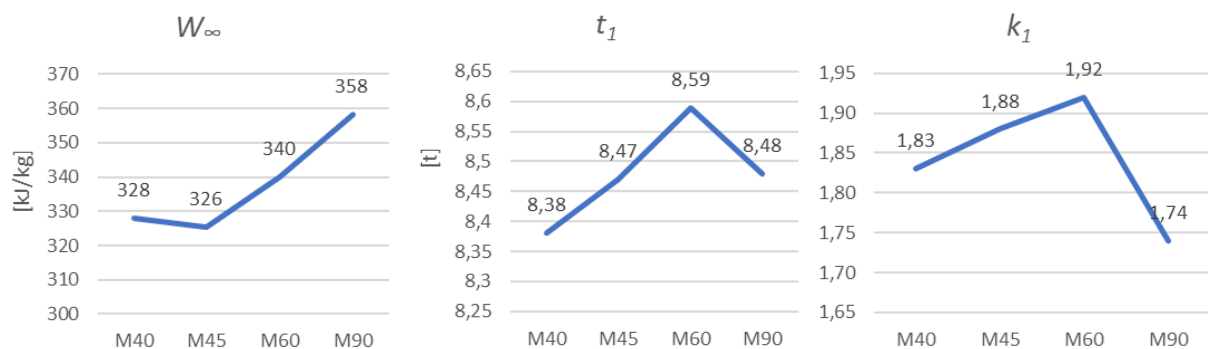
Figur 8.71 viser varmeutviklingen til de samme betongtypene nevnt over, gitt i ekvivalent tid. En tabellert verdi av varmeutviklingen er gitt i tabell 7.60. Varmeutviklingen følger ikke samme trend som betongens temperaturutvikling og har en stigende trend ved lavere bestandighetsklasse. M40 og M45 betongtypene har omtrent samme varmeutvikling, mens M60 og M90 betong viser en klarere økning i varmeutvikling. Dette er fordi økende masseforhold fører til økt varmeutvikling per sementenhet, ettersom den samme mengden sement og vann som benyttes i blandingen må produsere varmen som kreves for hydratisering av sementen i betongen. Fra tabell 7.58 ser vi at varmeutviklingen ved 300 modenhetstimer for M40 og M45 betonger er lik, mens M60 betongen har en økning på 6%, etterfulgt av M90 betong med en økning på 9% relativ til M40 betongen. Tabell 7.59 viser den gjennomsnittlige varmeproduksjonen eller varmeproduksjonens intensitet (dQ/dm) for hver betongtype over et gitt modenhetsintervall mellom 150 og 400 modenhetstimer. Disse verdiene viser ikke en økende trend i dQ/dm ved lavere bestandighetsklasse for alle modenhetsintervall. Dette kan skyldes ujevnheter i grafens utvikling.

Tabell 7.61 viser betongenes avbindingstid. Det var forventet at betongens avbindingstid, vil øke med lavere bestandighetsklasse, ettersom en høyere masseandel av sement i betongen vil kreve mer vann for hydrering av sementpartiklene, noe som fører til at det vil ta lengre tid å oppnå fullstendig hydrering og herding av betongen. 12kJ-metoden viser at M45 betongen har størst avbindingstid, mens trenden vil være minkende for M60 og M90 betongen. Det er viktig å merke seg at andre faktorer som mengde tilsetningsstoffer i betongen kan også påvirke avbindingstiden, noe som kan ha vært tilfelle i disse betongene. Forskjellen mellom 12 kJ- og 2 °C-metoden er på maks 0,5 timer, noe som ser lovende ut for 2 °C-metoden.



Figur 8.71: Varmeutvikling av betonger med ulike bestandighetsklasser.

Figur 8.72 viser utviklingen av betongenes varmfunksjonsparametere W_{∞} , t_1 og k_1 som funksjon av bestandighetsklasse. Her ser man at W_{∞} viser en økende trend ved lavere bestandighetsklasse. t_1 viser en økende trend fram til M60, mens viser en lavere verdi for M90 betong. k_1 viser også en økende trend fram til M60, mens verdien minker for M90 betong. Tabell 7.57 viser varmfunksjonsparametere i tabellform.



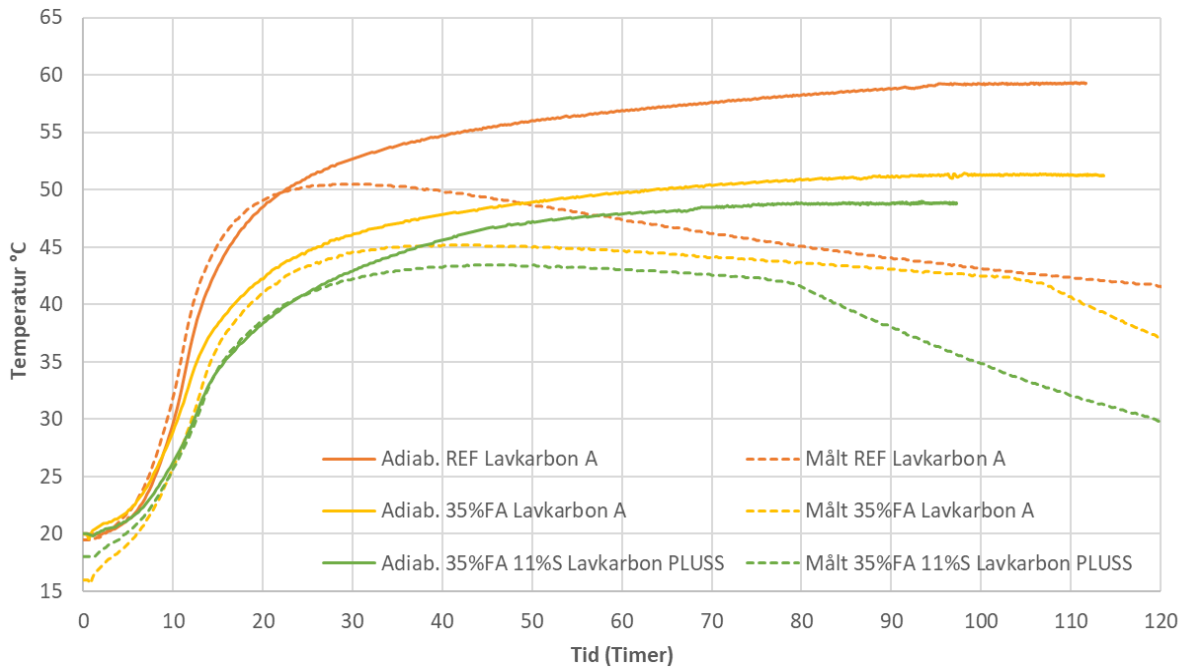
Figur 8.72: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for betonger med ulike bestandighetsklasser.

8.4.5 Lavkarbonbetong

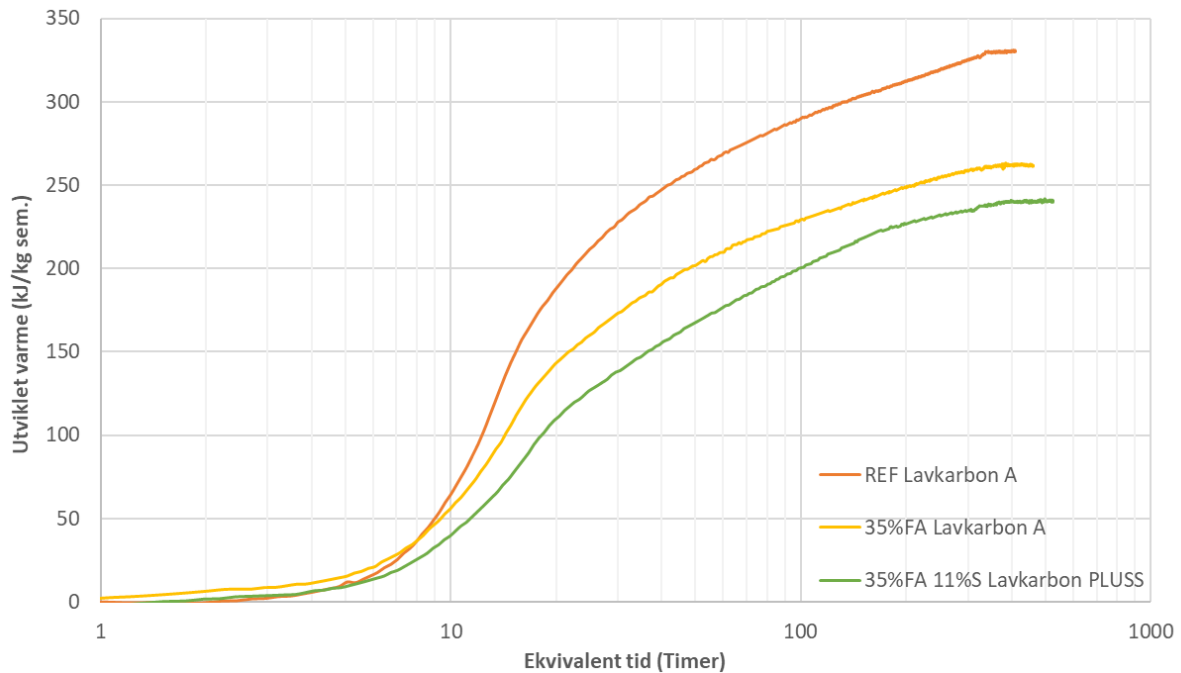
Lavkarbonbetonger med B30 M90 betongkvalitet

Figur 8.73 viser den adiabatisk og målte temperaturutviklingen av B30 M90 betonger med lavkarbonklassene A og Pluss. Fra figuren og tabell 7.62 ser man at lavkarbon A, med 35%FA, oppnår en maks adiabatisk temperatur på 51,4 °C, som er 13% mindre relativ til lavkarbon A (REF) uten tilsatt ekstra flygeaske. Videre vil lavkarbon Pluss, med 35%FA 11%S, oppnå 18% mindre maks adiabatisk temperatur relativ til lavkarbon A (REF). Figur 8.74 viser varmeutviklingen til de samme betongtypene nevnt over, gitt i ekvivalent tid. En tabellert verdi av varmeutviklingen er gitt i tabell 7.65. Ved 300 modenhets timer, vil lavkarbon A med 35%FA og lavkarbon Pluss med 35%FA 11%S oppnå henholdsvis 20% og 28% mindre varme relativ til lavkarbon A REF, se tabell 7.63. Tabell 7.64 viser den

gjennomsnittlige varmeproduksjonen eller varmeproduksjonens intensitet (dQ/dm) for hver betongtype over et gitt modenhetsintervall mellom 150 og 400 modenhetstimer.



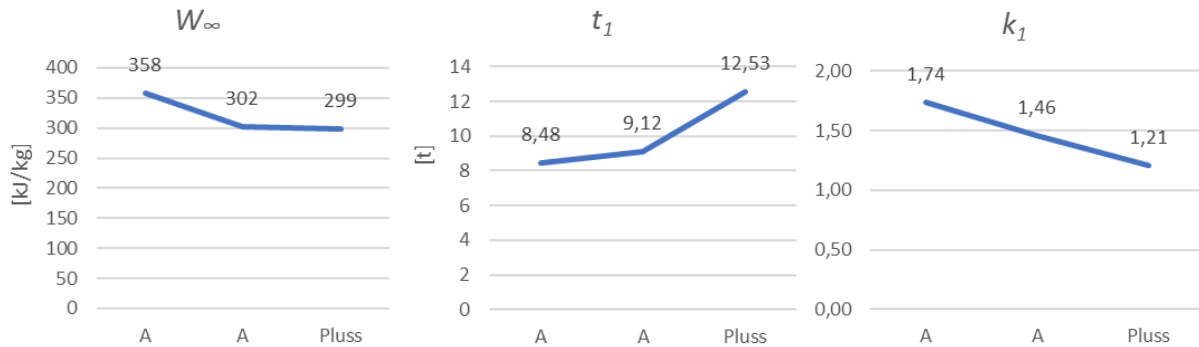
Figur 8.73: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.



Figur 8.74: Varmeutvikling av B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

For å oppnå lavkarbon A med 35%FA, må man forvente at avbindingstiden økes med omtrent 2 timer relativ til lavkarbon A uten ekstra tilsatt flygeaske, se 12 kJ-metoden på tabell 7.66. Men ved tilsetning av silikastøv i tillegg til flygeaske (lavkarbon Pluss med 35%FA 11%S), vil avbindingstiden reduseres litt. 2 °C-metoden viser noe høyere avbindingstid enn 12 kJ-metoden.

Figur 8.75 viser utviklingen av betongenes varmfunksjonsparametere W_{∞} , t_1 og k_1 som funksjon av ulike lavkarbonklasser. Her ser man at W_{∞} viser en minkende trend, t_1 viser en økende trend og k_1 viser en minkende trend, når man går fra lavkarbon A REF til lavkarbon A med 35%FA og lavkarbon Pluss med 35%FA 11%S. Tabell 7.62 viser varmfunksjonsparametere i tabellform.



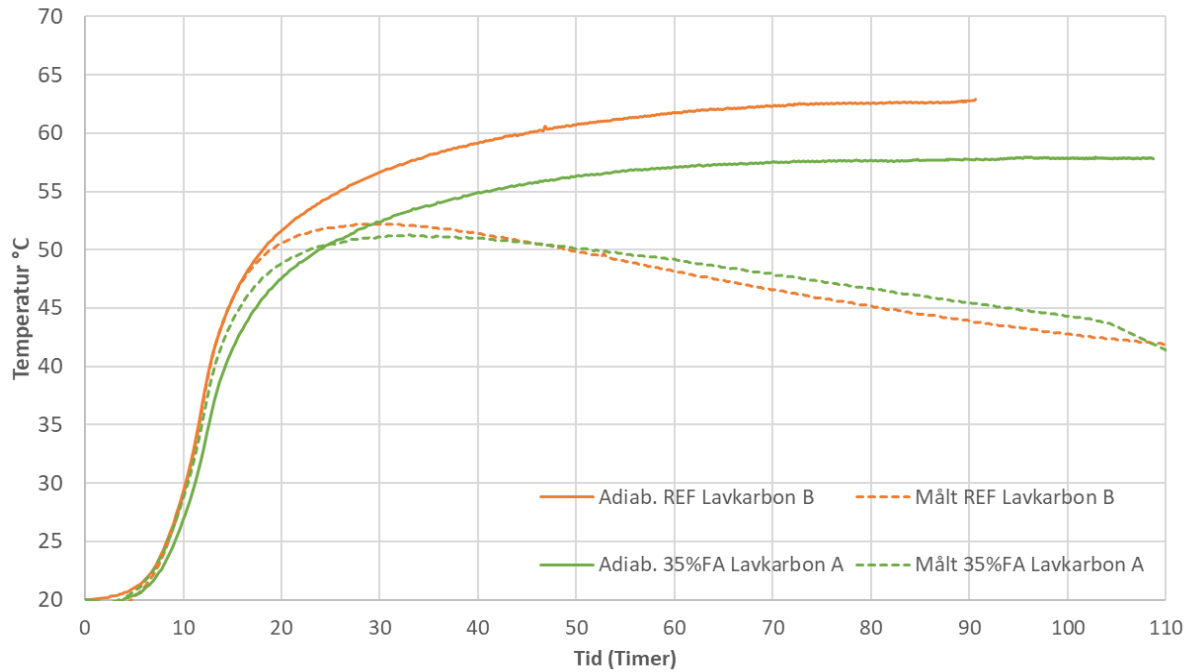
Figur 8.75: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for B30 M90 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Med de beregnede A1, A2 og A3 verdiene for dette prosjektet, vil STD FA B30 M90 betonger uten ekstra FA, med 35%FA og med 35%FA 11%S, ha et klimagassutslipp på henholdsvis 188, 152 og 130 kg CO₂ ekv./m³, se tabell 6.3. Man ser at betongen uten tilsatt ekstra flygeaske og med 35%FA, ligger under kravet til lavkarbon A for B30 betonger med god margin, hvor kravet er på 200 kg CO₂ ekv./m³. Det samme gjelder for betongen med maks flygeaske- og silikastøvinnhold (35%FA 11%S), som har 20 kg CO₂ ekv./m³ mindre utslipp enn kravet på 150 kg CO₂ ekv./m³, se tabell 3.9 for kravene.

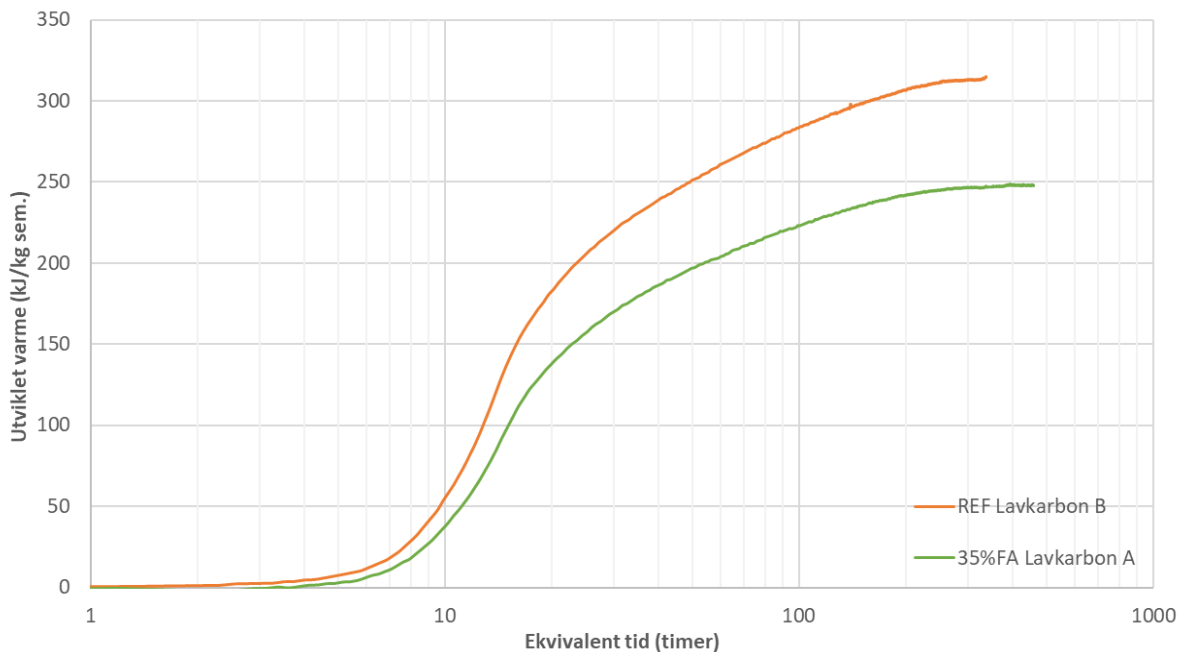
Lavkarbonbetonger med B30 M60 betongkvalitet

Figur 8.76 viser den adiabatisk og målte temperaturutviklingen av B30 M90 betonger med lavkarbonklassene B og A. Fra figuren og tabell 7.68 ser man at M60 lavkarbon A betongen med 35%FA, oppnår en maks adiabatisk temperatur på omtrent 58 °C, som er 8% mindre relativ til M60 lavkarbon B betongen uten tilsatt ekstra flygeaske.

Figur 8.77 viser varmeutviklingen til de samme betongtypene nevnt over, gitt i ekvivalent tid. En tabellert verdi av varmeutviklingen er gitt i tabell 7.70. Ved 300 modenhetstimer, vil M60 lavkarbon A betongen oppnå 22% mindre utviklet varme relativ til M60 lavkarbon B betongen, se tabell 7.68. Fra tabell 7.69 ser man at varmeproduksjon intensiteten for M60 lavkarbon A betongen er mindre enn M60 lavkarbon B mellom 150-250 modenhetstimer, mens i intervallet 250-300 modenhetstimer vil M60 lavkarbon B ha noe mindre verdi. Dette kan forklares med at betongen med 35%FA vil bruke mer tid til å hydratisere og dermed vil varmeutviklingen forsinkes i forhold til betongen uten tilsatt ekstra flygeaske.



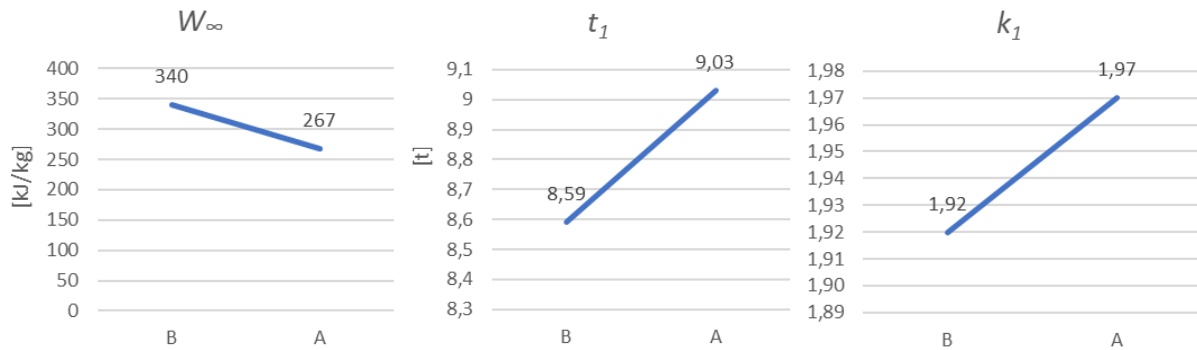
Figur 8.76: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.



Figur 8.77: Varmeutvikling av B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.

I følge 12 kJ-metoden vil M60 lavkarbon A betongen bruke omtrent 1 time mer til å nå sin avbindingstid enn M60 lavkarbon B, se 12 kJ-metoden i tabell 7.71. 2 °C-metoden viser at begge betongene vil ha omtrent samme avbindingstid.

Figur 8.78 viser utviklingen av betongenes varmfunksjonsparametere W_{∞} , t_1 og k_1 som funksjon av ulike lavkarbonklasser. Her viser W_{∞} en minkende trend, mens t_1 og k_1 viser en økende trend, når man går fra lavkarbon B (REF) til lavkarbon A (35%FA). Tabell 7.67 viser varmfunksjonsparametere i tabellform.



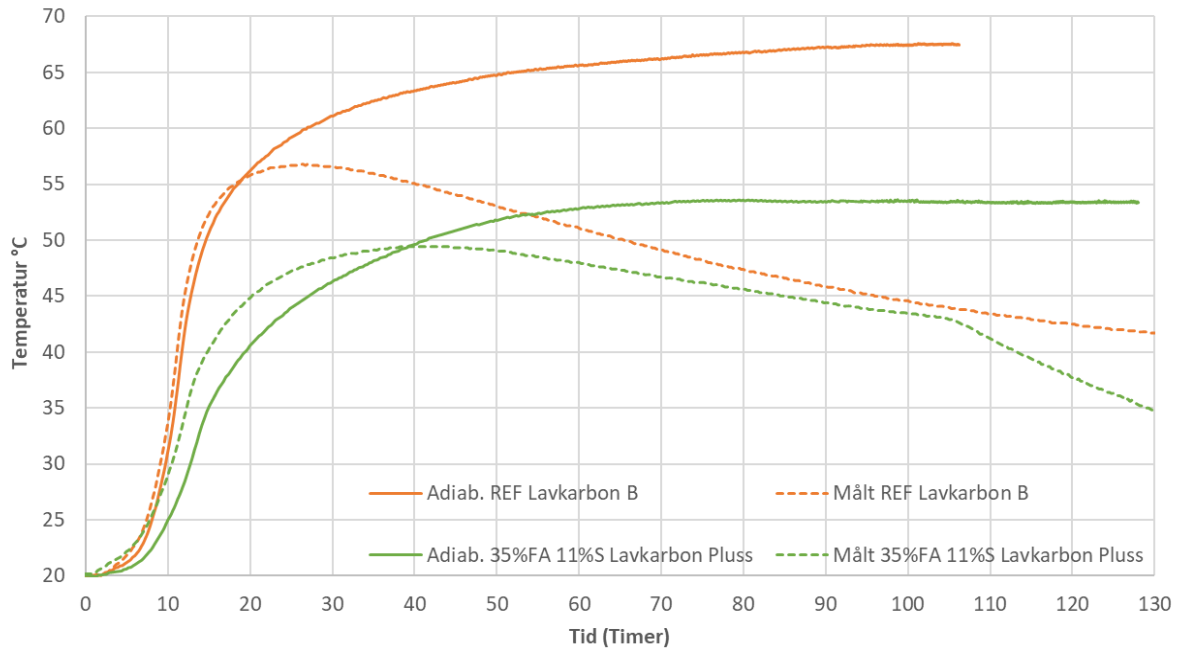
Figur 8.78: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for B30 M60 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Med de beregnede A1, A2 og A3 verdiene for dette prosjektet, vil STD FA B30 M60 betongene med uten tilsatt ekstra flygeaske og med 35%FA, ha et klimagassutslipp på henholdsvis 211 og 188 kg CO₂ ekv./m³, se tabell 6.3. M60 lavkarbon B betongen ligger 19 kg CO₂ ekv./m³ under kravet på 230 kg CO₂ ekv./m³. M60 lavkarbon A ligger 12 kg CO₂ ekv./m³ under kravet på 200 kg CO₂ ekv./m³, se tabell 3.9 for kravene.

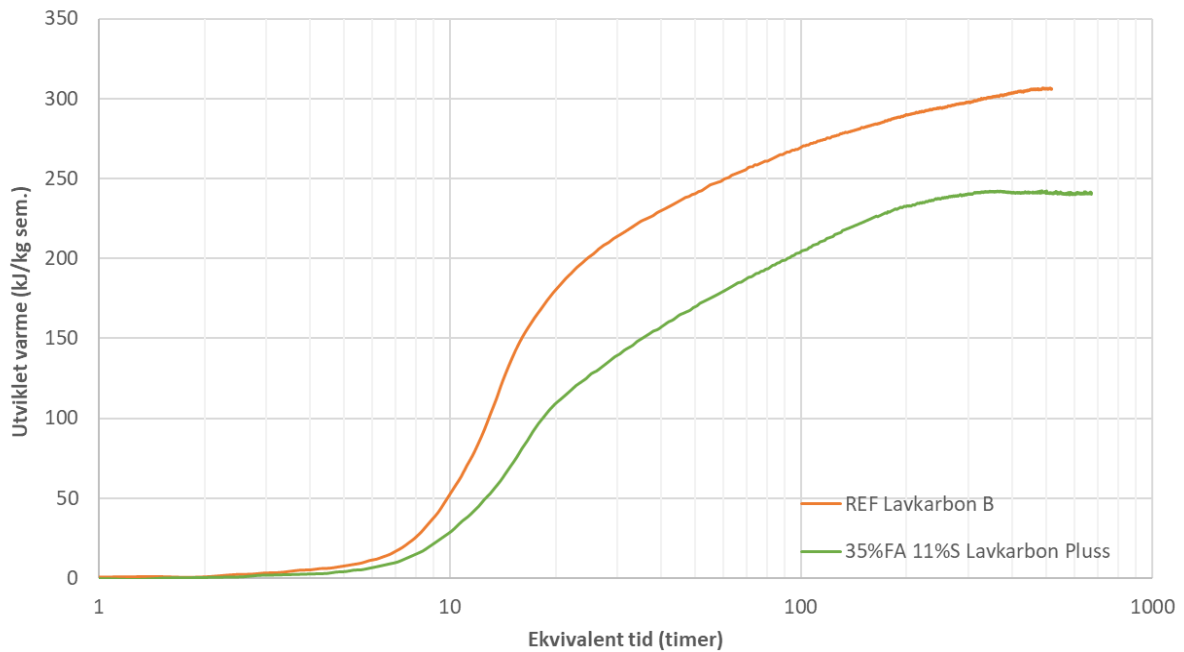
Lavkarbonbetonger med B35 M45 betongkvalitet

Figur 8.79 viser den adiabatisk og målte temperaturutviklingen av B35 M45 betonger med lavkarbonklassene B og Pluss. Fra figuren og tabell 7.73 ser man at M45 lavkarbon Pluss betongen med 35%FA 11%S oppnår sitt maksimum adiabatisk temperatur ved omtrent 54°C, som er 21% mindre relativ til M45 lavkarbon B (REF).

Figur 8.80 viser varmeutviklingen til de samme betongtypene nevnt over, gitt i ekvivalent tid. En tabellert verdi av varmeutviklingen er gitt i tabell 7.75. Ved 300 modenhetstimer vil M45 lavkarbon Pluss betongen oppnå 17% mindre utviklet varme relativ til M45 lavkarbon B betongen, se tabell 7.73. Tabell 7.74 viser varmeproduksjon intensiteten (dQ/dm) for noen modenhetsintervaller mellom 150-400 modenhetstimer. Både 12 kJ og 2 °C-metoden viser at begge betongene har en avbindingstid på omtrent 8 timer.



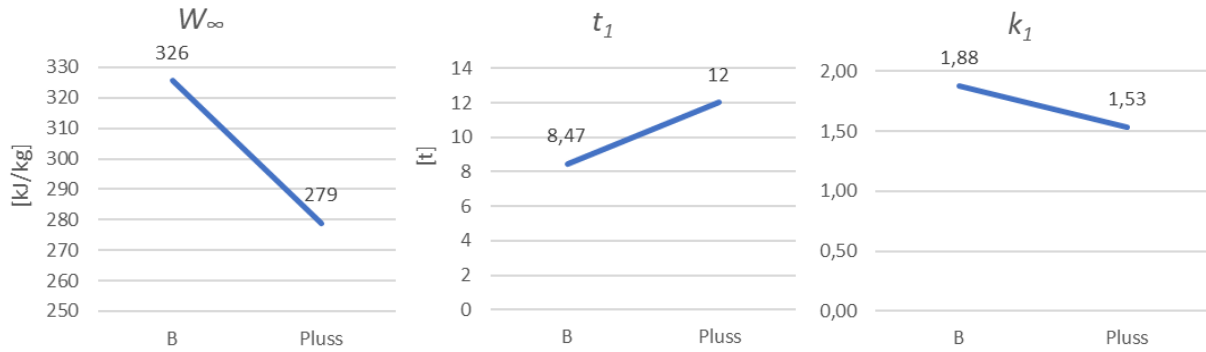
Figur 8.79: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av B35-M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.



Figur 8.80: Varmeutvikling av B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Med de beregnede A1, A2 og A3 verdiene for dette prosjektet, vil STD FA B30 M45 betongene med uten tilsatt ekstra flygeaske og med 35%FA 11%S, ha et klimagassutslipp på henholdsvis 240 og 147 kg CO₂ ekv./m³, se tabell 6.3. M45 lavkarbon B betongen ligger 40 kg CO₂ ekv./m³ under kravet på 280 kg CO₂ ekv./m³. M45 lavkarbon Pluss ligger 13 kg CO₂ ekv./m³ under kravet på 160 kg CO₂ ekv./m³, se tabell 3.9 for kravene.

Figur 8.81 viser utviklingen av betongenes varmfunksjonsparametere W_{∞} , t_1 og k_1 som funksjon av ulike lavkarbonklasser. Her ser man at W_{∞} minker, t_1 øker og k_1 minker når man går fra lavkarbon B (REF) til lavkarbon Pluss (35%FA 11%S). Tabell 7.72 viser varmfunksjonsparametere i tabellform.

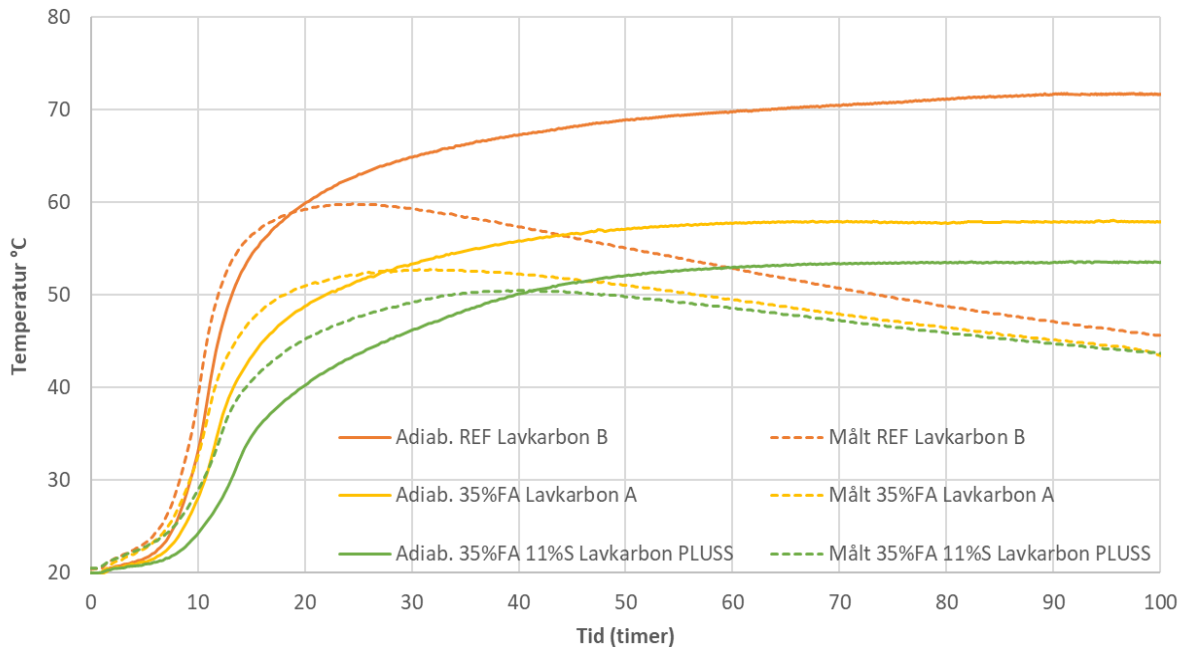


Figur 8.81: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for B35 M45 betonger med ulike lavkarbonklasser.

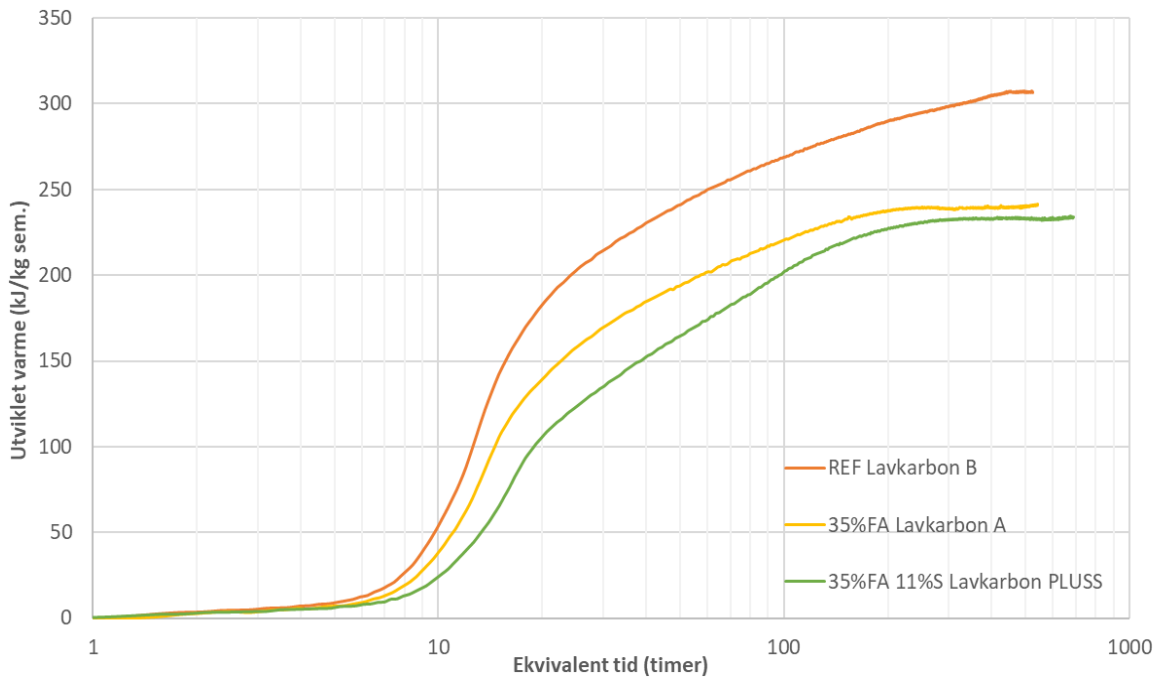
Lavkarbonbetonger med B45 M40 betongkvalitet

Figur 8.82 viser den adiabatisk og målte temperaturutviklingen av B45 M40 betonger med lavkarbonklassene B, A og Pluss. Fra figuren og tabell 7.78 ser man at M40 lavkarbon A med 35%FA oppnår sitt maksimum adiabatisk temperatur ved omtrent 58 °C, som er 19% mindre relativ til M40 lavkarbon B. Videre vil maksimum adiabatisk temperatur for M40 lavkarbon Pluss være 25% mindre relativ til M40 lavkarbon B.

Figur 8.83 viser varmeutviklingen til de samme betongtypene nevnt over, gitt i ekvivalent tid. En tabellert verdi av varmeutviklingen er gitt i tabell 7.80. Ved 300 modenhetstimer vil M40 lavkarbon A og M40 Lavkarbon Pluss oppnå henholdsvis 20% og 22% mindre varme relativ til M40 lavkarbon B betongen, se tabell 7.78. Tabell 7.79 viser varmeproduksjon intensiteten mellom noen modenhetsintervaller mellom 150-400 modenhetstimer.



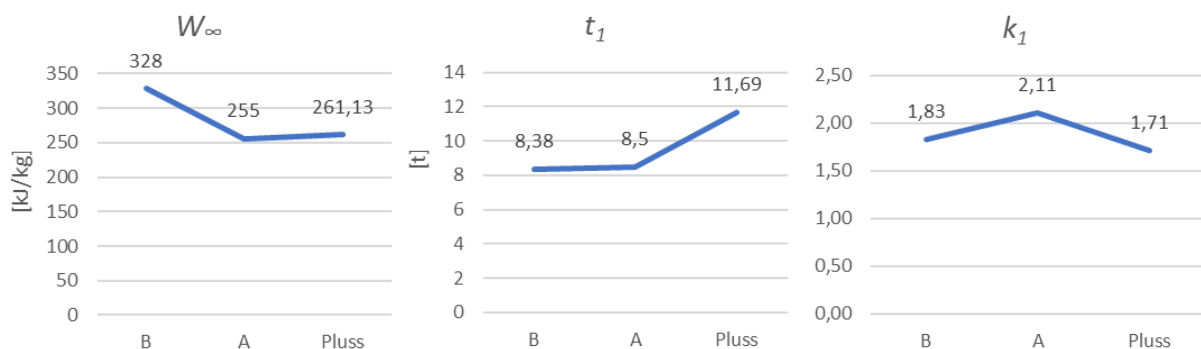
Figur 8.82: Adiabatisk og målt temperaturutvikling av B45-M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.



Figur 8.83: Varmeutvikling av B45 M40 betongkvalitet med ulike lavkarbonklasser.

Avbindingstiden funnet ved 12 kJ-metoden viser en økende trend fra lavkarbon B til Pluss for M40 betongene, hvor lavkarbon B har en avbindingstid på 7 timer, lavkarbon A 7,9 timer og lavkarbon Pluss 8,5 timer, se tabell 7.81. Samme trend er funnet ved 2 °C-metoden, men avbindingstiden ser ut til å være litt større enn 12 kJ-metoden.

Figur 8.84 viser utviklingen av betongenes varmfunksjonsparametere W_{∞} , t_1 og k_1 som funksjon av ulike lavkarbonklasser. Her viser W_{∞} en minkende trend fra lavkarbon B til A, men øker litt igjen ved lavkarbon Pluss. t_1 viser en økende trend, mens k_1 øker fra lavkarbon B til A og minker ved lavkarbon Pluss. Tabell 7.77 viser varmfunksjonsparametere i tabellform.



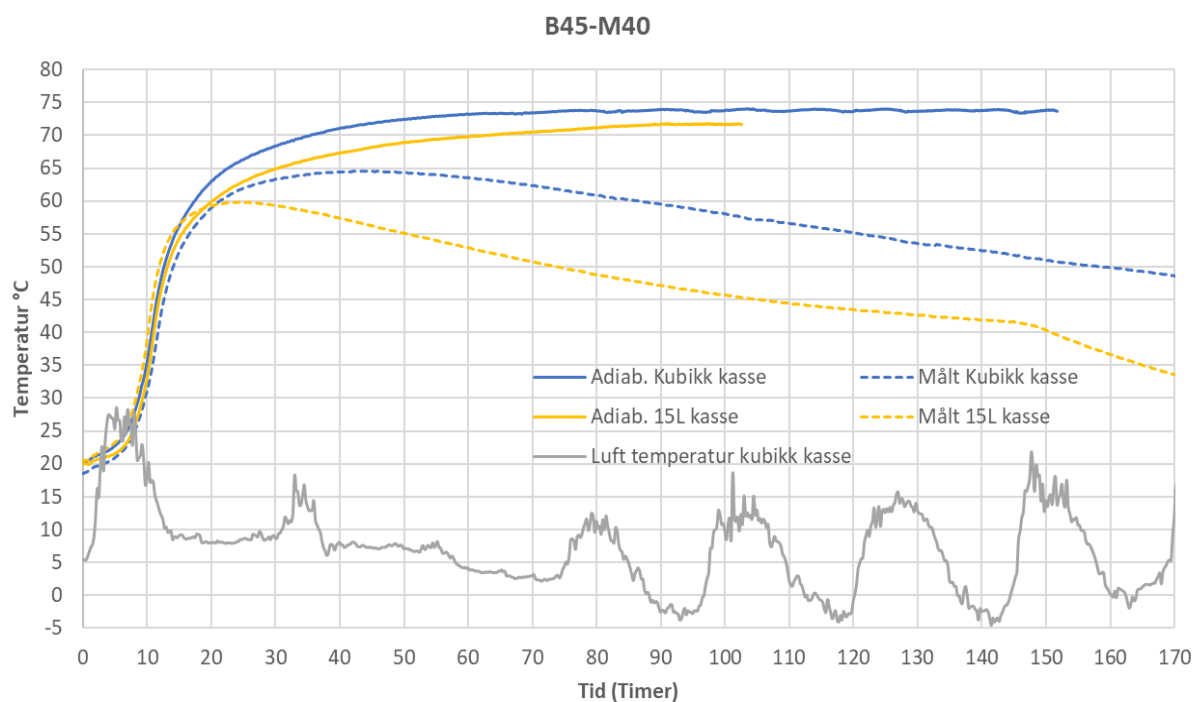
Figur 8.84: Grafisk fremstilling av varmfunksjonsparametere for B45 M40 betonger med ulike lavkarbonklasser.

Med de beregnede A1, A2 og A3 verdiene for dette prosjektet, vil STD FA B45 M40 betongene med uten tilsatt ekstra flygeaske, med 35%FA og med 35%FA 11%S ha et klimagassutslipp på henholdsvis 258, 194 og 151 kg CO₂ ekv./m³, se tabell 6.3. M40 lavkarbon B betongen ligger 32 kg CO₂ ekv./m³ under kravet på 290 kg CO₂ ekv./m³. Videre ligger M40 lavkarbon A og lavkarbon Pluss betongene 26 og 19 kg CO₂ ekv./m³ under kravene som er på henholdsvis 220 og 170 kg CO₂ ekv./m³, se tabell 3.9 for kravene.

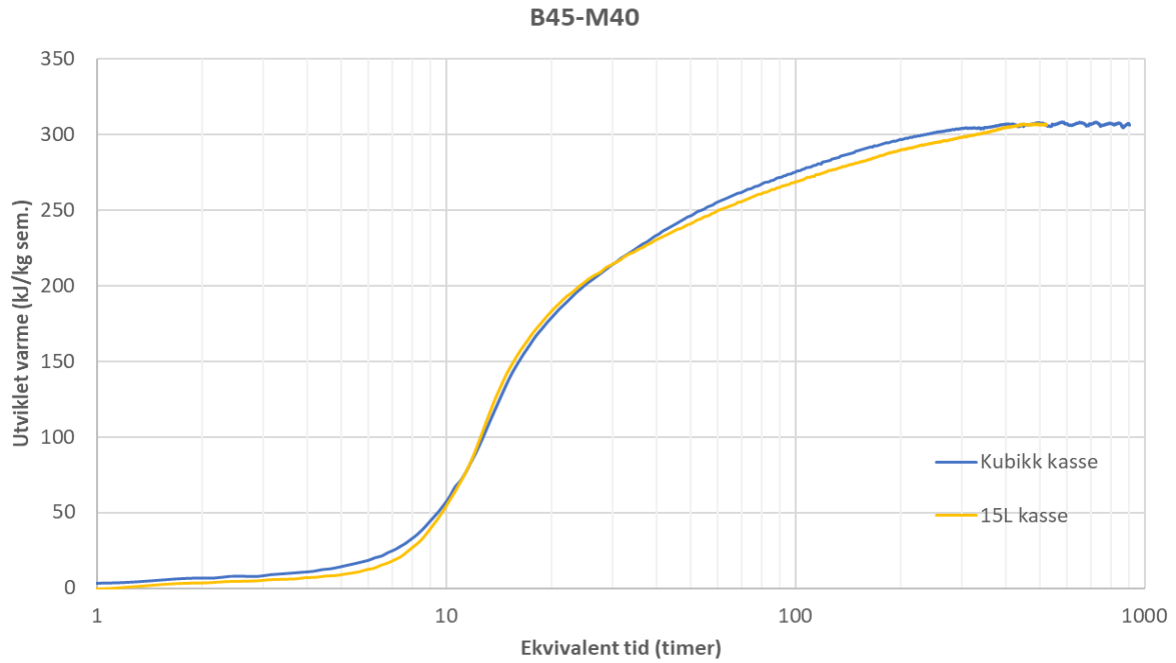
8.4.6 Kubikk kasse forsøk

Når det gjelder egenskapsfunksjonene til HETT²², er den største usikkerheten knyttet til 15 liter herdekasse forsøkene på laboratoriet. Av den grunn ble det gjennomført to kubikk kasse forsøker, for å sammenligne nøyaktigheten av 15 liter herdekasse forsøkene opp mot «fasiten» som er kubikk kasse forsøk. Tabell 7.82 viser varmekonstruksjonsparametere for betonger utført på 1m³ herdekasser. Figur 8.85 viser adiabatisk og målt temperaturutvikling av STD FA B45 M40 betonger støpt på 1m³ og 15L herdekasse. Betongen støpt på kubikk kasse vil ha større temperaturutvikling, hvor maks målt temperatur er omtrent 5°C mer enn 15L kasse. Den adiabatisk maks temperaturen for kubikk betongen er omtrent 3°C mer enn 15L kasse. Figur 8.86 viser at varmeutviklingen for disse betongene har omtrent samme varmeutvikling, hvor betongen støpt på 15L herdekasse har noe mindre varme fram til 10 modenhetstimer og etter 40 modenhetstimer. Etter 300 modenhetstimer har betongen i 15L herdekasse kun 2% mindre utviklet varme i forhold til 1m³ herdekasse.

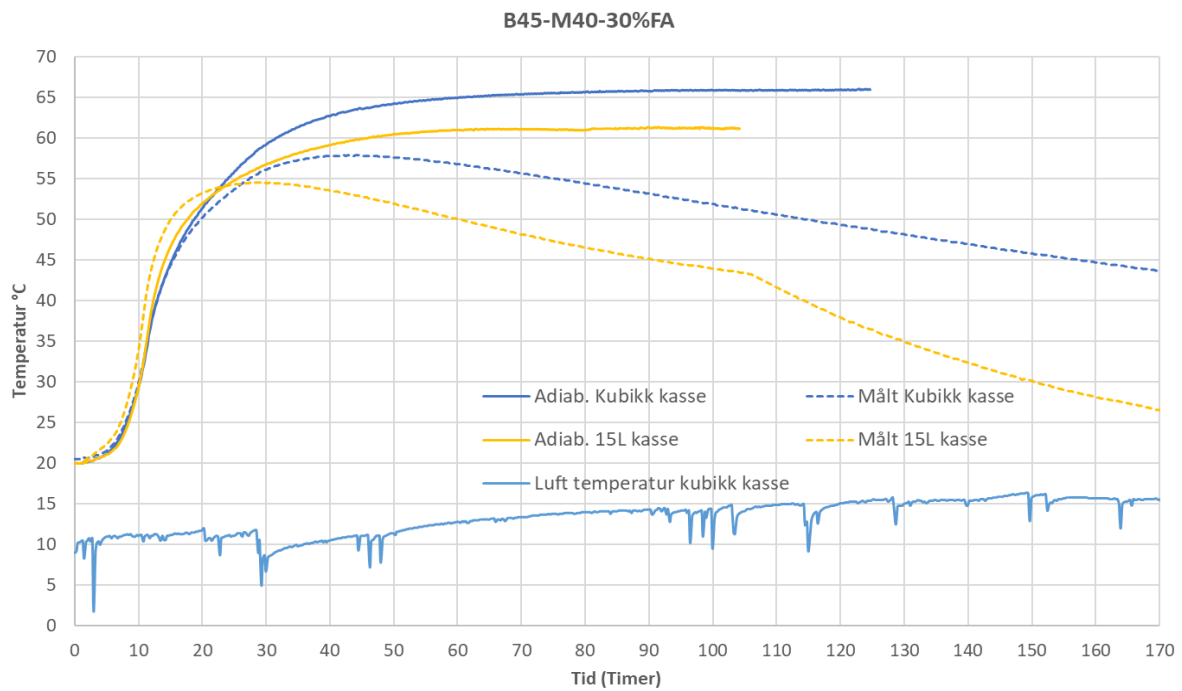
Betongene B45 M40 30%FA og B45 M40 35%FA viser omtrent samme trend som B45 M40 betong, hvor 1m³ herdekassene har litt større temperaturutvikling enn 15L herdekasse, se figur 8.87 og 8.89. Varmeutviklingen for betongene med tilsatt ekstra flygeaske viser at 1m³ herdekasse vil utvikle mer varme enn 15L herdekasse, se figur 8.88 og 8.90. Dette kan begrunnes med at 1m³ herdekasse har mindre varmetapstall i forhold til 15L herdekasse, og kan dermed holde på varme noe lengre.



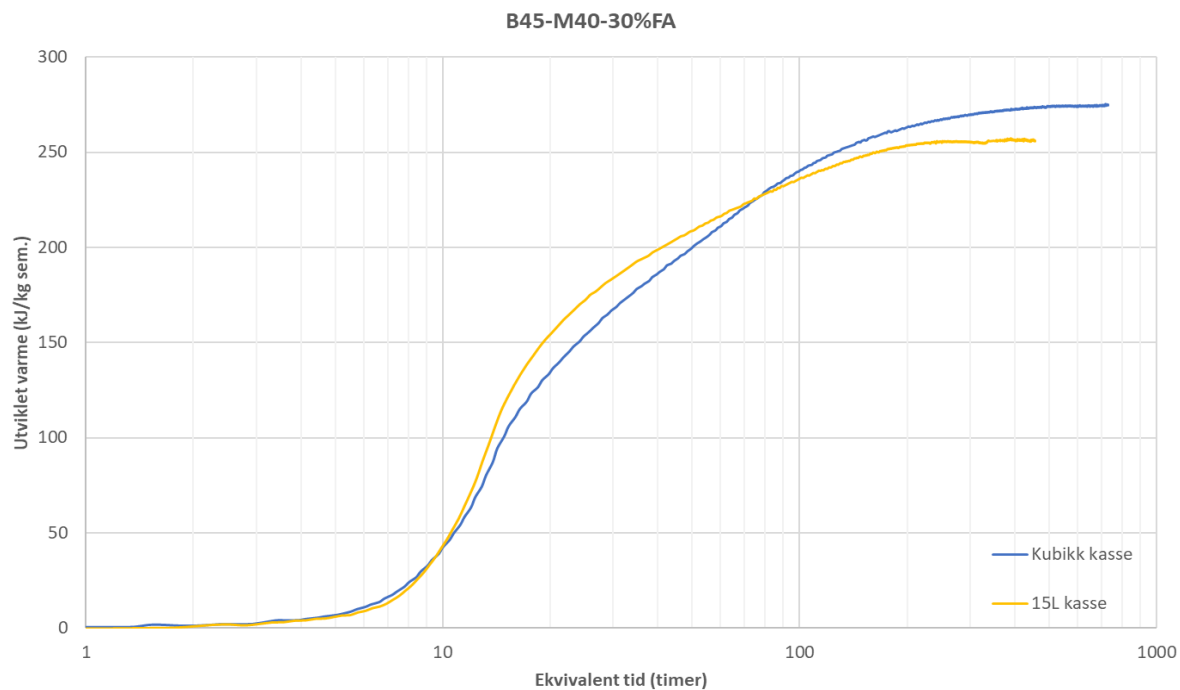
Figur 8.85: Temperaturmålinger av B45 M40 betong i 1m³ og 15 L herdekasse.



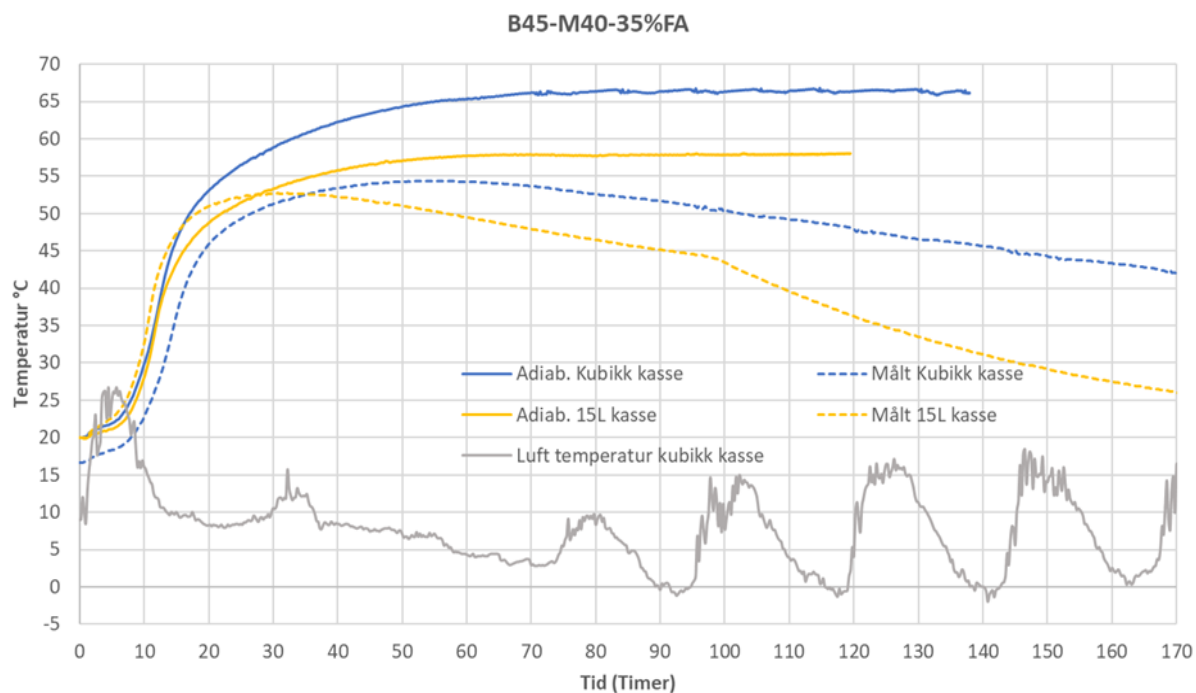
Figur 8.86: Varmeutvikling av B45 M40 betong i 1m³ og 15 L herdekasse.



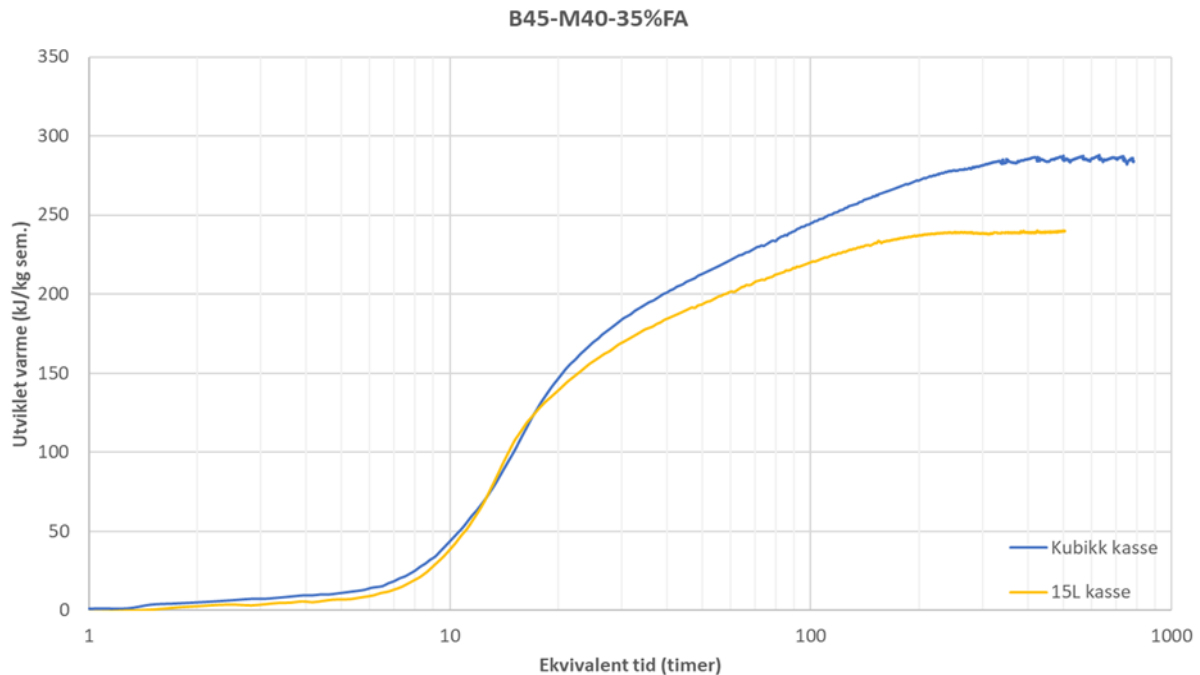
Figur 8.87: Temperaturmålinger av B45 M40 30%FA betong i 1m³ og 15 L herdekasse.



Figur 8.88: Varmeutvikling av B45 M40 30%FA betong i 1m³ og 15 L herdekasse.



Figur 8.89: Temperaturmålinger av B45 M40 35%FA betong i 1m³ og 15 L herdekasse.



Figur 8.90: Varmeutvikling av B45 M40 35%FA betong i 1m³ og 15 L herdekasse.

8.5 HETT²² simulering

Simulering i HETT²² ble gjort for å undersøke betongenes egenskapsutvikling i en reel konstruksjon. Simuleringen ble gjort for lavkarbonbetonger i klassene B (REF), A (35%FA) og Pluss (35%FA 11%S) med betongkvaliteten B45 M40. Tabell 8.1 viser simulering resultatene utført ved 20°C lufttemperatur. Tabell 8.2 viser simulering resultatene utført ved 5°C lufttemperatur. En liste over alle betongtypene som benyttes som inndata til HETT²², med sine egenskapsparametere, vises i vedlegg 12.1.

Figur 8.91 viser HETT²² simuleringer av en 25 cm tykk vegg for B45 M40 betonger med lavkarbon B, A og Pluss, der temperatur- og fasthetsutviklingen for hver av betongtypene vises. Fersk betongtemperatur er satt lik 20 °C, lufttemperatur er konstant på 20 °C og vind på 2 m/s. Forskalingen benyttet er 19mm finer. Her ser man at lavkarbon B vil oppnå en maks temperatur på omtrent 41 °C, etterfulgt av lavkarbon A på omtrent 35 °C og lavkarbon Pluss på omtrent 30 °C maks temperatur. Maks temperaturen vil med andre ord falle med omtrent 5-6 °C ved å gå fra lavkarbon B til A og dermed Pluss, i tillegg til at tiden det tar å nå maks temperatur forskyves med noen timer. Temperaturdifferansen mellom midt i tverrsnittet og ytterpunkt av betongen (maks og min) er på omtrent 6 °C, 4 °C og 3 °C for henholdsvis lavkarbon B, A og Pluss. Dette vil si at økende lavkarbonklasse fører til mindre temperaturdifferanse gjennom tverrsnittet i herdende betong. Dette er mest kritisk for massive konstruksjoner, hvor store temperaturdifferanser kan føre til sprekker og svekke konstruksjonen integritet og bestandighet.

Lavkarbon B, som oppnår den høyeste maks temperaturen, vil oppnå en raskere fasthetsutvikling sammenlignet med lavkarbon A og Pluss. Dette resulterer i at avforskaling kan utføres noe tidligere, i dette tilfelle etter 10 timer. På den annen side vil lavkarbon A og Pluss ha en langsommere fasthetsutvikling på grunn av lavere maks temperatur. Noe som fører til at avforskalingstidspunktet for disse betongene skjer litt senere, i dette tilfellet etter 11 timer for lavkarbon A og 13 timer for lavkarbon Pluss. I tillegg til fasthetsutvikling er det viktig å overvåke andre egenskaper, som for

eksempel krymping og deformasjon, før avforskaling utføres. Dette for å sikre at betongen har oppnådd tilstrekkelig stabilitet og ikke vil sprekke når forskalingen fjernes.

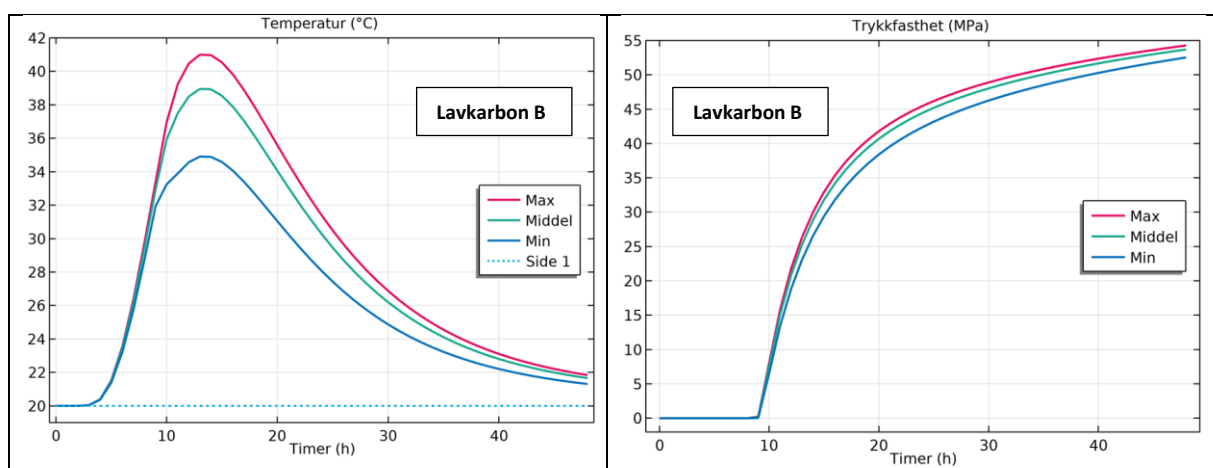
Fra tabell 8.1 ser man at alle betongene har oppnådd en 28 døgns fasthet som er over den karakteristiske trykkfastheten en B45 kvalitet skal ha. Lavkarbon B og A ligger over med en god margin, mens lavkarbon Pluss ligger noen få MPa over.

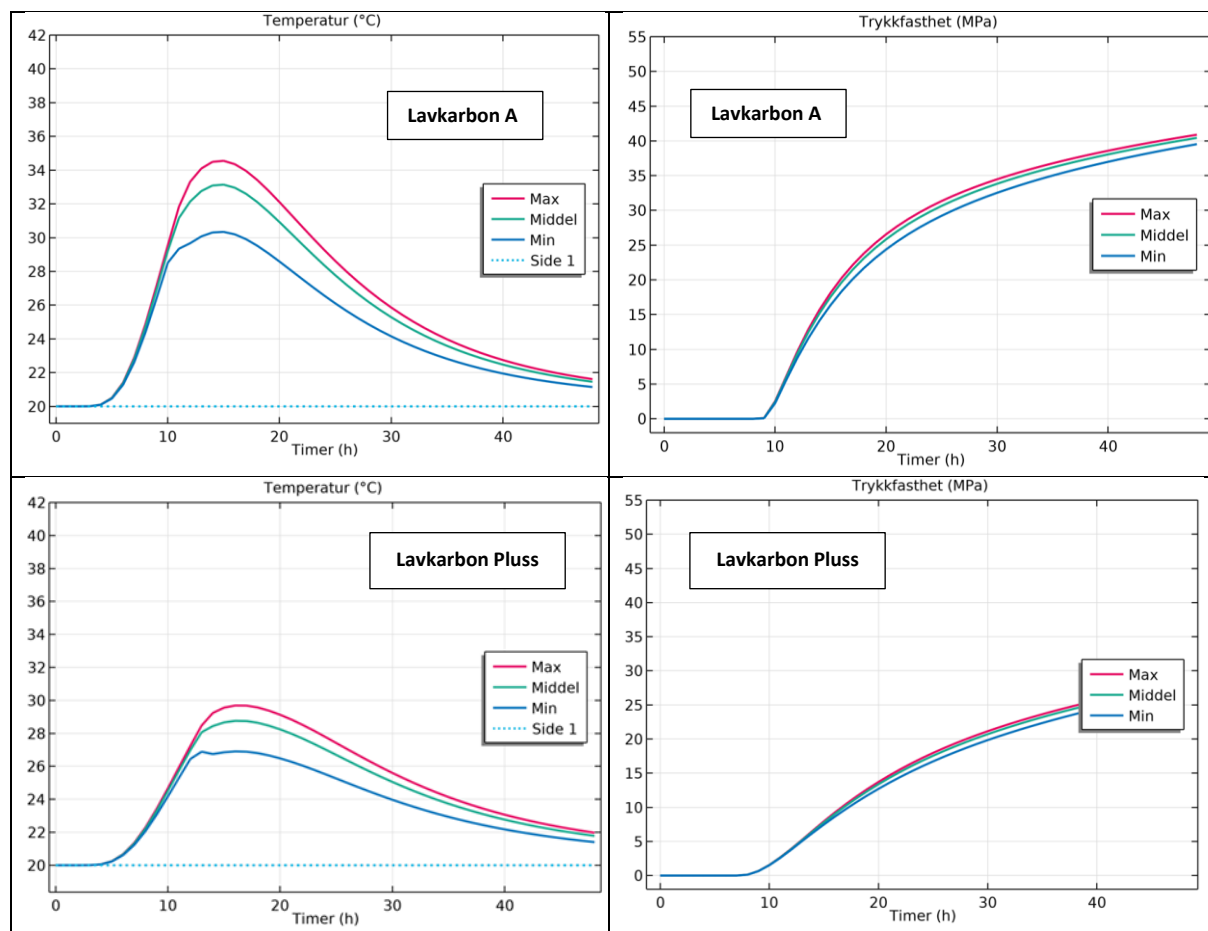
Figur 8.92 viser HETT²² simuleringer av samme type vegg, bortsett fra at fersk betongtemperatur er satt lik 15 °C og lufttemperatur er konstant på 5 °C. Forskalingstype er fortsatt 19mm finer og vind på 2 m/s. Figuren viser at betongtemperaturen både midt i tverrsnittet og ytterpunkt av konstruksjonen faller i verdi fram til omtrent 8-10 timer etter støping før den utvikler herdevarme og stiger. Lavkarbon B vil oppnå en maks temperatur på omtrent 26 °C, etterfulgt av lavkarbon A på omtrent 20 °C og lavkarbon Pluss på 16 °C. Noe som betyr at støping ved 5 °C lufttemperatur vil redusere maks temperaturen med omtrent 15 °C for alle betongtypene i forhold til støping ved 20 °C. Temperaturdifferansen mellom midt i tverrsnittet og ytterpunkt av betongen er på omtrent 6 °C, 4 °C og 3 °C for henholdsvis lavkarbon B, A og Pluss.

Avforskalingstidspunktet er på 15, 17 og 22 timer for henholdsvis lavkarbon B, A og Pluss. Noe som er 5 timer mer for lavkarbon B, 6 timer mer for lavkarbon A og 6 timer mer for lavkarbon Pluss i forhold til støping ved 20 °C lufttemperatur. 28-døgns fasthet for disse betongene viser at ved støping på 5 °C vil lavkarbon B og A oppnå en trykkfasthet som er innenfor den karakteristiske trykkfastheten en B45 kvalitet skal ha. Mens lavkarbon Pluss vil ikke oppfylle dette kravet. Det betyr at for en slik konstruksjon er et lavkarbon Pluss, med lav varmeutvikling, ikke optimalt og krever ekstra tiltak.

Tabell 8.1: resultat fra HETT²² simulering ved 20 °C lufttemperatur.

Lavkarbonklasse	Lavkarbon B	Lavkarbon A	Lavkarbon Pluss
Tidspunkt for avforskaling (5 MPa)	10 timer	11 timer	13 timer
Temperatur, maks:	41,1 °C	34,6 °C	29,7 °C
Temperatur, min:	20,0 °C	20,0 °C	20,0 °C
Temperaturdifferanse, maks:	6,09 °C	4,21 °C	2,79 °C
2 døgns fasthet, middel:	53.7 MPa	40.4 MPa	27,9 MPa
28 døgns fasthet, middel:	74,5 MPa	65 MPa	59,8 MPa

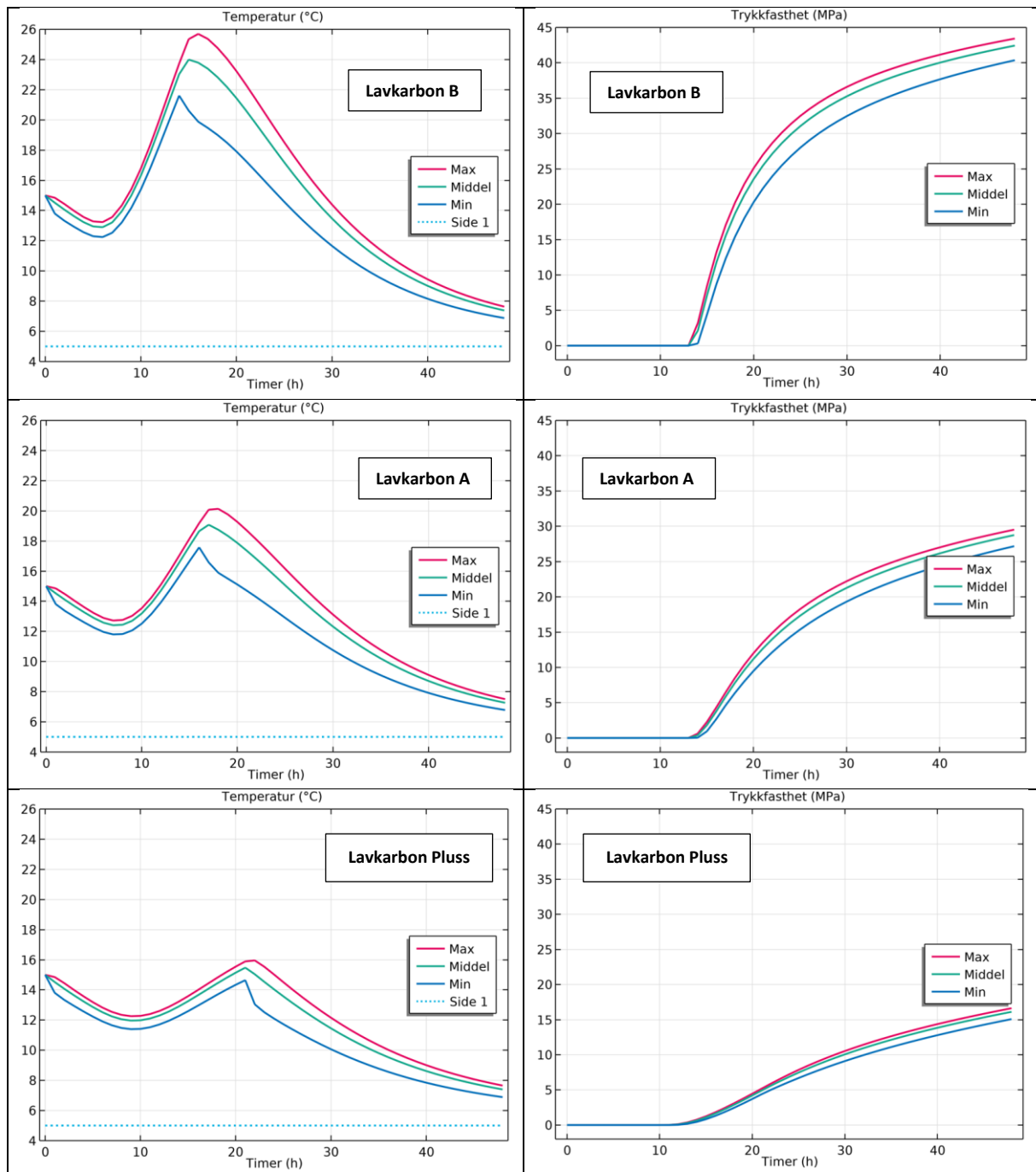




Figur 8.91: HETT²² simulering av en 25 cm tykk vegg ved luft temperatur på 20 °C, av lavkarbonbetonger med betongkvalitet B45 M40.

Tabell 8.2: Resultat fra HETT²² simulering ved 5 °C lufttemperatur.

Lavkarbonklasse	Lavkarbon B	Lavkarbon A	Lavkarbon Pluss
Tidspunkt for avforskaling (5 MPa)	15 timer	17 timer	22 timer
Temperatur, maks:	25,7°C	20,1°C	16°C
Temperatur, min:	6,9°C	6,8°C	6,9°C
Temperaturdifferanse, maks:	5,9°C	4,26°C	3°C
2 døgns fasthet, middel:	42,4 MPa	28,8 MPa	16,1 MPa
28 døgns fasthet, middel:	68,6MPa	58,3 MPa	50 MPa

Figur 8.92: HETT²² simulering av en 25 cm tykk vegg ved luft temperatur på 5 °C av lavkarbonbetonger med betongkvalitet B45 M40.

9. Konklusjon

Ulike bindemidler påvirker betongens egenskapsutvikling ulik. Riktig og oppdatert kunnskap om disse er essensielt for å kunne bedre forutsi og kontrollere betongens oppførsel under herding. I delkapittel 9.1 presenteres det konklusjoner trukket basert på oppgaven delspørsmål. En helhetsvurdering og besvarelse på oppgaven hovedspørsmål presenteres i delkapittel 9.2.

9.1 Temperaturfølsomhet, fasthets- og varmeutvikling

9.1.1 Hvordan er påvirkningen av ulike sementtyper

- ANL FA og STD FA har høyere aktiveringsenergi enn IND betongen over 20 °C og lavere aktiveringsenergi under 20 °C.
- ANL FA og STD FA (betonger med flygeaskeinnhold) har større relativ reaksjonshastighet enn IND betongen både over og under 20 °C.
- Høy temperaturfølsomhet for høye temperaturer (spesielt for ANL FA betongen) fører til at økt utgangstemperatur på betongen eller å tilføre varme på byggeplass, vil gi en god effekt.
- IND sement oppnår en raskere fasthetsutvikling ved 5 °C, 20 °C og 35 °C sammenlignet med STD FA og ANL FA, men har en lavere slutfasthet enn de to andre sementtypene.
- ANL FA har den tregeste fasthetsutviklingen mellom de tre sementtypene, men likevel oppnår en høyere slutfasthet enn de to andre sementene.
- Temperaturutviklingen for ANL FA og STD FA er omtrent like, mens IND betongen har høyest temperaturutvikling.
- Fram til omtrent 70 modenhetstimer har IND-betong høyest varmeutvikling, etterfulgt av STD FA- og ANL FA-betong. Etter omtrent 100 modenhetstimer endrer trenden seg, og ANL FA-betongen vil ha høyest sluttvarme etterfulgt av STD FA- og IND-betongen.

9.1.2 Hvordan er påvirkningen av flygeaske

- Betongene med tilsatt ekstra flygeaske har høyere aktiveringsenergi enn betong uten tilsatt ekstra flygeaske over 20 °C og lavere aktiveringsenergi under 20 °C.
- Økende flygeaskeinnhold i betongen fører til større relativ reaksjonshastighet både over og under 20 °C.
- Økt utgangstemperatur eller tilførsel av varme fører til en positiv effekt på herdingen av betongene med økende flygeaskeinnhold ved høye temperaturer.
- Økende flygeaskeinnhold fører til en minkende fasthetsutvikling ved 5°C og 20 °C fram til 28 døgn fasthet, men ved 35 °C er effekten motsatt.
- Økende flygeaskeinnhold fører til en reduksjon i betongens adiabatisk temperaturutvikling og isoterme varmeutvikling. Bruk av flygeaske kan bidra til å redusere temperaturstigningen og varmeproduksjonen i betongen, noe som er viktig for å kontrollere termiske spenninger og forbedre bestandigheten. Avbindingstiden er lite påvirket av flygeaskeinnhold.

9.1.3 Hvordan er påvirkningen av silikastøv

- Betongene med tilsatt silikastøv har høyere aktiveringsenergi enn betong uten tilsatt silikastøv både over og under 20 °C.
- Silikastøvbetongene har større relativ reaksjonshastighet over 20 °C og mindre relativ reaksjonshastighet under 20 °C.

- Økt utgangstemperatur eller tilførsel av varme har en positiv effekt på herdingen av betong med økende silikastøv ved høye temperaturer.
- Betonger med silikastøvinnhold oppnår en lavere fasthetsutvikling sammenlignet med betonger uten silikastøvinnhold, spesielt ved lave temperaturer ved 28 døgns fasthet. Økende silikastøvinnhold ved høyere temperaturer, som 20 °C og 35 °C, vil oppnå omtrent lik fasthet sammenlignet med betonger som ikke har silikastøv ved 28 døgns fasthet.
- Tilsetning av silikastøv fører til reduksjon i betongens adiabatisk temperaturutvikling, mens den isoterme varmeutviklingen vil i mindre grad bli påvirket. Avbindingstiden er stabil med økende mengde silikastøv.

9.1.4 Hvordan er påvirkningen av bestandighetsklasser

- Betong med bestandighetsklasse M45, M60 og M90 har lavere aktiveringsenergi enn M40 over 20 °C og høyere aktiveringsenergi under 20 °C.
- Betong med bestandighetsklasse M45, M60 og M90 har lavere reaksjonshastighet både over og under 20 °C, i forhold til M40 betongen.
- Høy temperaturfølsomhet ved høye temperaturer, spesielt for M40 betongen, betyr at økt utgangstemperatur eller tilførsel av varme på byggeplassen vil ha en ekstra positiv effekt på herdingsprosessen.
- Lavere bestandighetsklasse fører til en lavere fasthetsutvikling ved alle temperaturene, grunnet tilgjengelighet av sement i betongene for å kunne utvikle fasthet.
- Lavere bestandighetsklasse reduserer betongens adiabatisk temperaturutvikling, men øker betongens isoterme varmeutvikling. Betonger med lavere v/c forhold har mindre vann for hydratiseringsreaksjonene, men disse reaksjonene er mer intense på grunn av den høye sementkonsentrasjonen, noe som fører til større temperaturutvikling. Motsatt har betong med høyere v/c forhold mer tilgjengelig vann som trengs for hydreringsreaksjonene, noe som fører til mindre temperaturutvikling. Men reaksjonene her er mindre intense på grunn av lavere sementkonsentrasjon, noe som fører til større varmeutvikling.

9.1.5 Hvordan er påvirkningen av ulike lavkarbonbetonger

Følgende konklusjoner gjelder for lavkarbonbetonger med betongkvalitetene B30 M90, B30 M60, B35 M45 og B45 M40.

- Lavkarbonbetonger med tilsatt ekstra flygeaske har en høyere temperaturfølsomhet over 20 °C og lavere temperaturfølsomhet under 20 °C i forhold til betong uten ekstra flygeaske.
- Lavkarbonbetonger med både flygeaske og silikastøv har en høyere temperaturfølsomhet både over og under 20 °C i forhold til betong med kun ekstra tilsatt flygeaske.
- Lavkarbonbetonger med ekstra tilsatt flygeaske og eller silikastøv har større relativ reaksjonshastighet over og under 20 °C i forhold til lavkarbonbetong uten tilsatt tilsetningsmateriale.
- Økt utgangstemperatur eller tilførsel av varme på byggeplassen vil ha en positiv effekt på herdingsprosessen for lavkarbonbetongene.
- Ved 5°C lufttemperatur (vinterforhold) vil lavkarbonbetonger ha svært lite tidligfasthet i forhold til 20 °C og 35 °C. Noe som betyr at ved bruk av lavkarbonbetonger betongene i vinterforhold burde det tas en vurdering om det skal iverksettes herdetiltak.

- For lavkarbonbetonger med tilsatt ekstra flygeaske eller med kombinasjon av flygeaske og silikastøv er slutfastheten (28 døgn fasthet) sterkt temperaturavhengig i forhold til lavkarbonbetonger uten tilsatt tilsetningsmateriale.
- Lavkarbonbetonger med tilsatt ekstra flygeaske eller kombinasjon av flygeaske og silikastøv fører til en betydelig reduksjon i betongens temperatur- og varmeutvikling i forhold til lavkarbonbetonger uten tilsatt tilsetningsmateriale. Noe som kan være fordelaktig for å begrense temperaturøkningen i store betongkonstruksjoner eller for å unngå termisk sprekkdannelse.

9.2 Hvordan påvirker ulike bindemidler betongens temperaturfølsomhet, fasthets- og varmeutvikling?

Tilsetting av flygeaske og silikastøv i betongblandingen, masseforhold og bruk av lavkarbonbetonger har betydelig innvirkning på betongens temperaturfølsomhet, fasthetsutvikling og varmeutvikling.

- ANL FA og STD FA har økt temperaturfølsomhet over 20 °C og redusert under 20 °C enn IND betongen. IND betong har høyest adiabatisk temperaturutvikling og raskest fasthetsutvikling, men lavere slutfasthet i forhold til ANL FA og STD FA.
- Økende flygeaske gir økt temperaturfølsomhet over 20 °C og redusert under 20 °C, redusert adiabatisk temperaturutvikling, og minkende fasthetsutvikling ved lave temperaturer og økende ved høye temperaturer.
- Økende silikastøv gir økt temperaturfølsomhet både over og under 20 °C, redusert adiabatisk temperaturutvikling, og lavere fasthetsutvikling ved lave temperaturer og omtrent like ved høye temperaturer.
- Lavere masseforhold gir økt temperaturfølsomhet over 20 °C og redusert under 20 °C, økende adiabatisk temperaturutvikling, og høyere fasthetsutvikling ved både lave og høye temperaturer.
- Lavkarbonbetonger med både flygeaske og silikastøv har en høyere temperaturfølsomhet både over og under 20 °C i forhold til lavkarbonbetonger med kun ekstra tilsatt flygeaske.

Bruken av lavkarbonbetonger, som inkluderer alternative bindemidler og tilsetningsstoffer med lavt karbonavtrykk, kan ytterligere redusere betongens miljøpåvirkning. Ved å ha kunnskap om innvirkningen av disse parametere kan man bedre forutsi og kontrollere betongens oppførsel under herding. Dette er avgjørende for å vurdere risikoen for termiske spenninger, forhindre sprekker og sikre ønsket styrke og holdbarhet i konstruksjoner. Ved å utvide databasen i HETT²² med nye og oppdaterte parametere og egenskaper, kan man få mer nøyaktige og pålitelige resultater som hjelper med å optimalisere betongblandinger, planlegge riktig tidsramme for herding og iverksette nødvendige tiltak for å minimere potensielle problemer knyttet til varme og temperatur i betongkonstruksjoner.

10. Anbefalinger

I dette prosjektet har vi kommet over noen områder som kunne være av interesse å forske videre på. Forslagene til fremtidig arbeid er som følge:

- Undersøke flere betonger med sementtypene ANL FA og IND sement.
- Undersøke effekten av akselerator og retarder på betongen.
- Et større utvalg av doseringsmengder både for flygeaske og silikastøv bør undersøkes.
- Flere 1m³ herdekasseforsøker i felt bør gjøres for å kalibrere resultatene fra 15 liter herdekasseforsøk utført på laboratoriet.
- Trykkfasthet på mer enn 28-døgn fasthet bør undersøkes, det vil si 56 og 91 døgns trykkfasthet.

11. Referanser

- [1] D. T. I. Fredvik. 2022. *Last ned nye hett22* [Online]. Hentet fra: <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/DownloadHETT22>. Lastet ned: 20.05.2023.
- [2] Regjeringen.no. 2020. *Klimaforliket på stortinget* [Online]. Hentet fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/klimaforliket/id2076645/>.
- [3] United Nations Climate Change. u.å. *The paris agreement* [Online]. Hentet fra: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.
- [4] Kontrollrådet. 2018. *Betongens historie* [Online]. Hentet fra: <https://kontrollbetong.no/%20artikler/betongens-historie>.
- [5] Norsk Betongforening. 2016. *Visste du dette om betong og miljø?* [Online]. Hentet fra: <https://betong.net/wp-content/uploads/17966-Visste-du-dette-om-betong-og-milj%C3%B8-WEB.pdf>. Lastet ned: 12.03.
- [6] H. M. s. Norge. u.å. *Sementproduksjon og co2* [Online]. Hentet fra: <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/sementproduksjon-co2>.
- [7] United States Environmental Protection Agency. 2023. *Frequent questions about the beneficial use of coal ash* [Online]. Hentet fra: <https://www.epa.gov/coalash/frequent-questions-about-beneficial-use-coal-ash>.
- [8] A. Neville, "Properties of concrete, vol. 687," utg.: London, UK: Pitman Publishing, 2011.
- [9] H. Materials. u.å. *Cement* [Online]. Hentet fra: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/cement>.
- [10] S. Norge, "Ns-en 197-1 sement-del 1: Sammensetning, krav og samsvarskriterier for ordinære sementtyper," *Tilgjengelig fra* <https://www.standard.no/no/nettbutikk/produktkatalogen/produktpresentasjon>, 2011.
- [11] A. Portland, *Beton-bogen*, 2 utg. Cementfabrikkernes tekniske opplysningskontor, 1985.
- [12] M. Maage, red., *Betong-regelverk, teknologi og utførelse*. OSLO: NORSK BETONGFORENING OG BYGGENÆRINGENS FORLAG, 2015.
- [13] R. Helmuth, *Fly ash in cement and concrete* (nr. SP040. 01T). 1987.
- [14] Heidelberg Materials sement Norge. u.å. *Bygg- og anleggsementer (samleside)* [Online]. Hentet fra: <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/BA-sementer>.
- [15] M. V. Madurwar, R. V. Ralegaonkar og S. A. Mandavgane, "Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review," *Construction and Building materials*, vol. 38, s. 872-878, 2013.
- [16] *Ns-en 450-1:2012 flygeaske for betong - del 1: Definisjon, spesifikasjoner og samsvarskriterier*, 1, 2012.
- [17] S. Jacobsen *et al.*, *Tkt 4215 concrete technology 1*, 2023. utg. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2023.
- [18] Elkem AS. u.å. *Elkem microsilica® powder products for concrete & mortar applications* [Online]. Hentet fra: <https://www.elkem.com/silicon-products/construction/concrete/elkem-microsilica-powder/>.
- [19] Byggforsk, "Viktige parametere for prosjektering og utførelse av bestandige betongkonstruksjoner," 2004, Art. nr. 520.026.
- [20] Heidelberg Materials cement Norge. u.å. *God betong er bestandig* [Online]. Hentet fra: https://www.sement.heidelbergmaterials.no/sites/default/files/assets/document/dc/aa/god-betongerbestandig_web_0.pdf.
- [21] Ø. Bjøntegaard, B. Pedersen, G. Nordbotten og L. Bathen, "Forståelse og bruk av håndbok r762, prosess 84," Statens vegvesen13.10.2017, 2017, [Statens vegvesens rapporter], https://fileserv.motocross.io/trafikksiden/SVV_rapport_451.pdf.
- [22] Byggforsk, "Betong. Typer, egenskaper og bruksområder," 2016, Art. nr. 572.205.
- [23] N. Standard, "Ns-en 206: 2013+ a1: 2016+ na: 2020," *Concrete-Specification, performance, production and conformity*. Norway, 2020.

- [24] N. Betongforening, "Publikasjon nr. 37: Lavkarbonbetong," *Norsk Betongforening2020*, 2020.
- [25] Ø. Bjøntegaard, "Volumendringer og risstendens i betong," Statens vegvesen07.09.2009, 2009, [Teknologirapport], https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/194017/volumendringer_og_risstendens_i_betong.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [26] Ø. Bjøntegaard, "Basis for and practical approaches to stress calculations and crack risk estimation in hardening concrete structures—state of the art fa 3 technical performance. Sp 3.1 crack free concrete structures," 2011.
- [27] Ø. Oskarsen og A. H. Kind, "Effekten av lavvarmebetong på fasthetsutvikling og rissrisiko i anleggskonstruksjoner utsatt for fastholding."
- [28] U. i. Oslo. 2011. *Arrhenius ligning* [Online]. Hentet fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/a/arrheni.html>.
- [29] Heidelberg Materials cement Norge. u.å. *Fra hett97 til hett22* [Online]. Hentet fra: <https://www.sement.heidelbergmaterials.no/no/fra97til22>.
- [30] G. Kjellmark og A. B. E. Klausen, "Mechanical properties and calculation of model parametersconcrete with norcem cement and variable fly ash content. Fa: Technical performance. Sp 3.1 crack free concrete structures," 2015.
- [31] S. Vegvesen, "Håndbok n400 bruprosjektering," *Oslo: Vegdirektoratet*, 2015.
- [32] *Ns-en 13263-1:2005+a1:2009 silikastøv for betong - del 1: Definisjoner, krav og samsvarskriterier*, 1, 2009.
- [33] *Prøving av herdnet betong — del 14: Deladiabatisk metode for bestemmelse av varmeavgivelse fra betong under herdningsprosessen*, NS-EN 12390-14:2018, 2018.

12. Vedlegg

12.1 Betongparametere til HETT²²

%Betongkvalitet	Sementtype 1	Tilsetningsmaterial 1	Tilsetningsmaterial 2	Avbindingstid [h]	Bindemiddelmengde [kg/m ³]	Densitet [kg/m ³]	Wc [l/kg]	t ₁ [h]	Kappa1 [1]	A [J/mol]	B [J/(mol*K)]	Fcc28 [MPa]	s [1]	t0 [h]
B45 M40	IND			5.6 timer	475	2403	300600	5.56	2.59	32000	1250	55.0	0.07	10.18
B45 M40	ANL-FA			6.4 timer	400	2448	384900	10.5	1.25	37000	450	55.0	0.26	7.11
B45 M40	STD-FA			7.1 timer	420	2353	327940	8.38	1.83	33000	700	55.0	0.14	10.26
B45 M40	STD-FA		Totalt 25 % flygeaske	7.8 timer	405	2422	271570	7.94	2.38	33300	650	55.0	0.17	10.06
B45 M40	STD-FA		Totalt 30 % flygeaske	7.7 timer	395	2429	272420	8.25	2.13	33400	640	55.0	0.18	9.55
B45 M40	STD-FA		Totalt 35 % flygeaske	8.0 timer	387	2422	253570	8.44	2.15	33800	550	55.0	0.19	9.22
B45 M40	STD-FA	4% silika	Totalt 25 % flygeaske	7.2 timer	389	2422	284720	8.51	2	34000	680	55.0	0.19	9.27
B45 M40	STD-FA	8% silika	Totalt 25 % flygeaske	7.6 timer	375	2416	272620	8.92	2.19	34400	700	55.0	0.24	7.97
B45 M40	STD-FA	11% silika	Totalt 25 % flygeaske	8.0 timer	365	2403	268780	9.56	2.1	35000	750	55.0	0.27	7.47
B35 M45	STD-FA			7.5 timer	389	2410	325510	8.47	1.88	31200	1000	45.0	0.15	9.86
B30 M90	STD-FA			7.9 timer	340	2403	340020	8.59	1.92	29000	1250	37.0	0.16	9.64
B30 M90	STD-FA			7.4 timer	298	2391	358250	8.48	1.74	27500	1600	37.0	0.19	8.07
B30 M90	STD-FA		Totalt 35 % flygeaske	9.5 timer	298	2402	301970	9.12	1.46	34200	600	37.0	0.25	7.36
B30 M60	STD-FA	11% silika	Totalt 35 % flygeaske	9.3 timer	298	2353	298510	12.53	1.21	37500	450	37.0	0.34	4.46
B35 M45	STD-FA	11% silika	Totalt 35 % flygeaske	8.1 timer	377	2402	267340	9.03	1.97	33400	650	37.0	0.21	8.93
B45 M40	STD-FA	11% silika	Totalt 35 % flygeaske	8.2 timer	340	2404	278940	12	1.53	33000	600	45.0	0.39	3.48
B45 M40	STD-FA	11% silika	Totalt 35 % flygeaske	8.9 timer	349	2404	261130	11.69	1.71	36000	500	55.0	0.30	6.78

12.2 Branel resept

Resept 1:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7215	Dato	15-02-2023	Kl.	Sinatur		
Reseptnummer	Noc23024-01	Reseptnavn	STD-FA B45 M40 REF				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.37	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	168.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.9		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	420	Sementimvolum (l/m ³)	308	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	420	Matriksvolum (l/m ³)	336	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	276		
Total flyeaskemengde (% av b)	18.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement							
NoC STD-FA B(V-L) AI-2022-0005 09/11	18.900	420.0	100.0		3000	0.085	1.40
Vann							
Tilsatt vann	6.326	165.4 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørrestoff (%)			
Mapei SX-23 2020	0.151	3.36	0.80	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	49.699	1079.6 **	60	2.3	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	32.509	722.4 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2391		** Uten fukt			

Resept 2:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7235	Dato	21-02-2023	Kl.	Sinatur		
Reseptnummer	Noc23024-02	Reseptnavn	STD-FA B45 M40 REF REP				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.37	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	168.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.9		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	420	Sementimvolum (l/m ³)	308	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	420	Matriksvolum (l/m ³)	336	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	276		
Total flyeaskemengde (% av b)	18.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement							
NoC STD-FA B(V-L) AI-2023-0001	18.900	420.0	100.0		3000	0.085	1.40
Vann							
Tilsatt vann	6.472	165.4 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørrestoff (%)			
Mapei SX-23 2020	0.151	3.36	0.80	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	49.553	1079.6 **	60	2.0	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	32.509	722.4 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2391		** Uten fukt			

Resept 3:

KJØREARK							NORCEM HEIDELBERG-CEMENT Group	
Generell informasjon								
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon					
Følgeseddelnummer	7242	Dato	23-02-2023	Kl.	Sinatur			
Reseptnummer	Noc23024-03	Reseptnavn	STD-FA B35 M45 REF					
Nøkkelparametere								
Masseforhold	0.45	Vann/pulver	0.42	Kloridinnhold (% av b)	0.09			
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	175.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.5			
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	389	Sementlimvolum (l/m ³)	305	Andel reakt. bergarter (%)	2.5			
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	389	Matriksvolum (l/m ³)	333	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	257			
Total flyveaskemengde (% av b)	18.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)				
Betongsammensetning								
Betongvolum (liter)	45		kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement								
NoC STD-FA B(V-L)	AI-2023-0001	17.500	388.9	100.0		3000	0.085	1.40
Vann								
Tilsatt vann		6.811	173.1 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsstoffer				% av b	Tørrestoff (%)			
Mapei SX-23	2020	0.114	2.53	0.65	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag				Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115	2022-01-31	49.813	1085.3 **	60	2.0	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160	2018-04-12	32.679	726.2 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m ³):			2376			** Uten fukt		

Resept 4:

Generell informasjon								
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon					
Følgeseddelnummer	7254	Dato	27-02-2023	Kl.	Sinatur			
Reseptnummer	Noc23024-04	Reseptnavn	STD-FA B30 M60 REF					
Nøkkelparametere								
Masseforhold	0.53	Vann/pulver	0.49	Kloridinnhold (% av b)	0.09			
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	180.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	4.8			
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	340	Sementlimvolum (l/m ³)	293	Andel reakt. bergarter (%)	2.5			
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	340	Matriksvolum (l/m ³)	322	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	228			
Total flyveaskemengde (% av b)	18.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)				
Betongsammensetning								
Betongvolum (liter)	45		kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement								
NoC STD-FA B(V-L)	AI-2023-0001	15.283	339.6	100.0		3000	0.085	1.40
Vann								
Tilsatt vann		6.893	178.6 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsstoffer				% av b	Tørrestoff (%)			
Mapei SX-23	2020	0.084	1.87	0.55	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag				Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115	2022-01-31	50.814	1103.8 **	60	2.3	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160	2018-04-12	33.238	738.6 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m ³):			2362			** Uten fukt		

Resept 5:

Generell informasjon								
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon					
Følgeseddelnummer	7271	Dato	01-03-2023	Kl.		Sinatur		
Reseptnummer	Noc23024-05	Reseptnavn	STD-FA B30 M90 REF 0.62					
Nøkkelparametere								
Masseforhold	0.62	Vann/pulver	0.56	Kloridinnhold (% av b)	0.09			
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	185.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	4.2			
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	298	Sementlimvolum (l/m ³)	284	Andel reakt. bergarter (%)	2.5			
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	298	Mabriksvolum (l/m ³)	314	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	203			
Total flyeaskemengde (% av b)	18.0	Silikamenqde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)				
Betongsammensetning								
Betongvolum (liter)	45				Densitet	Klorider	Alkalier	
Sement		kg/m ³	% av b					
NoC STD-FA B(V-L) AI-2022-0005	13.427	298.4	100.0		3000	0.085	1.40	
Vann								
Tilsatt vann	7.021	184.0 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff			
Tilsetningstoffer			% av b	Tørstoff (%)				
Mapei SX-23 2020	0.060	1.34	0.45	23.0	1050	0.050	2.00	
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)				
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	51.569	1118.0 **	60	2.5	2680	0.000	0.00	
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	33.666	748.1 **	40	0.0	2690	0.000	0.00	
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2350						** Uten fukt

Resept 6:

Generell informasjon								
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon					
Følgeseddelnummer	7291	Dato	03-03-2023	Kl.		Sinatur		
Reseptnummer	Noc23024-06	Reseptnavn	IND B45 M40 REF					
Nøkkelparametere								
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.38	Kloridinnhold (% av b)	0.09			
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	190.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	6.3			
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	475	Sementlimvolum (l/m ³)	342	Andel reakt. bergarter (%)	2.5			
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	475	Mabriksvolum (l/m ³)	369	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	376			
Total flyeaskemengde (% av b)	0.0	Silikamenqde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)				
Betongsammensetning								
Betongvolum (liter)	45				Densitet	Klorider	Alkalier	
Sement		kg/m ³	% av b					
NoC IND B CL-2023-0001	21.375	475.0	100.0		3130	0.085	1.30	
Vann								
Tilsatt vann	7.265	187.1 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff			
Tilsetningstoffer			% av b	Tørstoff (%)				
Mapei SX-23 2020	0.171	3.80	0.80	23.0	1050	0.050	2.00	
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)				
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	47.286	1025.2 **	60	2.5	2680	0.000	0.00	
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	30.870	686.0 **	40	0.0	2690	0.000	0.00	
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2377						** Uten fukt

Resept 7:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7300	Dato	06-03-2023	Kl.		Sinatur	
Reseptnummer	Noc23024-07	Reseptnavn	STD-FA B30 M90 STD-FA 35%FA 0.62				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.62	Vann/pulver	0.56	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	185.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	4.6		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	298	Sementimvolum (l/m ³)	291	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	298	Matriksvolum (l/m ³)	320	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	165		
Total flygeaskemengde (% av b)	35.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b	Densitet	Klorider	Alkalier	
Sement							
NoC STD-FA B(V-L) AI-2022-0005	10.644	236.5	79.3	3000	0.085	1.40	
Vann							
Tilsatt vann	7.242	184.2 *		* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff			
Tilsetningsmaterier			% av b	k-verdi			
Flygeaske LN-2022-0024 Ink 87/22	2.784	61.9	20.7	1.0	2300	0.100	2.00
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørstoff (%)			
Mapei SX-23 2020	0.047	1.04	0.35	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	50.908	1108.0 **	60	2.1	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	33.365	741.4 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2333					** Uten fukt

Resept 8:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7316	Dato	08-03-2023	Kl.		Sinatur	
Reseptnummer	Noc23024-08	Reseptnavn	STD-FA B30 M90 STD-FA 35%FA 11%silika 0.62				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.62	Vann/pulver	0.57	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	185.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	4.6		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	298	Sementimvolum (l/m ³)	295	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	298	Matriksvolum (l/m ³)	324	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	141		
Total flygeaskemengde (% av b)	35.0	Silikamengde (% av b)	11.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b	Densitet	Klorider	Alkalier	
Sement							
NoC STD-FA B(V-L) AI-2022-0005	8.842	196.5	65.8	3000	0.085	1.40	
Vann							
Tilsatt vann	7.218	183.5 *		* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff			
Tilsetningsmaterier			% av b	k-verdi			
Flygeaske LN-2022-0024 Ink 87/22	3.108	69.1	23.1	1.0	2300	0.100	2.00
Silika 2016	1.477	32.8	11.0	1.0	2200	0.125	1.22
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørstoff (%)			
Mapei SX-23 2020	0.087	1.94	0.65	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	50.548	1100.2 **	60	2.1	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	33.129	736.2 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2320					** Uten fukt

Resept 9:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7335	Dato	10-03-2023	Kl.		Sinatur	
Reseptnummer	Noc23024-09	Reseptnavn	STD-FA B45 M40 STD-FA 35%FA				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.37	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	148.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.7		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	370	Sementimvolum (l/m ³)	279	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	370	Matriksvolum (l/m ³)	309	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	200		
Total flygeaskemengde (% av b)	35.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement							
NoC STD-FA B(V-L) AI-2022-0005	13.198	293.3	79.3		3000	0.085	1.40
Vann							
Tilsatt vann	5.392	145.7 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsmaterier			% av b	k-verdi			
Flygeaske LN-2022-0024 Ink 87/22	3.452	76.7	20.7	1.0	2300	0.100	2.00
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørstoff (%)			
Mapei SX-23 2020	0.133	2.96	0.80	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	51.843	1126.2 **	60	2.3	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	33.911	753.6 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2398					** Uten fukt

Resept 10:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7344	Dato	13-03-2023	Kl.		Sinatur	
Reseptnummer	Noc23024-10	Reseptnavn	STD-FA B45 M40 STD-FA 25%FA				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.37	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	162.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.9		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	405	Sementimvolum (l/m ³)	301	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	405	Matriksvolum (l/m ³)	329	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	246		
Total flygeaskemengde (% av b)	25.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement							
NoC STD-FA B(V-L) AI-2023-0001	16.669	370.4	91.5		3000	0.085	1.40
Vann							
Tilsatt vann	6.048	159.5 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsmaterier			% av b	k-verdi			
Flygeaske LN-2021-0005	1.556	34.6	8.5	1.0	2300	0.100	2.00
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørstoff (%)			
Mapei SX-23 2020	0.146	3.24	0.80	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	50.255	1091.7 **	60	2.3	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	32.872	730.5 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2390					** Uten fukt

Resept 11:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7360	Dato	15-03-2023	Kl.		Sinatur	
Reseptnummer	Noc23024-11	Reseptnavn	STD-FA B30 M60 STD-FA 35%FA				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.53	Vann/pulver	0.43	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	175.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.8		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	330	Sementimvolum (l/m ³)	309	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	377	Matriksvolum (l/m ³)	337	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	202		
Total flygeaskemengde (% av b)	35.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement							
NoC STD-FA B(V-L)	AI-2023-0001	13.451	298.9	79.3	3000	0.085	1.40
Vann							
Tilsatt vann	6.693	173.5 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsmaterier			% av b	k-verdi			
Flygeaske	LN-2021-0005	3.518	78.2	20.7	0.4	2300	0.100
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørrestoff (%)			
Mapei SX-23	2020	0.085	1.89	0.50	23.0	1050	0.050
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115	2022-01-31	49.672	1079.0 **	60	2.3	2680	0.000
NoS Årdal 8/16 160	2018-04-12	32.491	722.0 **	40	0.0	2690	0.000
Prop. betongdens. (kg/m ³):			2354				** Uten fukt

Resept 12:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7376	Dato	17-03-2023	Kl.		Sinatur	
Reseptnummer	Noc23024-12	Reseptnavn	STD-FA B45 M40 STD-FA 25%FA 4%silika				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.39	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	162.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.7		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	405	Sementimvolum (l/m ³)	297	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	389	Matriksvolum (l/m ³)	326	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	226		
Total flygeaskemengde (% av b)	25.0	Silikamengde (% av b)	4.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement							
NoC STD-FA B(V-L)	AI-2022-0005	15.172	337.2	86.6	3000	0.085	1.40
Vann							
Tilsatt vann	5.935	159.3 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsmaterier			% av b	k-verdi			
Flygeaske	LN-2021-0005	1.651	36.7	9.4	1.0	2300	0.100
Silika	2016	0.701	15.6	4.0	2.0	2200	0.125
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørrestoff (%)			
Mapei SX-23	2020	0.158	3.50	0.90	23.0	1050	0.050
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115	2022-01-31	50.579	1096.6 **	60	2.5	2680	0.000
NoS Årdal 8/16 160	2018-04-12	33.020	733.8 **	40	0.0	2690	0.000
Prop. betongdens. (kg/m ³):			2383				** Uten fukt

Resept 13:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7411	Dato	22-03-2023	Kl.		Sinatur	
Reseptnummer	Noc23024-13	Reseptnavn	STD-FA B45 M40 STD-FA 25%FA 8%silika				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.40	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	162.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.5		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	405	Sementimvolum (l/m ³)	295	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	375	Matriksvolum (l/m ³)	324	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	207		
Total flygeaskemengde (% av b)	25.0	Silikamengde (% av b)	8.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement							
NoC STD-FA B(V-L)	AI-2023-0001	13.789	306.4	81.7	3000	0.085	1.40
Vann							
Tilsatt vann	6.113	159.0 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsmaterialeer			% av b	k-verdi			
Flygeaske	LN-2021-0005	1.736	38.6	10.3	1.0	2300	0.100
Silika	2016	1.350	30.0	8.0	2.0	2200	0.125
Tilsetningstoffer			% av b	Tørstoff (%)			
Mapei SX-23	2020	0.177	3.94	1.05	23.0	1050	0.050
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115	2022-01-31	50.588	1101.0 **	60	2.1	2680	0.000
NoS Årdal 8/16 160	2018-04-12	33.155	736.8 **	40	0.0	2690	0.000
Prop. betongdens. (kg/m ³):			2376				** Uten fukt

Resept 14:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7428	Dato	24-03-2023	Kl.		Sinatur	
Reseptnummer	Noc23024-14	Reseptnavn	STD-FA B45 M40 STD-FA 25%FA 11%silika				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.41	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	162.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.4		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	405	Sementimvolum (l/m ³)	293	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	365	Matriksvolum (l/m ³)	322	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	194		
Total flygeaskemengde (% av b)	25.0	Silikamengde (% av b)	11.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement							
NoC STD-FA B(V-L)	AI-2023-0001	12.815	284.8	78.1	3000	0.085	1.40
Vann							
Tilsatt vann	6.095	158.6 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsmaterialeer			% av b	k-verdi			
Flygeaske	LN-2021-0005	1.798	40.0	11.0	1.0	2300	0.100
Silika	2016	1.806	40.1	11.0	2.0	2200	0.125
Tilsetningstoffer			% av b	Tørstoff (%)			
Mapei SX-23	2020	0.197	4.38	1.20	23.0	1050	0.050
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115	2022-01-31	50.730	1104.2 **	60	2.1	2680	0.000
NoS Årdal 8/16 160	2018-04-12	33.248	738.8 **	40	0.0	2690	0.000
Prop. betongdens. (kg/m ³):			2371				** Uten fukt

Resept 15:

Generell informasjon								
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon					
Følgeseddelnummer	7455	Dato	29-03-2023	Kl.		Sinatur		
Reseptnummer	Noc23024-15	Reseptnavn	ANL-FA B45 M40 REF					
Nøkkelparametere								
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.37	Kloridinnhold (% av b)	0.09			
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	160.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	2.1			
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	400	Sementimvolum (l/m ³)	292	Andel reakt. bergarter (%)	2.5			
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	400	Matriksvolum (l/m ³)	322	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	22			
Total flygeaskemengde (% av b)	15.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)				
Betongsammensetning								
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier	
Sement								
NoC ANL-FA TF-2023-0001	18.000	400.0	100.0		3020	0.085	0.50	
Vann								
Tilsatt vann	5.846	157.5 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff			
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørrestoff (%)				
Mapei SX-23 2020	0.144	3.20	0.80	23.0	1050	0.050	2.00	
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)				
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	50.952	1104.6 **	60	2.5	2680	0.000	0.00	
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	33.263	739.2 **	40	0.0	2690	0.000	0.00	
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2405						** Uten fukt

Resept 16:

Generell informasjon								
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon					
Følgeseddelnummer	7474	Dato	31-03-2023	Kl.		Sinatur		
Reseptnummer	Noc23024-16	Reseptnavn	STD-FA B45 M40 STD-FA 30%FA					
Nøkkelparametere								
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.37	Kloridinnhold (% av b)	0.09			
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	158.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.9			
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	395	Sementimvolum (l/m ³)	296	Andel reakt. bergarter (%)	2.5			
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	395	Matriksvolum (l/m ³)	325	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	226			
Total flygeaskemengde (% av b)	30.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)				
Betongsammensetning								
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier	
Sement								
NoC STD-FA B(V-L) AI-2023-0001	15.173	337.2	85.4		3000	0.085	1.40	
Vann								
Tilsatt vann	5.763	155.6 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff			
Tilsetningsmaterier			% av b	k-verdi				
Flygeaske LN-2021-0005	2.602	57.8	14.6	1.0	2300	0.100	2.00	
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørrestoff (%)				
Mapei SX-23 2020	0.142	3.16	0.80	23.0	1050	0.050	2.00	
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)				
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	50.723	1099.7 **	60	2.5	2680	0.000	0.00	
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	33.114	735.9 **	40	0.0	2690	0.000	0.00	
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2389						** Uten fukt

Resept 17:

Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7481	Dato	03-04-2023	Kl.		Sinatur	
Reseptnummer	Noc23024-17	Reseptnavn	STD-FA B45 M40 STD-FA 35%FA				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.37	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	155.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	6.0		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	387	Sementlimvolum (l/m ³)	292	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	387	Matriksvolum (l/m ³)	321	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	208		
Total flygeaskemengde (% av b)	35.0	Silikamengde (% av b)	0.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement							
NoC STD-FA B(V-L) AI-2023-0001	13.823	307.2	79.3		3000	0.085	1.40
Vann							
Tilsatt vann	5.625	152.6 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsmaterier			% av b	k-verdi			
Flygeaske LN-2022-0021	3.615	80.3	20.7	1.0	2300	0.100	2.00
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørrestoff (%)			
Mapei SX-23 2020	0.140	3.10	0.80	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	50.963	1104.9 **	60	2.5	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	33.270	739.3 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2387					** Uten fukt

Resept 18:

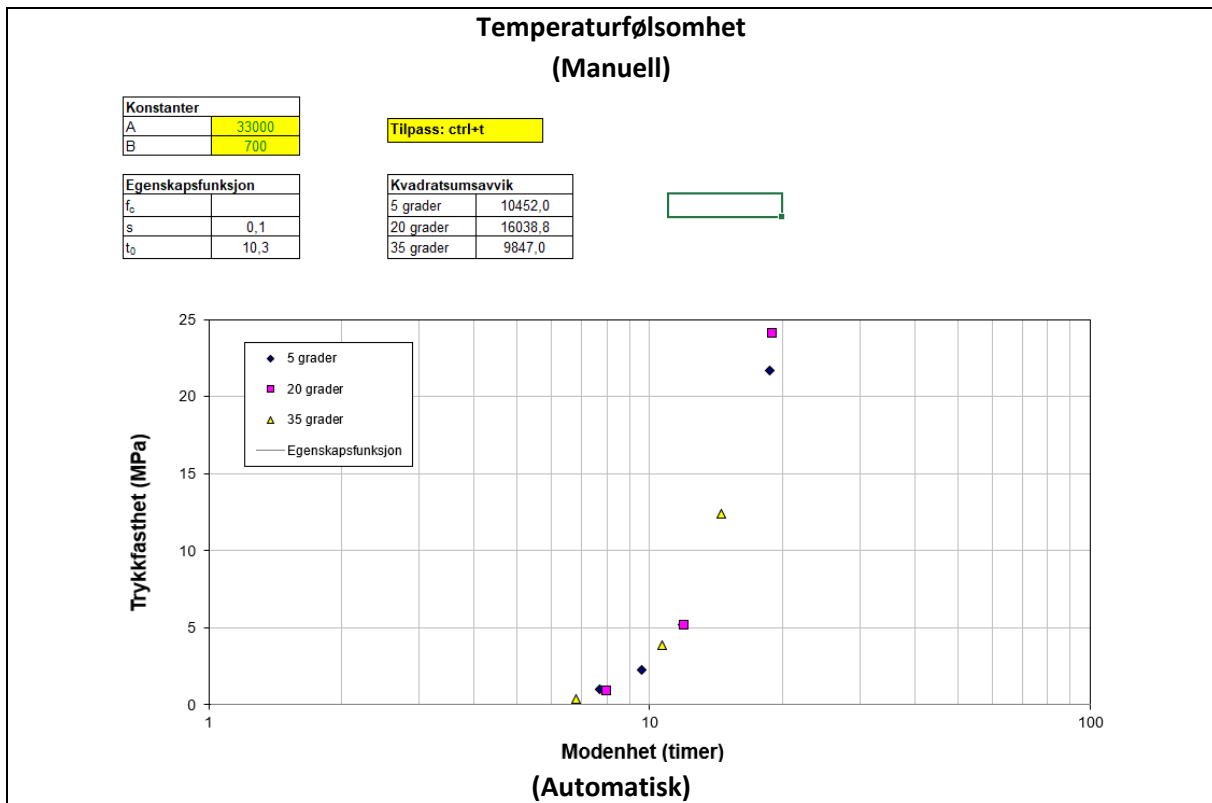
Generell informasjon							
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon				
Følgeseddelnummer	7496	Dato	05-04-2023	Kl.		Sinatur	
Reseptnummer	Noc23024-18	Reseptnavn	STD-FA B45 M40 STD-FA 35%FA 11%silika				
Nøkkelparametere							
Masseforhold	0.40	Vann/pulver	0.41	Kloridinnhold (% av b)	0.09		
Effektivt vanninnhold (l/m ³)	155.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m ³)	5.4		
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m ³)	387	Sementlimvolum (l/m ³)	284	Andel reakt. bergarter (%)	2.5		
Bindemiddelmengde (kg/m ³)	349	Matriksvolum (l/m ³)	314	Klimagasutslipp (kg CO ₂ -ekv./m ³)	162		
Total flygeaskemengde (% av b)	35.0	Silikamengde (% av b)	11.0	Total energibruk (MJ)			
Betongsammensetning							
Betongvolum (liter)	45	kg/m ³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier
Sement							
NoC STD-FA B(V-L) AI-2023-0001	10.345	229.9	65.8		3000	0.085	1.40
Vann							
Tilsatt vann	5.561	151.5 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff		
Tilsetningsmaterier			% av b	k-verdi			
Flygeaske LN-2022-0021	3.637	80.8	23.1	1.0	2300	0.100	2.00
Silika 2016	1.728	38.4	11.0	2.0	2200	0.125	1.22
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørrestoff (%)			
Mapei SX-23 2020	0.204	4.54	1.30	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)			
NoS Årdal 0/8 115 2022-01-31	51.544	1117.5 **	60	2.5	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160 2018-04-12	33.650	747.8 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m ³):		2370					** Uten fukt

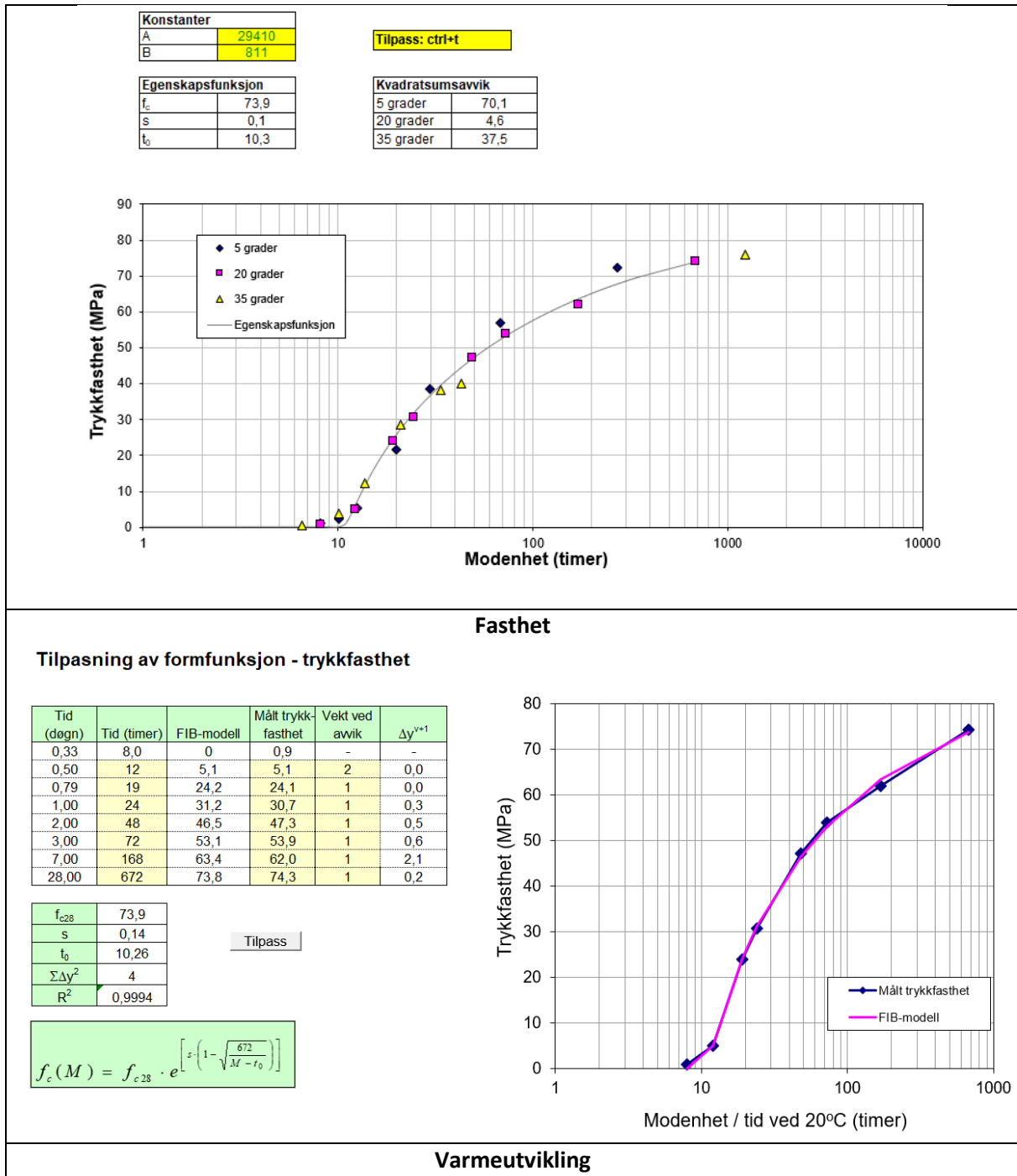
Resept 19:

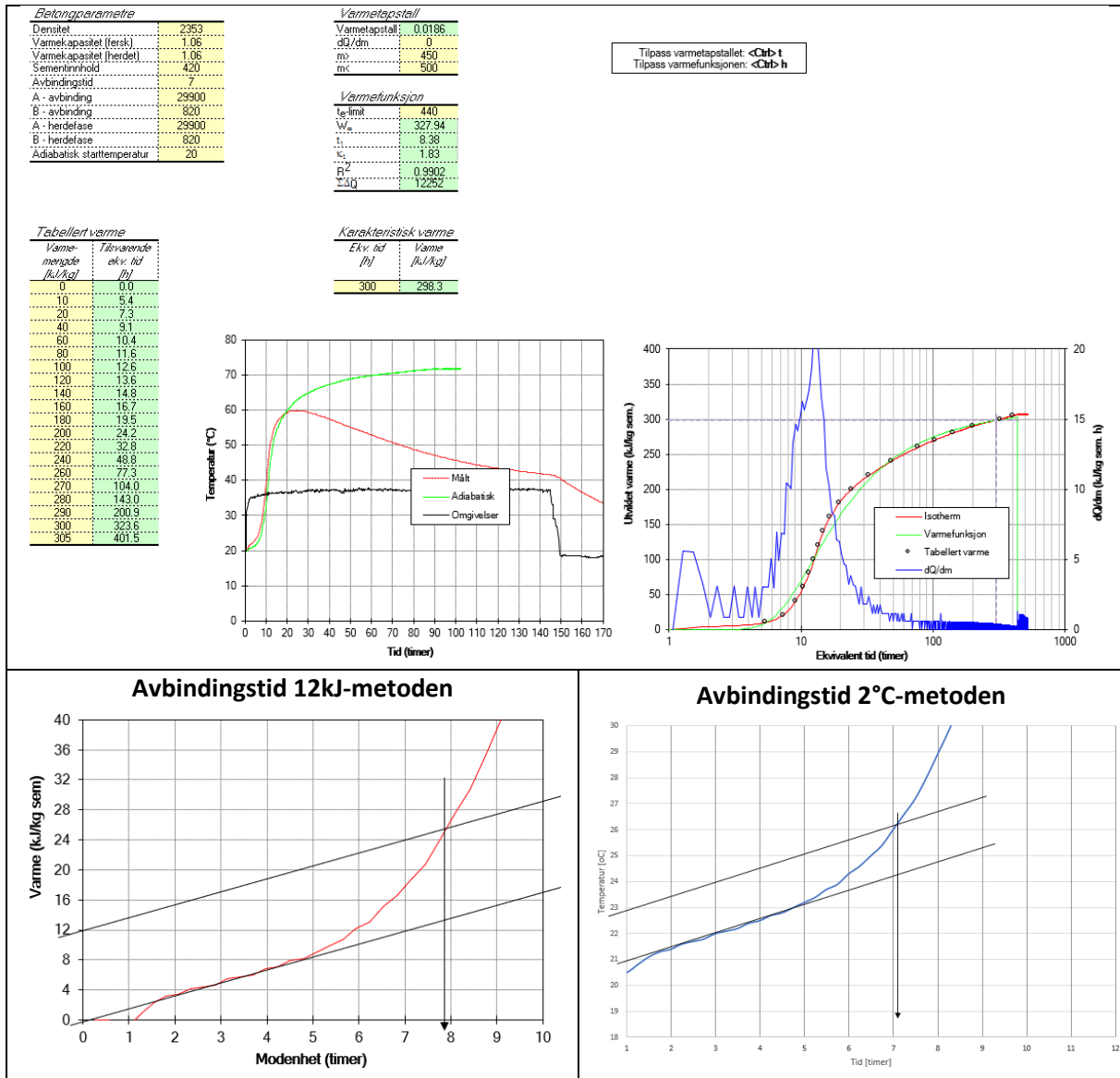
Generell informasjon								
Oppdragsnummer	2023-024	Oppdragsnavn	UIA Master 2023 - HETT 22 dokumentasjon					
Følgeseddelnummer	7498	Dato	07-04-2023	Kl.		Sinatur		
Reseptnummer	Noc23024-19	Reseptnavn	STD-FA B45 M45 STD-FA 35%FA 11%silika					
Nøkkelparametere								
Masseforhold	0.45	Vann/pulver	0.46	Kloridinnhold (% av b)	0.09			
Effektivt vanninnhold (l/m³)	170.0	Tilsiktet luftinnhold (%)	2.0	Alkalier (kg/m³)	5.2			
Effektivt bindemiddelmengde (kg/m³)	378	Sementimvolum (l/m³)	296	Andel reakt. bergarter (%)	2.5			
Bindemiddelmengde (kg/m³)	340	Mabriksvolum (l/m³)	325	Klimagasutslipp (kg CO2-ekv./m³)	158			
Total flygeaskemengde (% av b)	35.0	Silikamengde (% av b)	11.0	Total energibruk (MJ)				
Betongsammensetning								
Betongvolum (liter)	45	kg/m³	% av b		Densitet	Klorider	Alkalier	
Sement		224.1	65.9		3000	0.085	1.40	
NoC STD-FA B(V-L)	At-2023-0001	10.085						
Vann		167.6 *			* Eksklusiv evt. vann i tilsetningsstoff			
Tilsatt vann	6.209							
Tilsetningsmaterier			% av b	k-verdi				
Flygeaske	LN-2022-0021	3.545	78.8	23.2	1.0	2300	0.100	2.00
Silika	2016	1.685	37.4	11.0	2.0	2200	0.125	1.22
Tilsetningsstoffer			% av b	Tørrestoff (%)				
Mapei SX-23	2020	0.138	3.06	0.90	23.0	1050	0.050	2.00
Tilslag			Vekt-%	Eff.fukt (%)				
NoS Årdal 0/8 115	2022-01-31	50.791	1099.0 **	60	2.7	2680	0.000	0.00
NoS Årdal 8/16 160	2018-04-12	33.093	735.4 **	40	0.0	2690	0.000	0.00
Prop. betongdens. (kg/m³):		2345					** Uten fukt	

12.3 Skjermbilder fra regneark Excel arkene for hver betongtype

12.3.1 STD FA - B45 - M40 REF

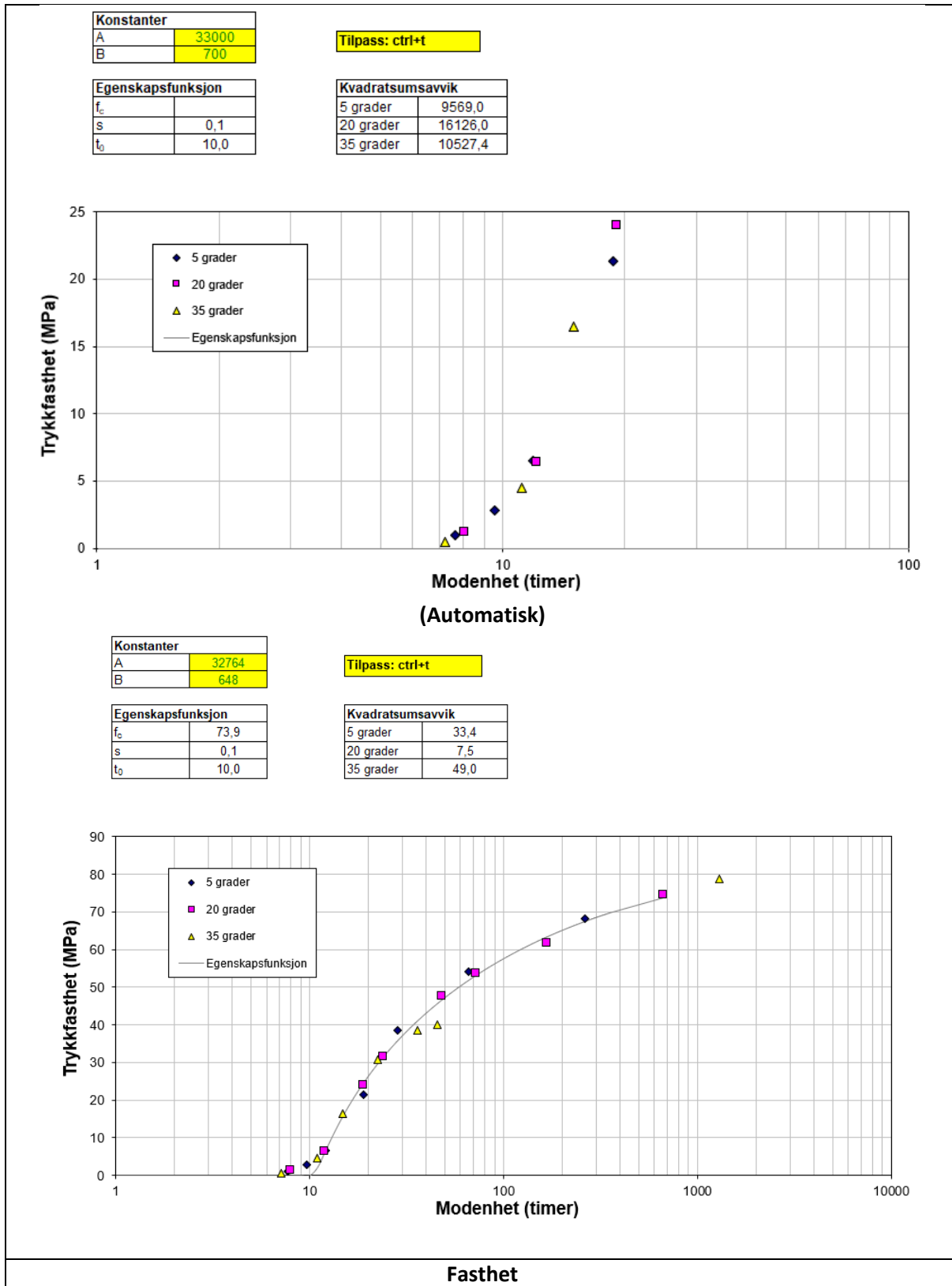






12.3.2 STD FA - B45 - M40 REF REP

Temperaturfølsomhet (Manuell)



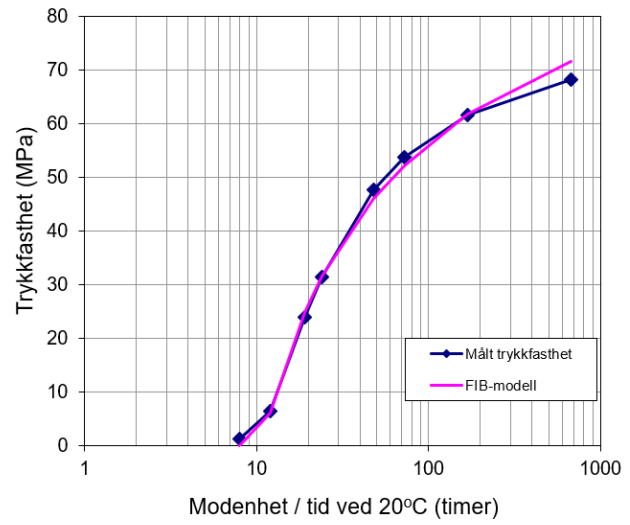
Tilpassing av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{*+1}
0,33	8,0	0	1,3	-	-
0,50	12	6,2	6,5	10	0,7
0,79	19	24,9	24,0	10	7,5
1,00	24	31,6	31,6	5	0,0
2,00	48	46,0	47,7	5	13,6
3,00	72	52,2	53,7	1	2,1
7,00	168	61,9	61,6	1	0,1
28,00	672	71,6	68,3	1	11,0

f_{c28}	71,6
s	0,14
t_0	10,10
$\Sigma \Delta y^2$	35
R^2	0,9975

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2420
Varmekapasitet (fersk)	1,03
Varmekapasitet (herdet)	1,03
Sementinnhold	420
Avbindings tid	7
A - avbinding	32764
B - avbinding	648
A - herdelase	32764
B - herdelase	648
Adiabatisk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall	0,0183
dQ/dm	0
m ₀	500
m _c	550

Varmefunksjon

t_e limit	490
W_{e0}	305,67
t_1	7,83
α_1	1,93
R^2	0,9926
$\Sigma \Delta Q$	7744

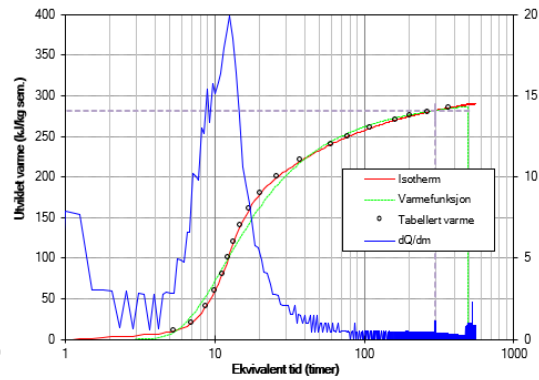
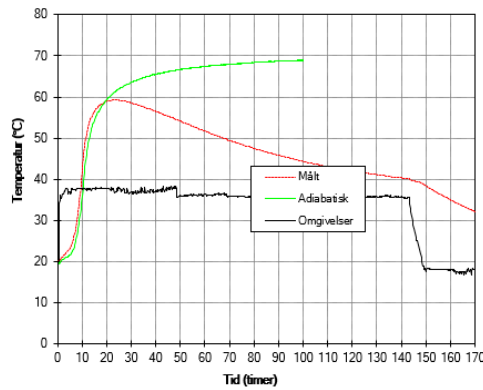
Tilpass varmetapstallet: <Ctrl>t
Tilpass varmfunksjonen: <Ctrl>h

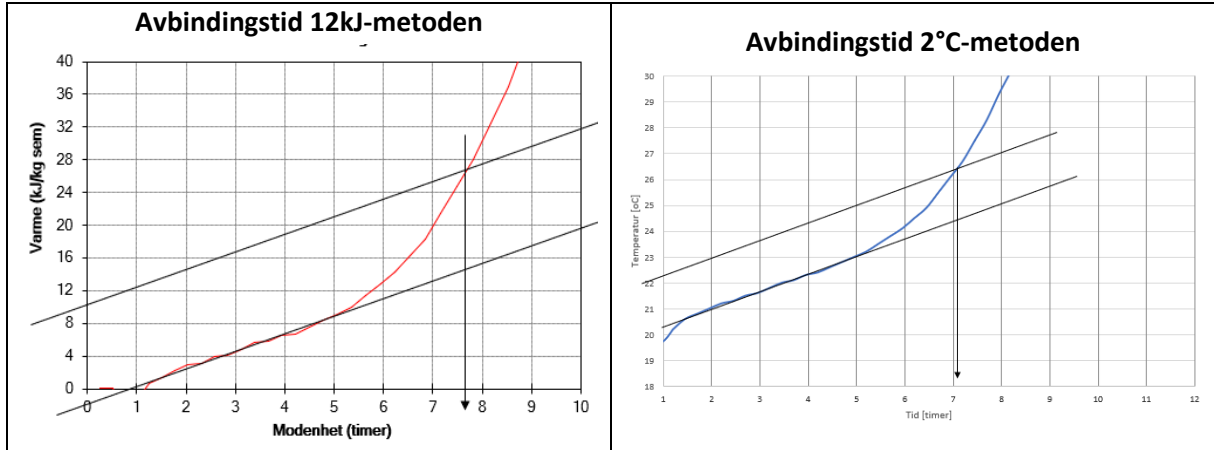
Tabellert varme

Varmemengde (kJ/kg)	Tilsvarende ekv. tid (h)
0	0,0
10	5,4
20	7,0
40	8,7
60	10,1
80	11,3
100	12,3
120	13,4
140	14,8
160	17,0
180	20,4
200	26,3
220	37,7
240	60,1
250	78,3
260	109,7
270	162,9
275	203,3
280	267,2
285	365,6

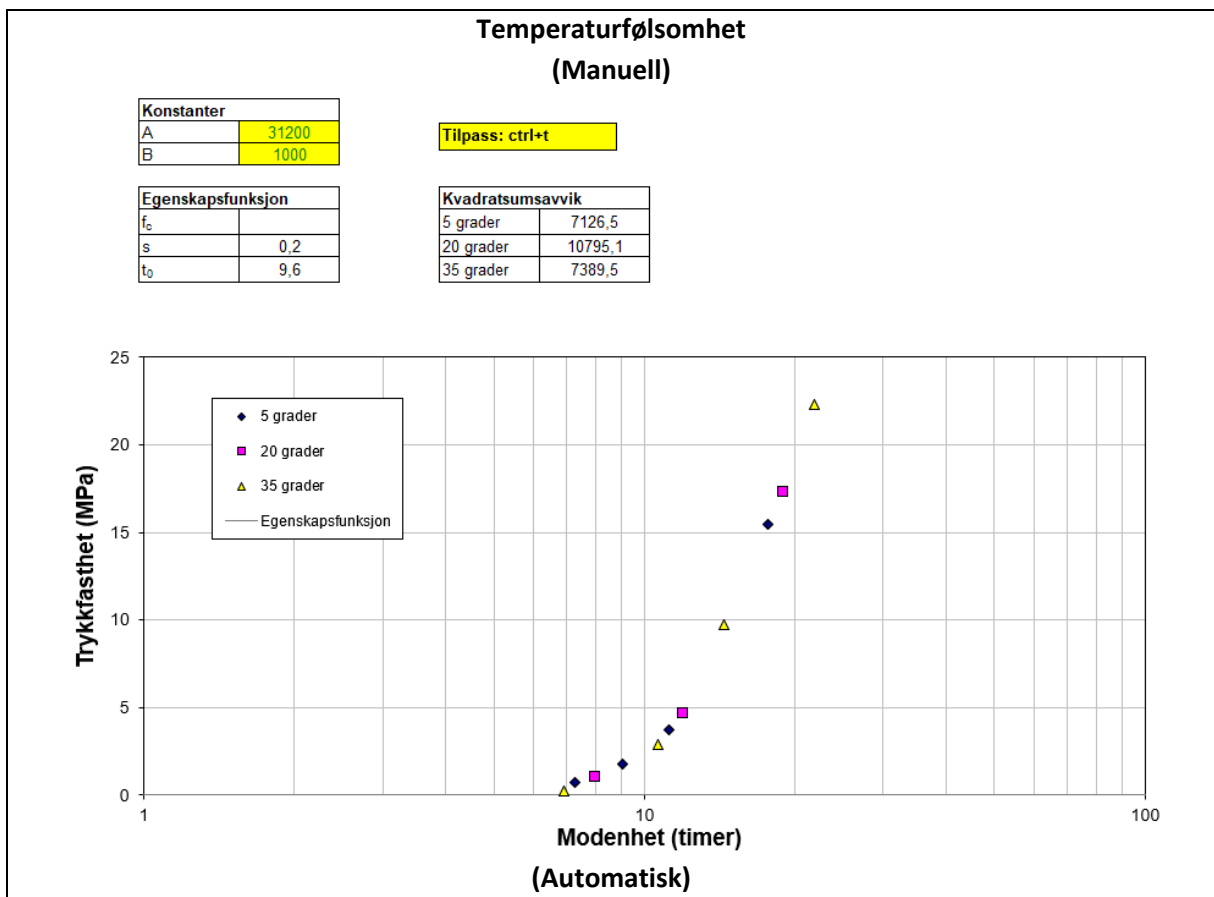
Karakteristisk varme

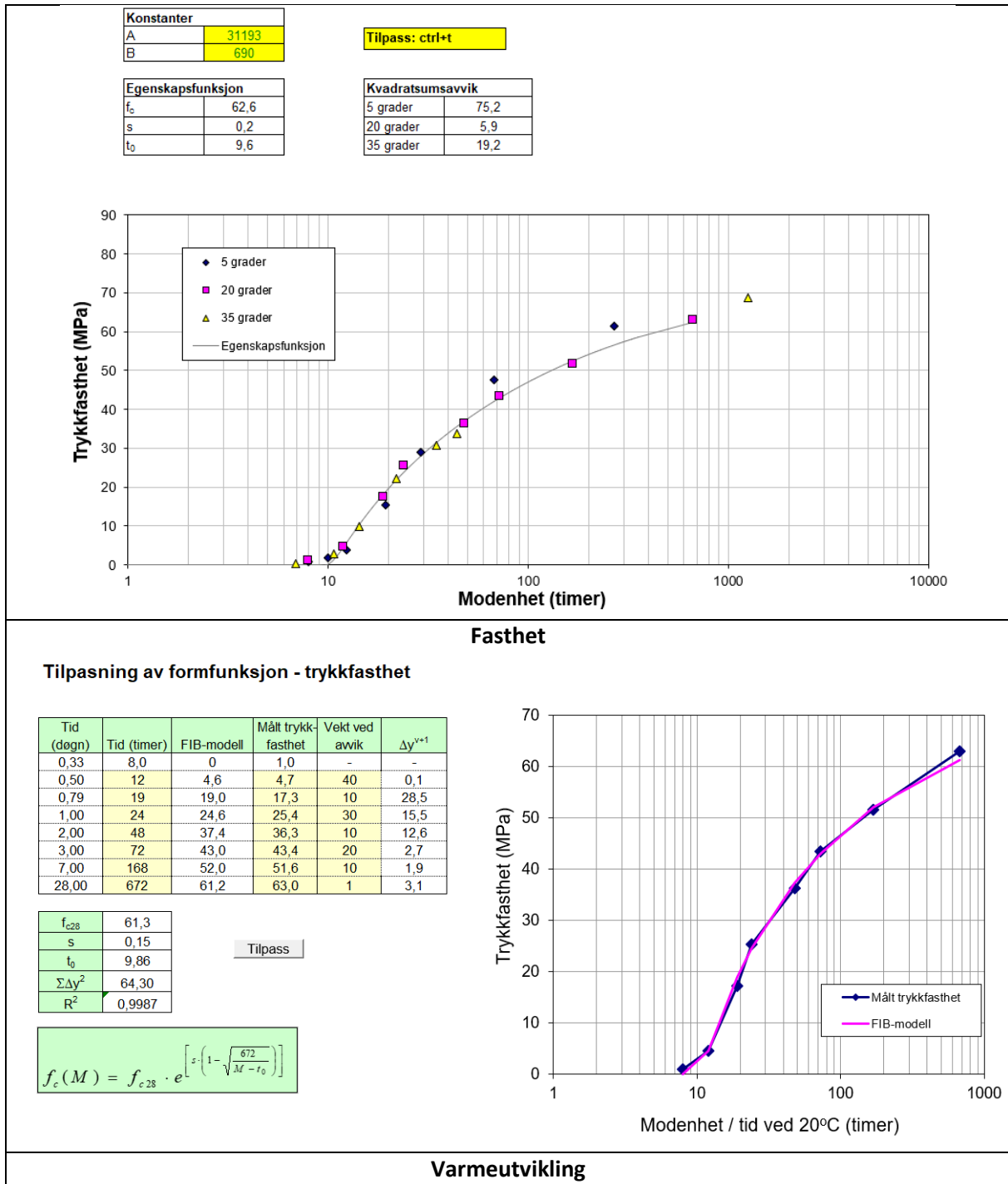
Ekv. tid (h)	Varme (kJ/kg)
300	281,9

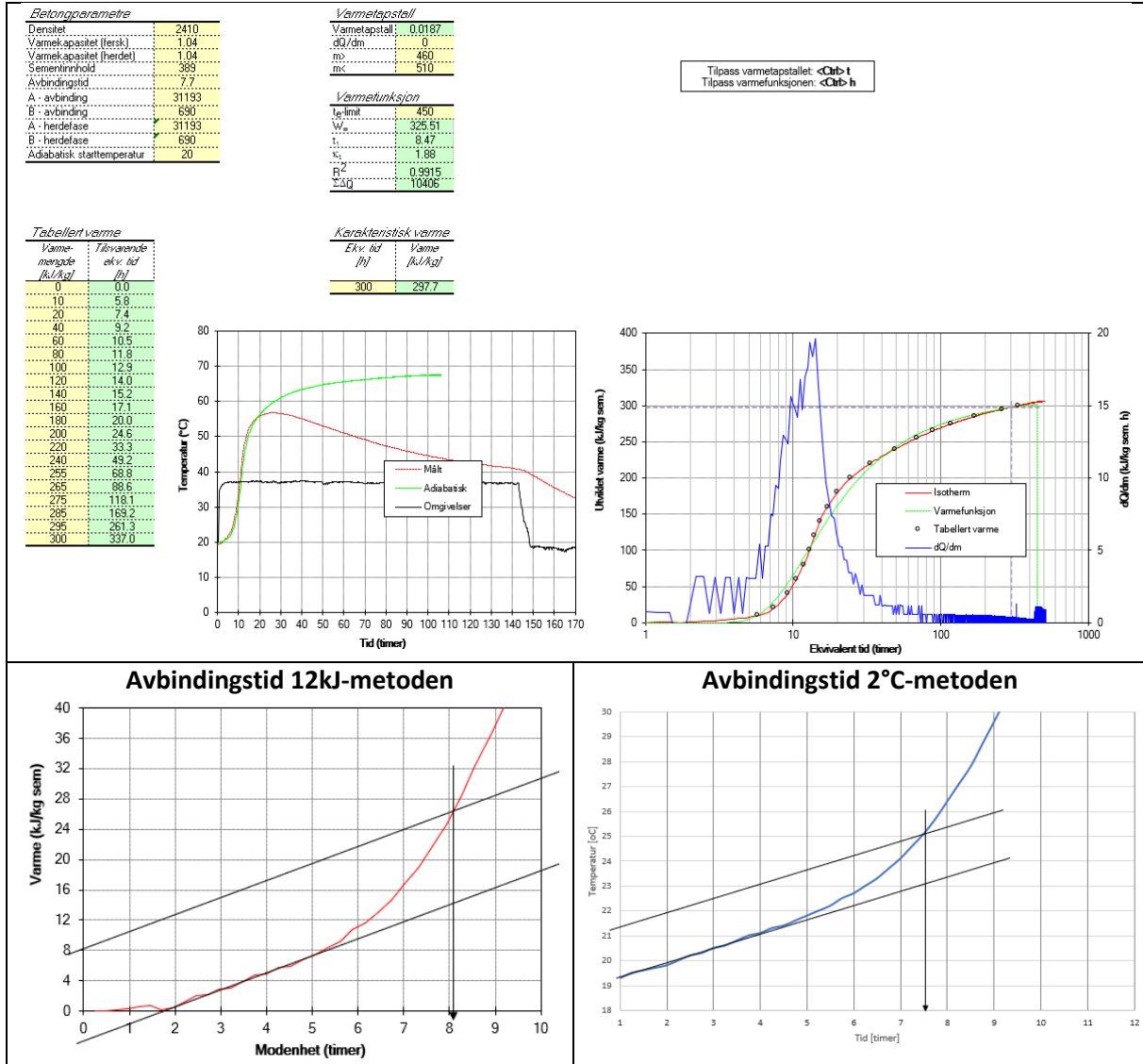




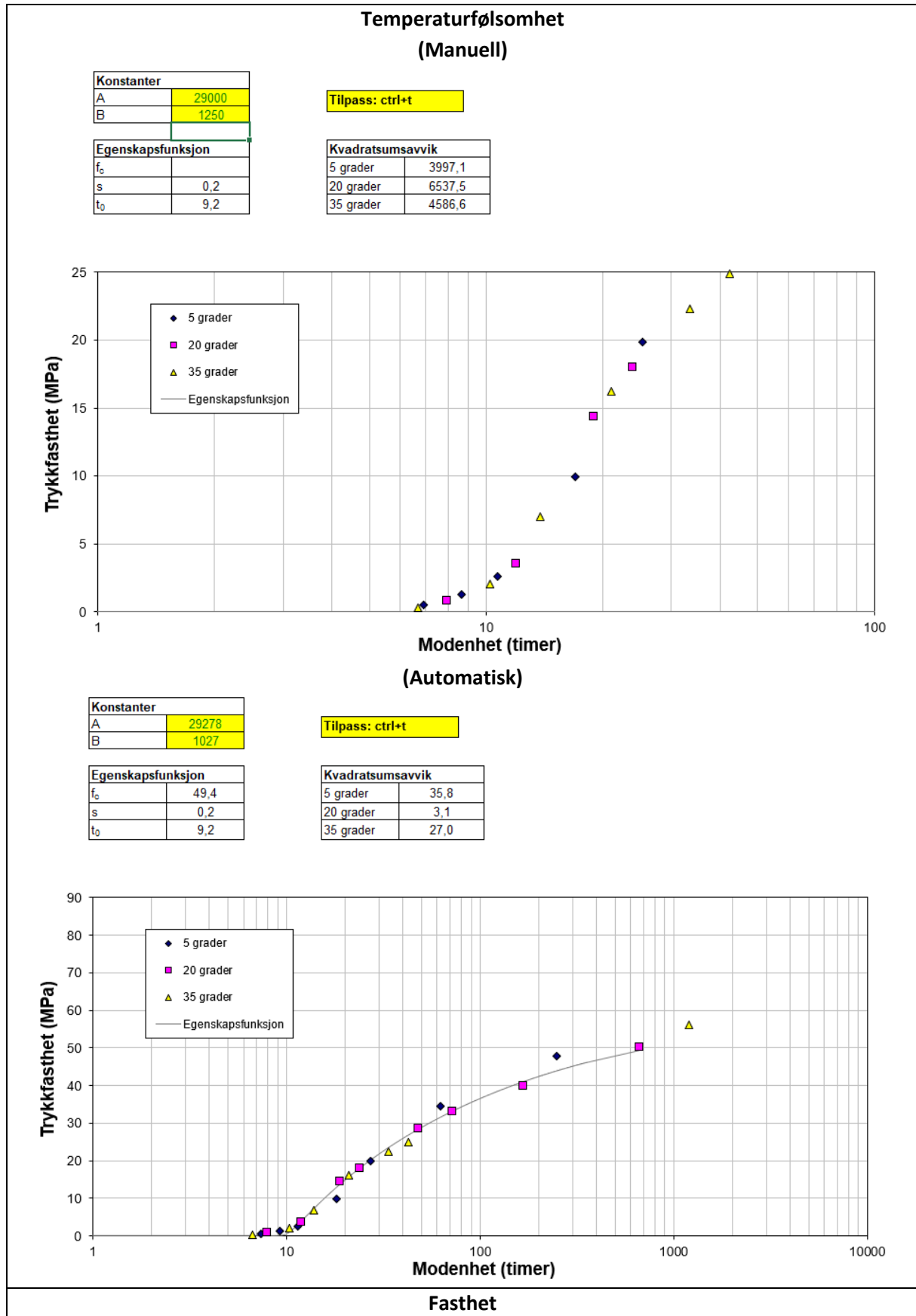
12.3.3 STD FA - B35 - M45 REF







12.3.4 STD FA - B30 - M60 REF



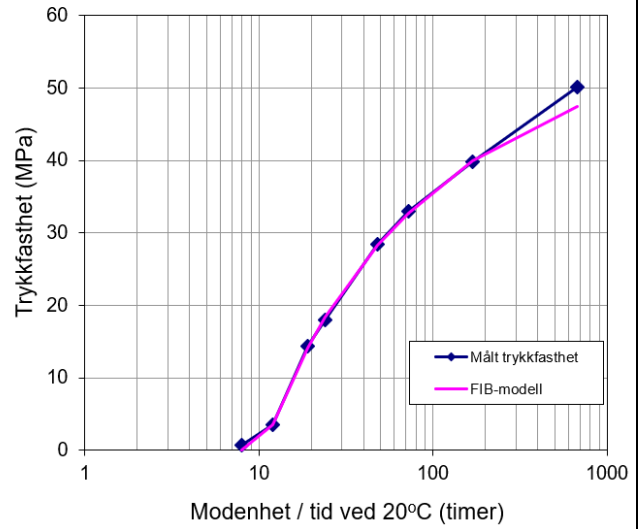
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{*+1}
0,33	8,0	0	0,8	-	-
0,50	12	3,6	3,5	10	0,1
0,79	19	14,1	14,3	10	0,5
1,00	24	18,4	18,0	1	0,1
2,00	48	28,3	28,4	1	0,0
3,00	72	32,8	33,0	1	0,0
7,00	168	40,0	39,9	30	0,5
28,00	672	47,4	50,2	1	7,3

f_{c28}	47,5
s	0,16
t_0	9,65
$\Sigma \Delta y^2$	9
R ²	0,9986

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2403
Varmekapasitet (terek)	1,04
Varmekapasitet (herdet)	340
Sementinnhold	7,4
Avbindingstid	29278
A - avbinding	1027
B - avbinding	29278
A - herdelase	1027
B - herdelase	29278
Adababisk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall	0,0199
d _u /dm	0,02
m _u	260
m _c	330

Varmefunksjon

t _e -limit	270
W _u	340,02
t ₁	8,59
k _c	1,92
R ²	0,9946
ΣΔQ	7693

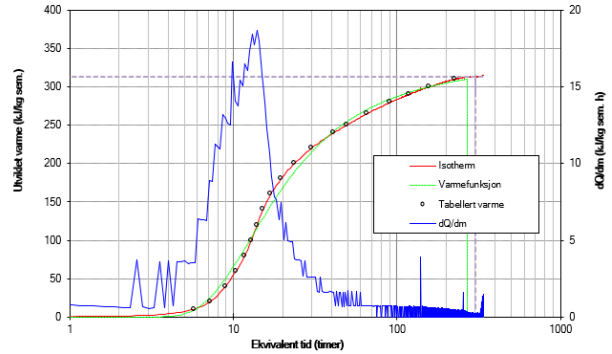
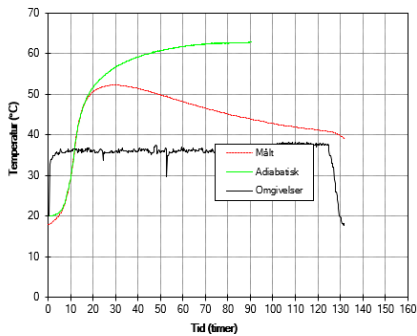
Tilpass varmetapstallet: <Cb>-t
Tilpass varmfunksjonen: <Cb>-h

Tabellert varme

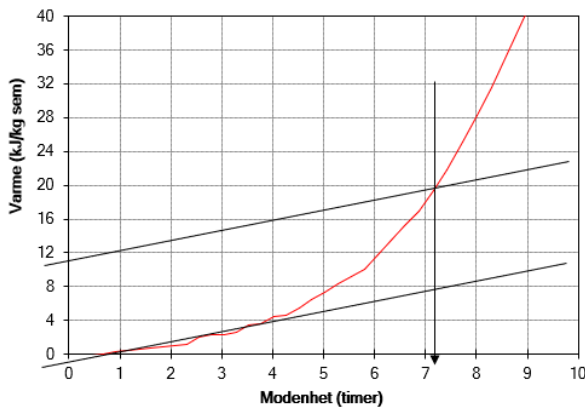
Varme-mengde (kJ/kg)	Tilsvarende ekv. tid (h)
0	0,1
10	5,8
20	7,2
40	9,0
60	10,4
80	11,7
100	12,9
120	13,9
140	15,2
160	16,5
180	17,8
200	19,0
220	20,0
240	20,7
250	21,2
265	21,8
280	22,3
290	22,7
300	23,0
310	23,2

Karakteristisk varme

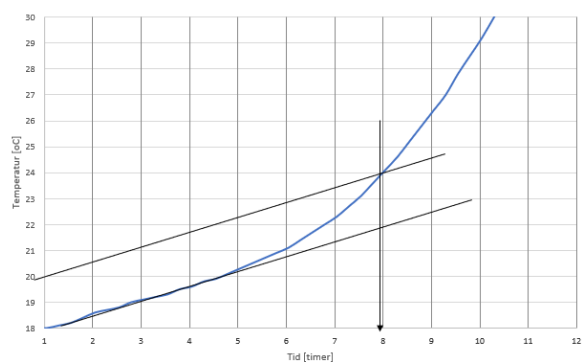
Ekv. tid (h)	Varme (kJ/kg)
300	313,5



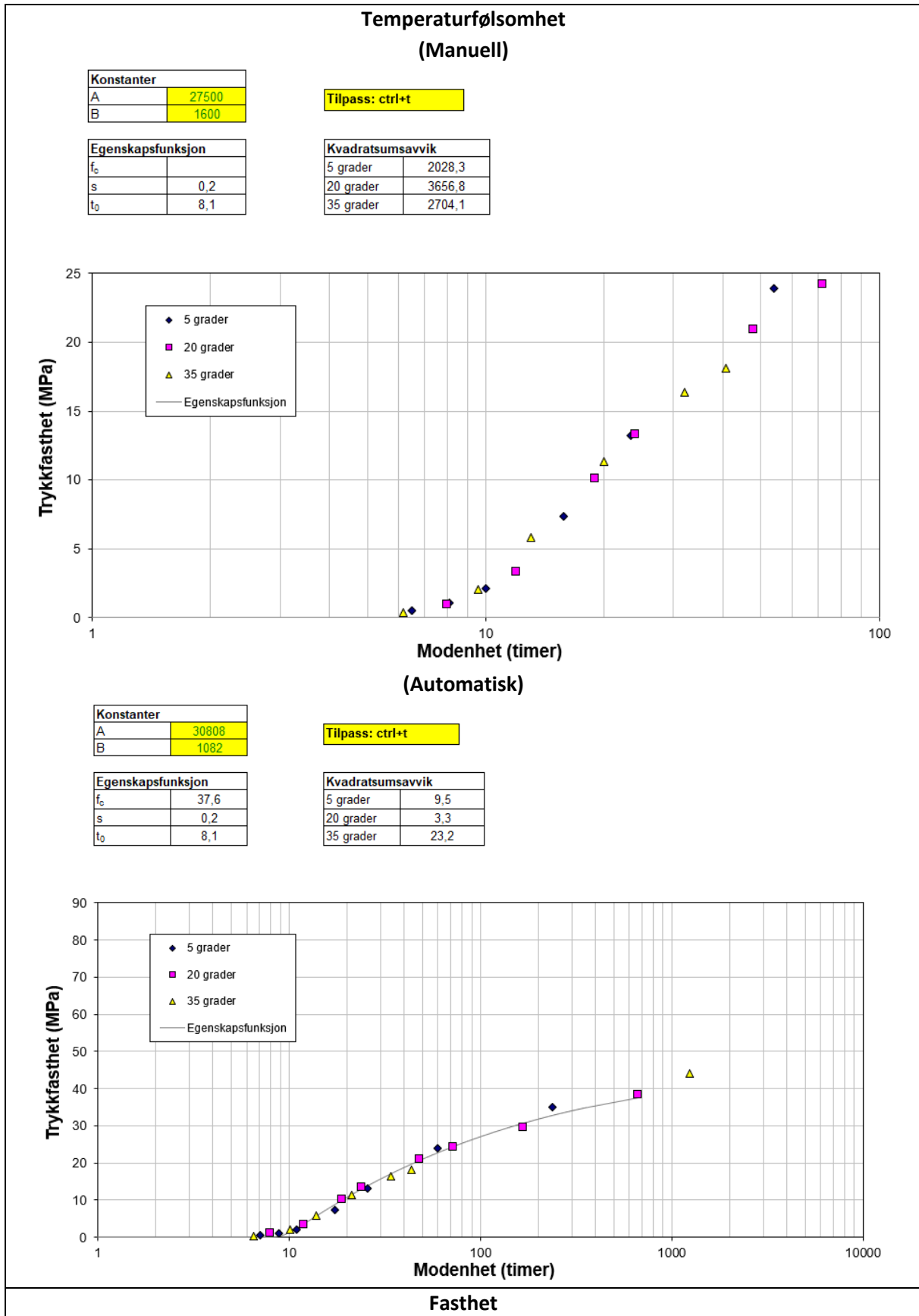
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.5 STD FA - B30 - M90 - REF



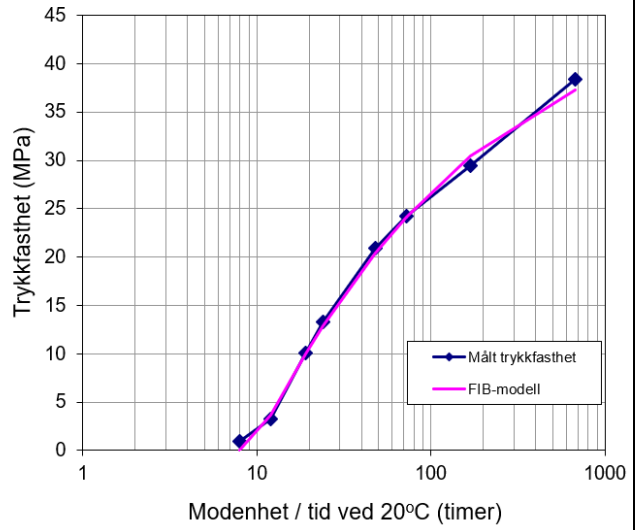
Tilpassing av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{y+1}
0,33	8,0	0	0,9	-	-
0,50	12	3,6	3,3	1	0,1
0,79	19	9,9	10,1	1	0,0
1,00	24	12,9	13,3	1	0,2
2,00	48	20,5	20,9	1	0,2
3,00	72	24,2	24,2	1	0,0
7,00	168	30,4	29,5	2	1,8
28,00	672	37,3	38,4	1	1,2

f_{c28}	37,3
s	0,19
t_0	8,07
$\Sigma \Delta y^2$	4
R^2	0,9986

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2391
Varmekapasitet (herst.)	1,05
Varmekapasitet (herdet.)	1,05
Sementinnhold	298
Avbindingstid	7,1
A - avbinding	30808
B - avbinding	1082
A - herdefase	30808
B - herdefase	1082
Adiabatsk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall:	0,0178
dQ/dm	0
m	350
mc	400

Varmefunksjon

$t_{e\text{-limit}}$	340
W_{ce}	358,25
t_1	8,48
t_2	1,74
R^2	0,9952
$\Sigma \Delta Q$	9650

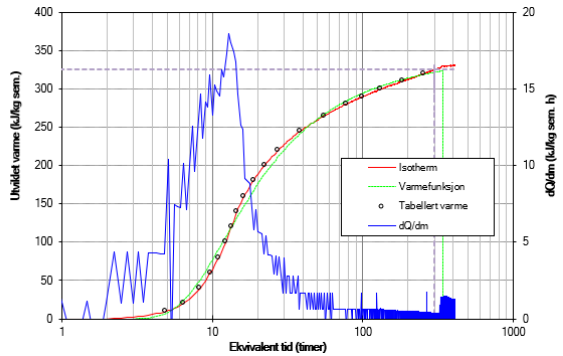
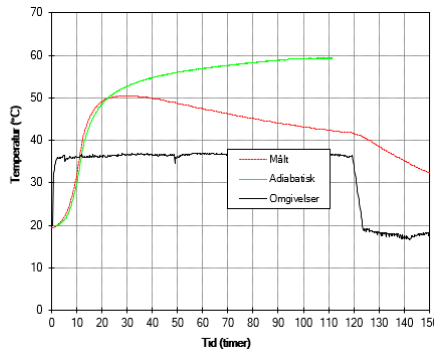
Tilpass varmetapstallet: $c_{\text{fib}} \cdot t$
Tilpass varmefunksjonen: $c_{\text{fib}} \cdot h$

Tabellert varme

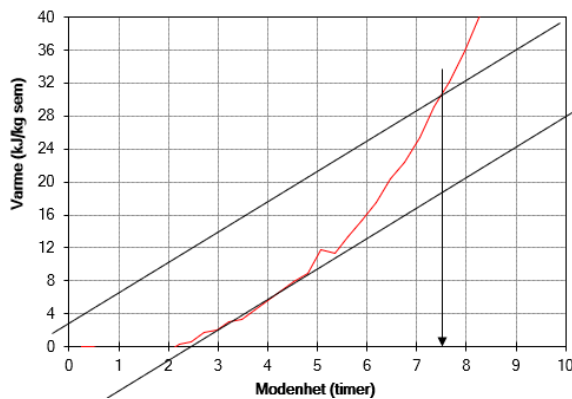
Varmemengde (kJ/kg)	Tilsvarende ekv. tid (h)
0	0,8
10	4,9
20	6,4
40	8,3
60	9,7
80	11,1
100	12,3
120	13,4
140	14,6
160	15,2
180	16,8
200	22,3
220	27,4
245	36,6
265	56,1
280	76,2
290	96,7
300	131,2
310	182,8
320	255,2

Karakteristisk varme

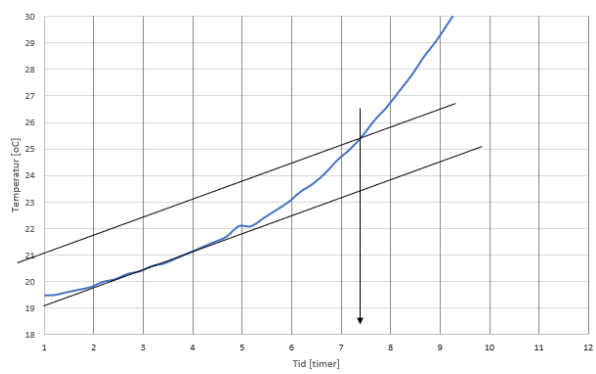
Ekv. tid (h)	Varme (kJ/kg)
300	325,2



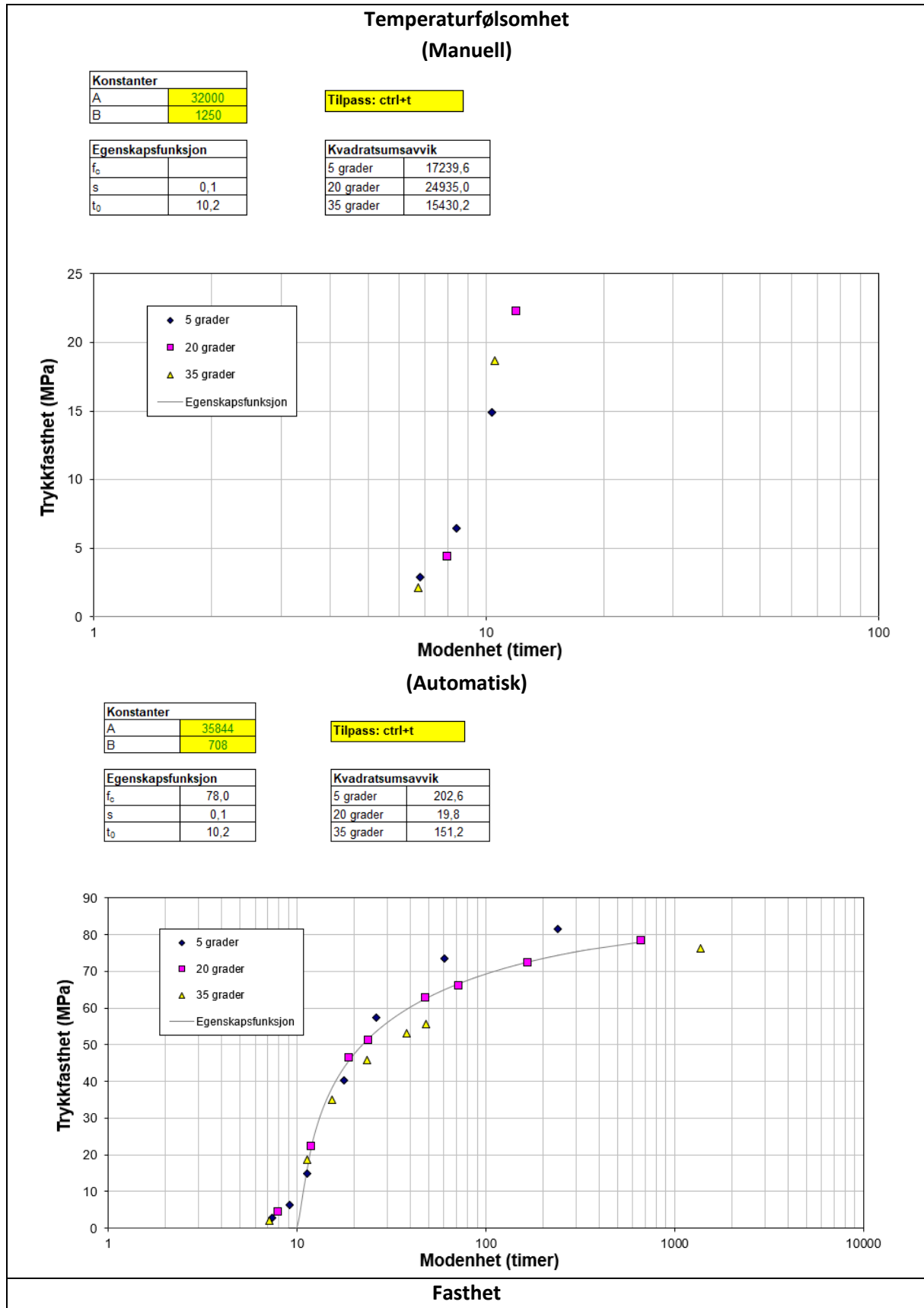
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.6 IND B45 M40 REF



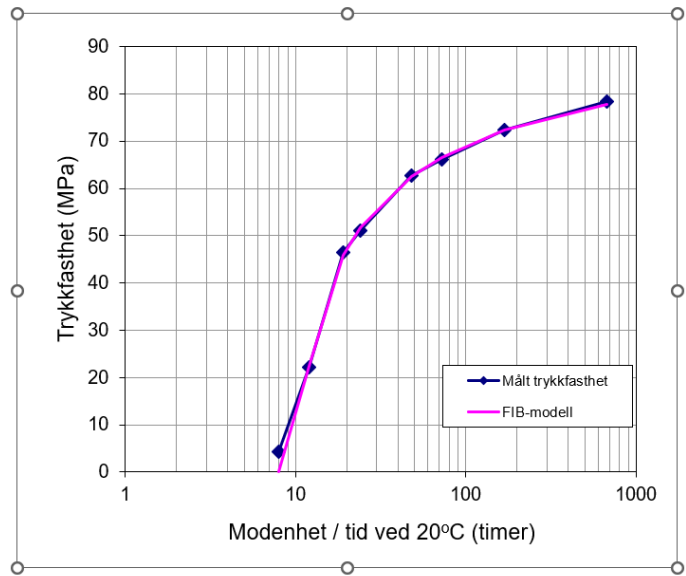
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{*+1}
0,33	8,0	0	4,3	-	-
0,50	12	22,4	22,3	2	0,0
0,79	19	45,9	46,4	5	1,2
1,00	24	51,7	51,1	4	1,5
2,00	48	62,5	62,7	1	0,1
3,00	72	66,5	66,1	1	0,2
7,00	168	72,4	72,3	1	0,0
28,00	672	77,8	78,3	1	0,3

f_{c28}	77,8
s	0,07
t_0	10,18
$\Sigma \Delta y^2$	3
R^2	0,9997

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2403
Varmekapasitet (fersk)	1,06
Varmekapasitet (herdet)	1,06
Semieritoid	475
Avbindingstid	5,6
A - avbinding	35844
B - avbinding	708
A - herdefase	35844
B - herdefase	708
Adiabatisk starttemperatur	20

Varmetapstøff

Varmetapstøff	0,0179
dQ/dm	0
m ₀	600
m _c	650

Varmefunksjon

t_0 -limit	590
W_{in}	300,60
t_1	6,56
κ_1	2,59
R^2	0,9919
$\Sigma \Delta Q$	5171

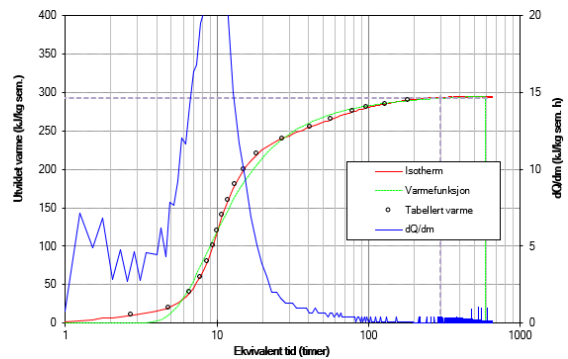
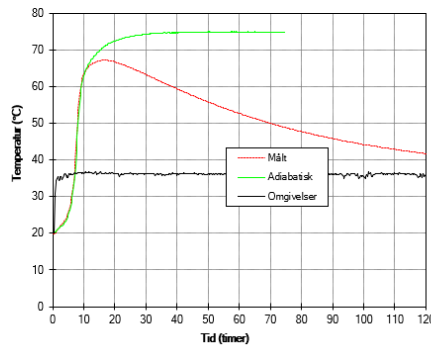
Tilpass varmetapstøffet $C_{Qb} \cdot t$
Tilpass varmfunksjonen $C_{Qb} \cdot h$

Tabellert varme

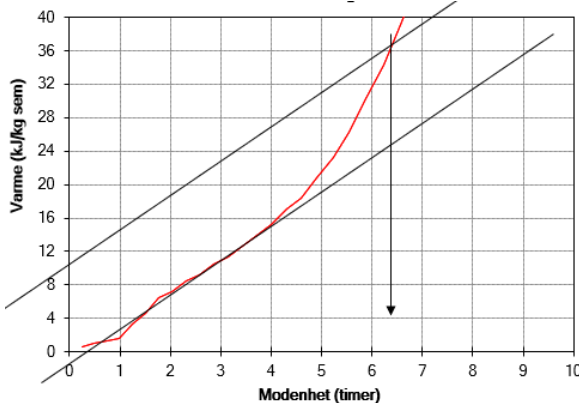
Varmemengde (kJ/kg)	Tilsvarende ekv. tid (h)
0	0,0
10	2,7
20	4,8
40	6,6
60	7,8
80	8,7
100	9,5
120	10,1
140	10,8
160	11,8
180	13,2
200	15,2
220	18,5
240	27,1
255	41,7
265	56,6
275	75,0
285	97,5
295	124,7
290	182,3

Karakteristisk varme

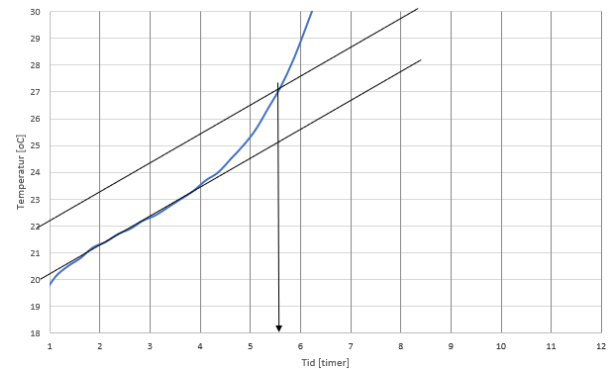
Ekv. tid (h)	Varme (kJ/kg)
300	293,1



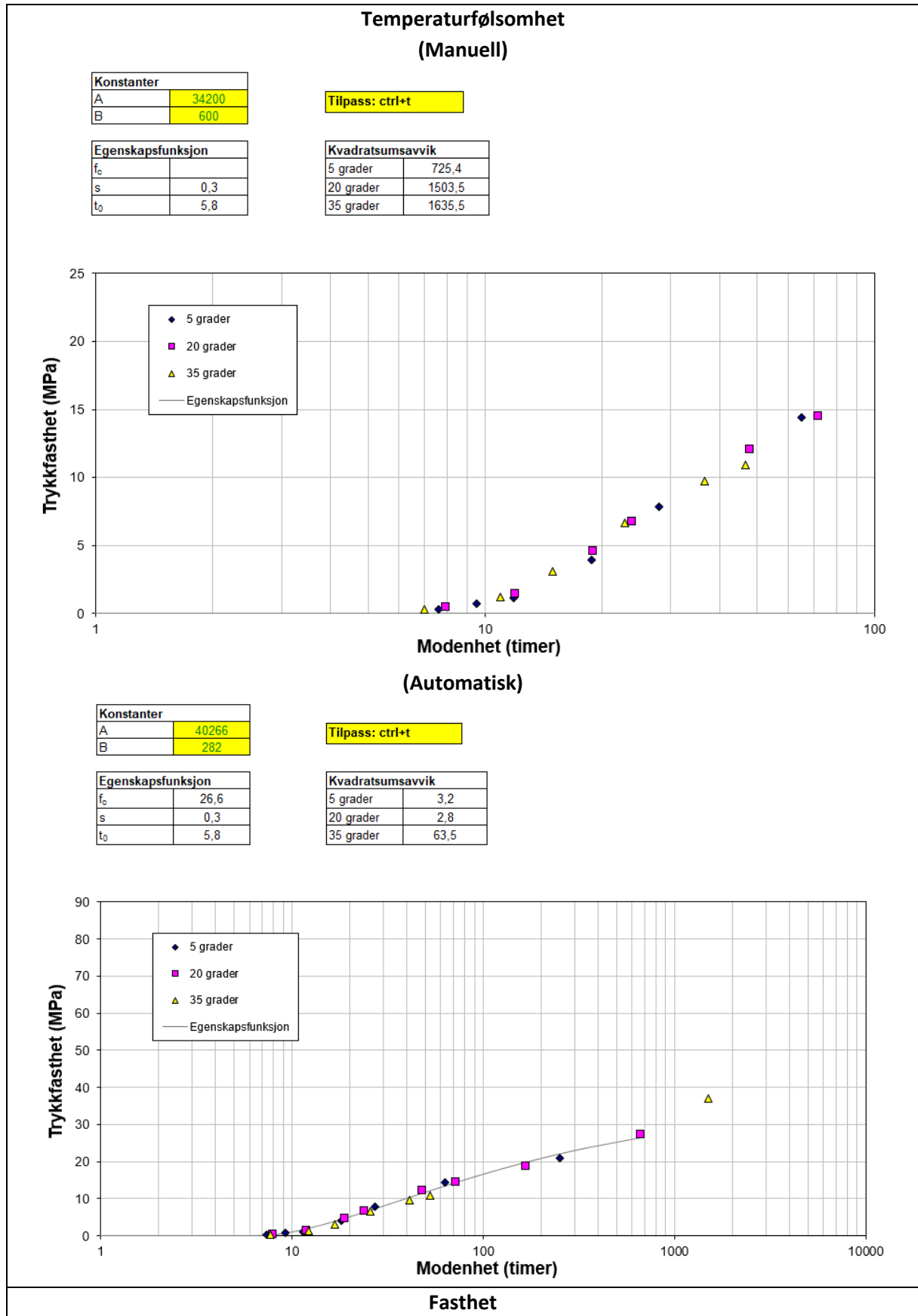
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.7 STD FA - B30 - M90 - 35%FA



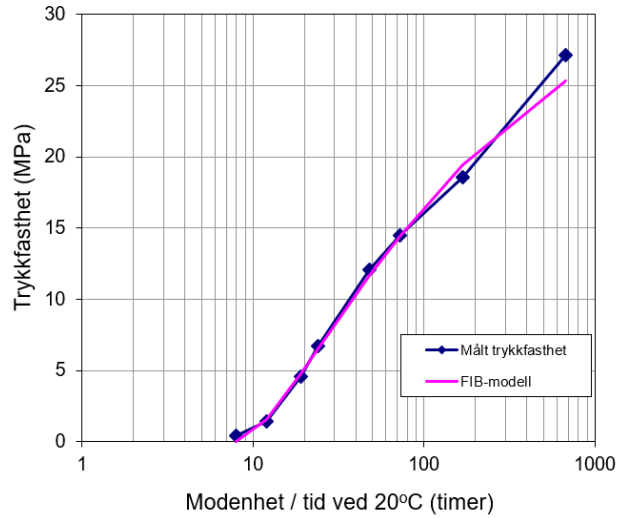
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{y+1}
0,33	8,0	0	0,4	-	-
0,50	12	1,5	1,4	4	0,1
0,79	19	4,7	4,6	1	0,0
1,00	24	6,5	6,7	2	0,1
2,00	48	11,6	12,1	5	0,8
3,00	72	14,4	14,5	1	0,0
7,00	168	19,5	18,6	4	3,3
28,00	672	25,3	27,2	1	3,3

f_{c28}	25,4
s	0,25
t_0	7,36
$\Sigma \Delta y^2$	8
R^2	0,9965

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2402
Varmetapstall	1,04
Varmetapstall (herdet)	1,04
Sementinnhold	298
Avbindingstid	8,9
A - avbinding	40266
B - avbinding	262
A - herdelase	40266
B - herdelase	262
Adiabatisk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall	0,0178
dQ/dm	0
m	400
ms	450

Varmefunksjon

$t_{e\text{-limit}}$	330
W_{ce}	301,97
t_{ce}	9,12
α_c	1,46
R^2	0,9375
Δt_{30}	3254

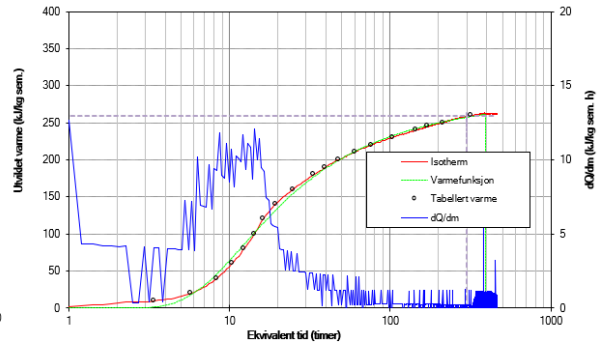
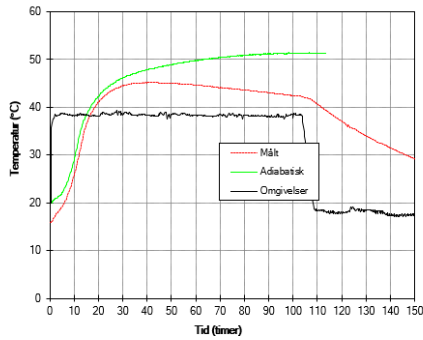
Tilpass varmetapstallet: **<Cib>t**
Tilpass varmfunksjonen: **<Cib>h**

Tabellert varme

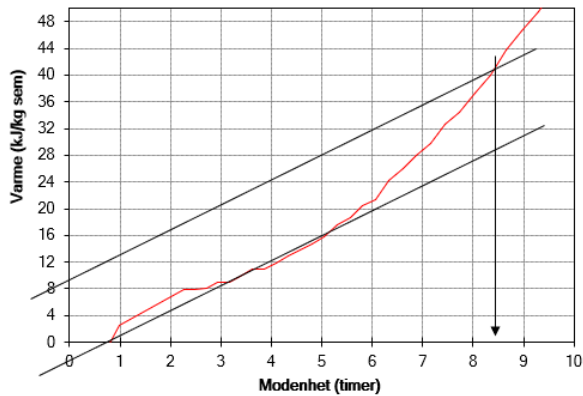
Varmemengde [kJ/kg]	Tilsvarende ekv. tid [h]
0	0,1
10	3,4
20	5,8
40	10,3
60	12,3
80	14,3
100	16,2
120	18,1
140	19,9
160	21,8
180	23,6
190	25,5
200	27,3
210	29,2
220	31,0
230	32,8
240	34,6
245	35,7
250	36,8
260	37,9

Karakteristisk varme

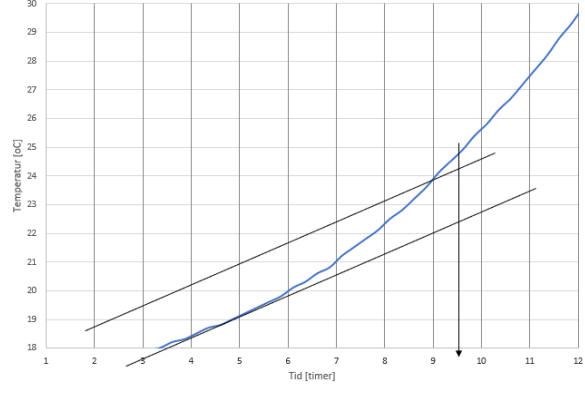
Ekv. tid [h]	Varme [kJ/kg]
300	259,1



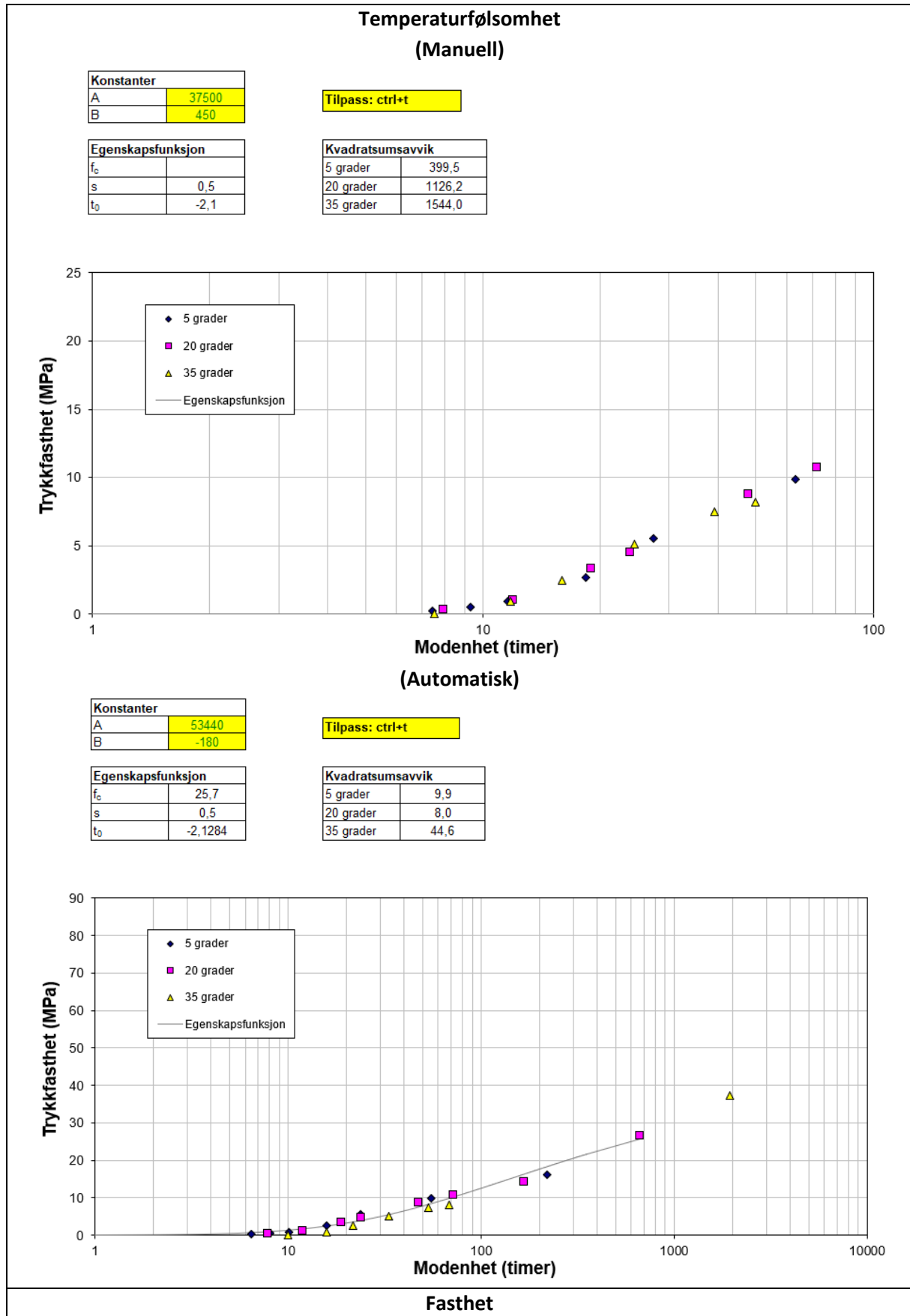
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.8 STD FA - B30 - M90 - 35%FA - 11%S



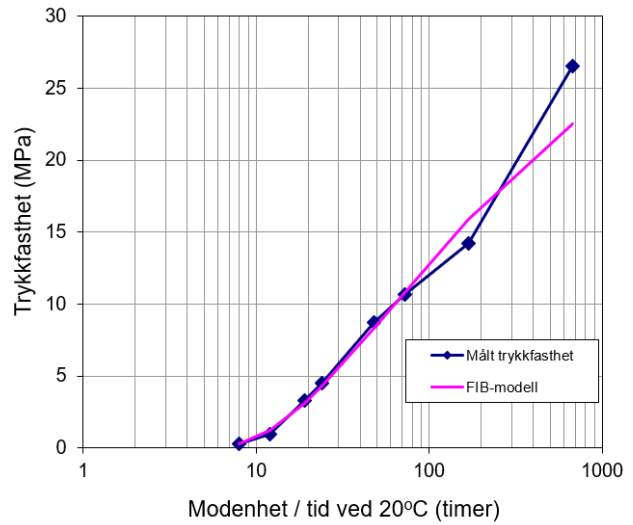
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{y+1}
0,33	8,0	0	0,3	-	-
0,50	12	1,3	1,0	20	1,6
0,79	19	3,1	3,3	20	0,5
1,00	24	4,3	4,5	10	0,4
2,00	48	8,3	8,7	10	1,9
3,00	72	10,8	10,7	5	0,1
7,00	168	15,9	14,2	5	13,8
28,00	672	22,5	26,5	1	16,0

f_{c28}	22,5
s	0,34
t_0	4,46
$\Sigma \Delta y^2$	34
R^2	0,9851

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2353
Varmekapasitet (betong)	1,06
Varmekapasitet (herdet)	1,06
Sementinnhold	298
Avbindingstid	8,5
A - avbinding	53440
B - avbinding	-180
A - herdelase	53440
B - herdelase	-180
Adiabatisk starttemperatur	20

Varmefastsett

Varmefastsett	0,0174
dQ/dm	460
m	460
mc	510

Varmefunksjon

t_{lim}	480
W_{lim}	238,61
t_{c}	12,53
κ_c	1,21
R^2	0,9386
τ_{lag}	2058

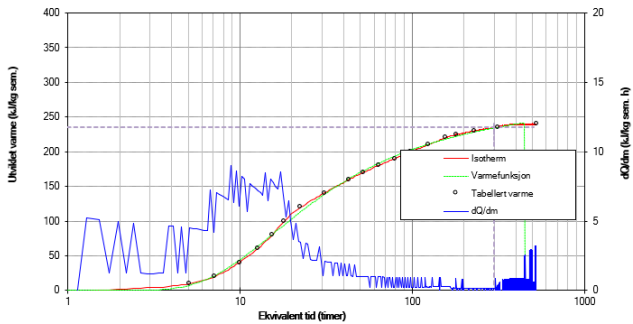
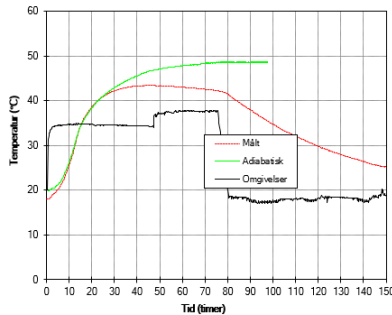
Tilpass varmetapstallet: $\langle C_{\text{eff}} \rangle$
Tilpass varmfunksjonen: $\langle C_{\text{eff}} \rangle$

Tabellert varme

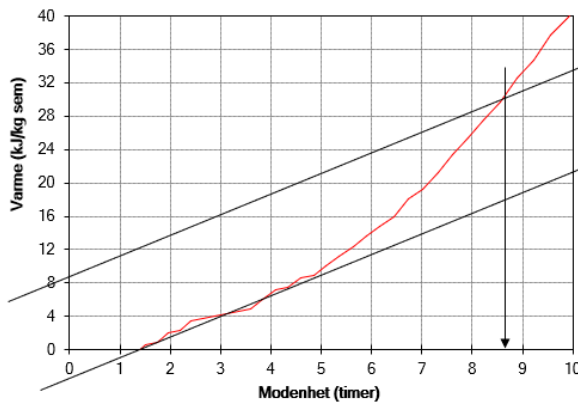
Varmeenergi (kJ/kg)	Tilsvarende økt tid (h)
0	0,5
10	5,1
20	7,1
40	9,9
60	12,6
80	15,3
100	18,1
120	20,9
140	23,8
160	26,6
180	29,5
200	32,3
220	35,2
240	38,1
260	41,0
280	43,9
300	46,8
320	49,7
340	52,6
360	55,5
380	58,4
400	61,3
420	64,2
440	67,1
460	70,0
480	72,9
500	75,8
520	78,7
540	81,6
560	84,5
580	87,4
600	90,3
620	93,2
640	96,1
660	99,0
680	101,9
700	104,8
720	107,7
740	110,6
760	113,5
780	116,4
800	119,3
820	122,2
840	125,1
860	128,0
880	130,9
900	133,8
920	136,7
940	139,6
960	142,5
980	145,4
1000	148,3

Karakteristisk varme

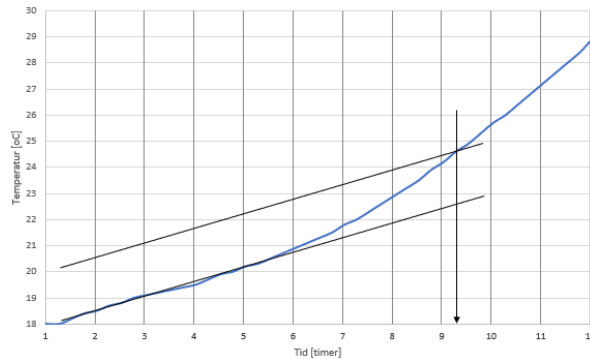
Ekv. tid (h)	Varme (kJ/kg)
300	234,8



Avbindingstid 12kJ-metoden



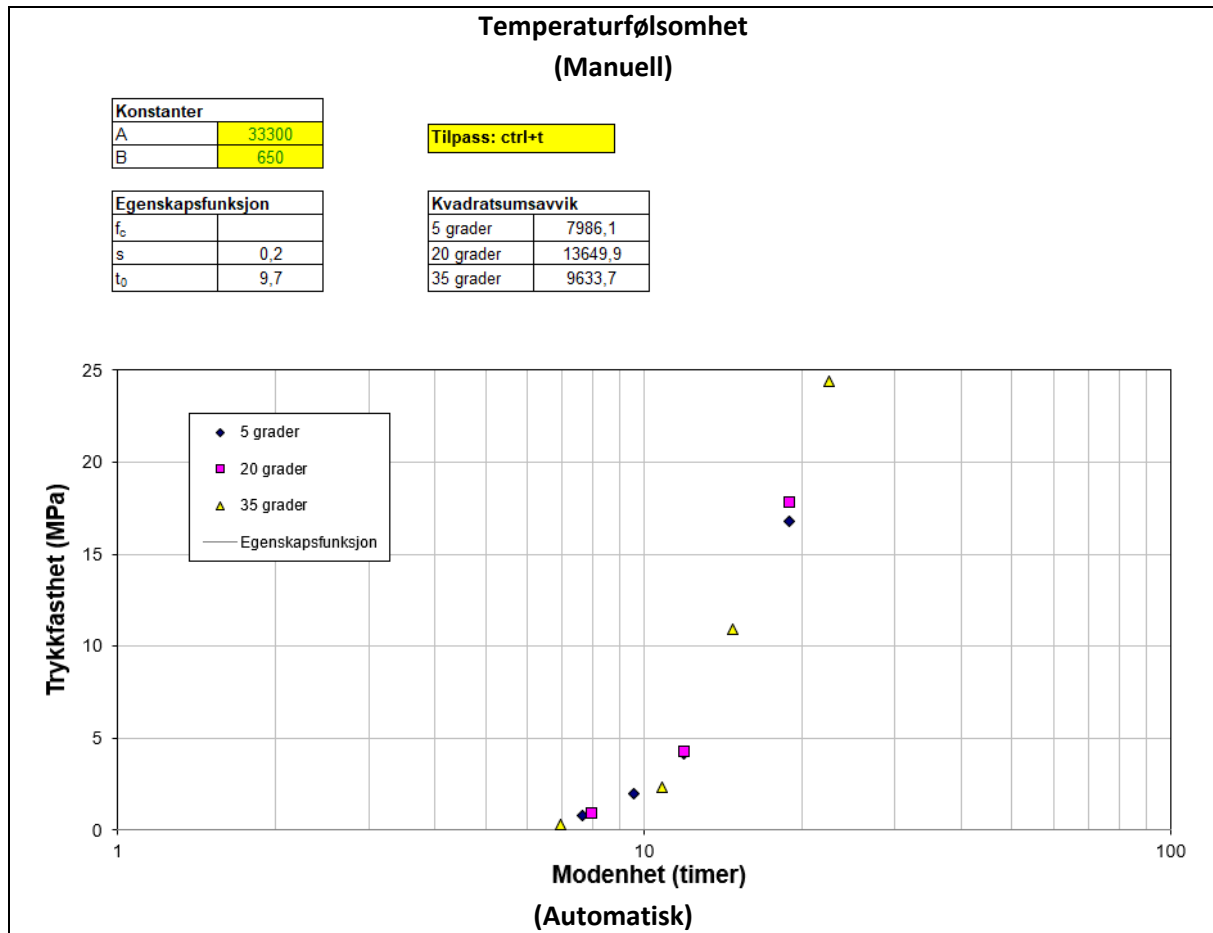
Avbindingstid 2°C-metoden

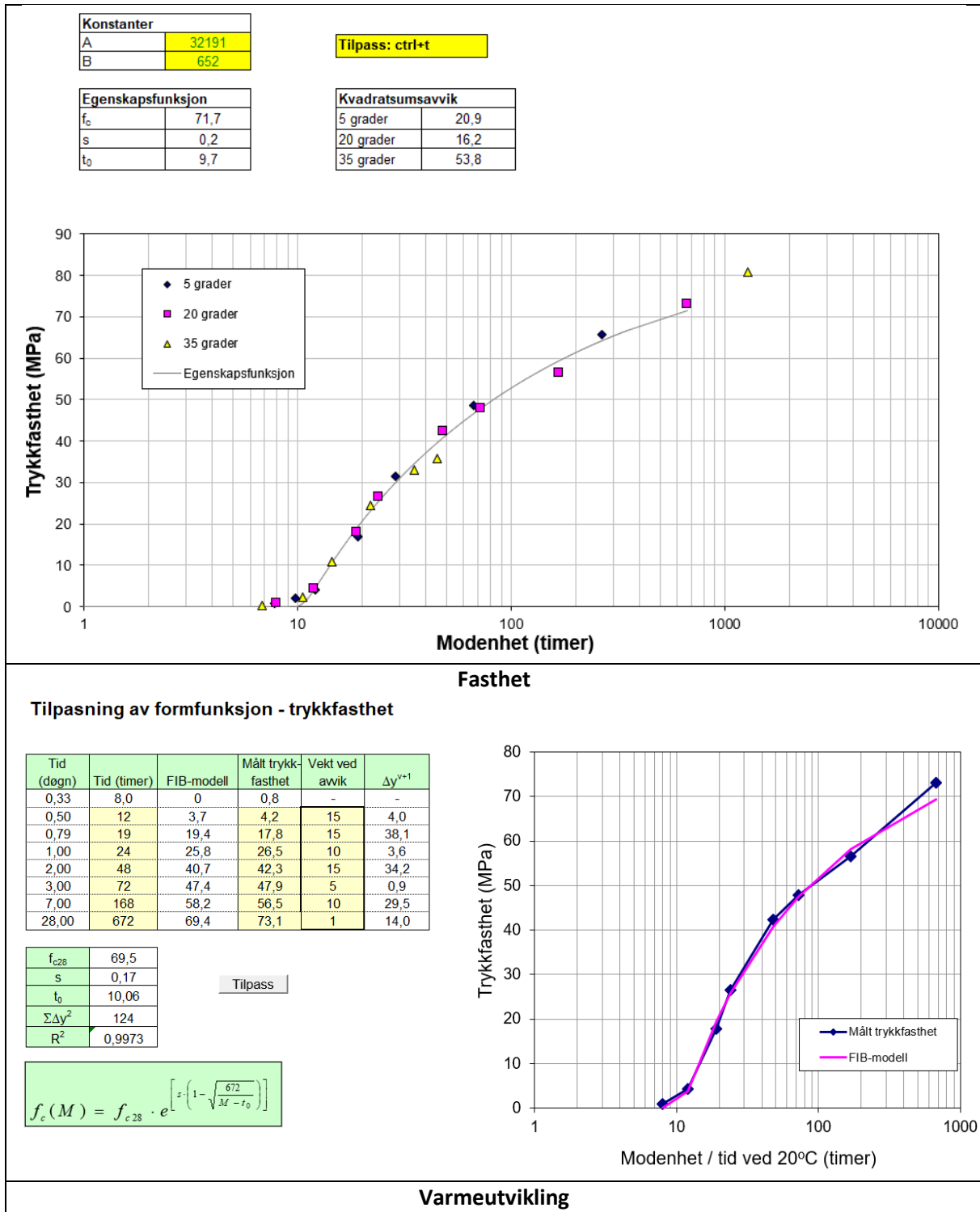


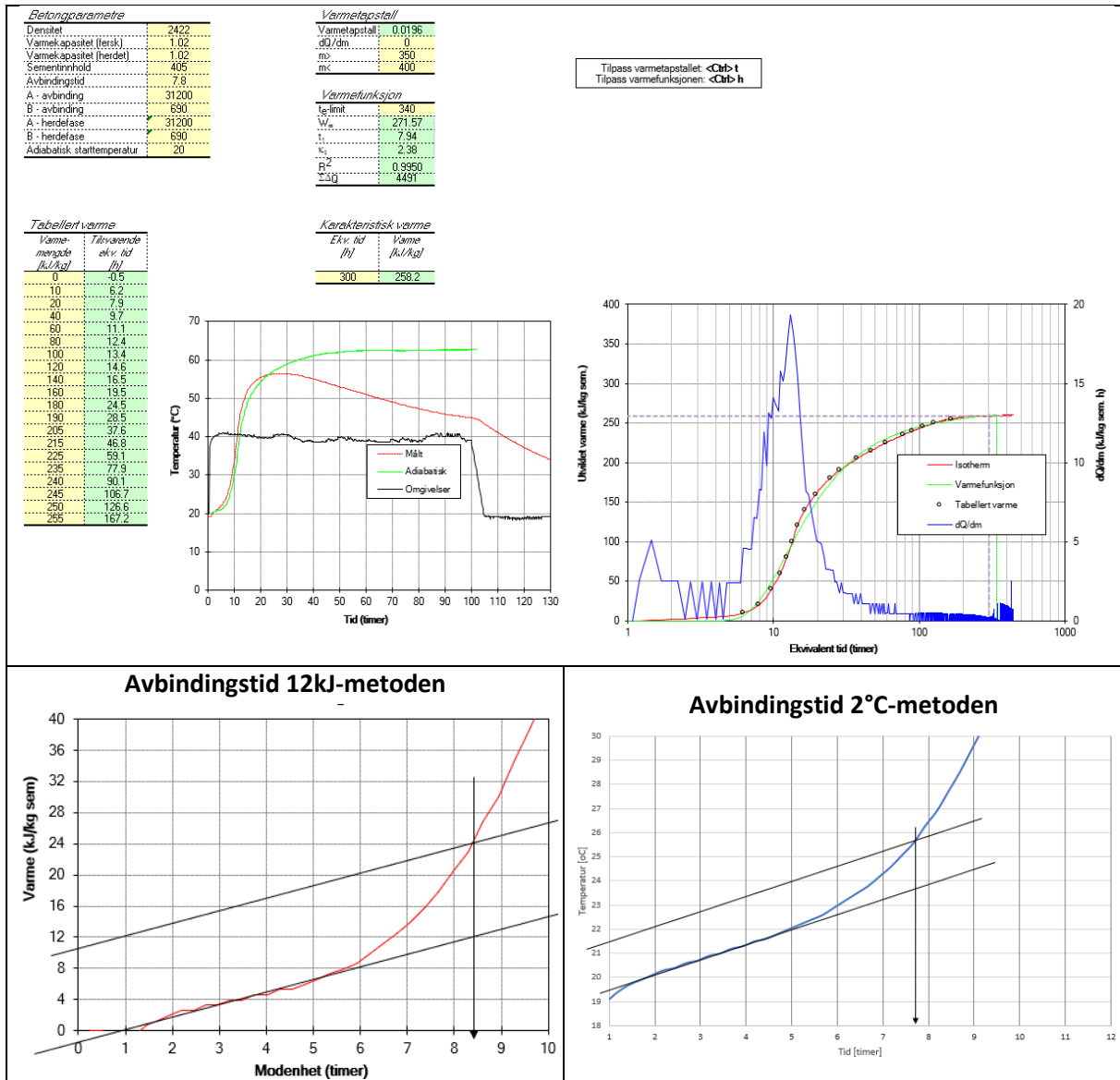
12.3.9 STD FA - B45 - M40 - 35%FA

Resept nr. 9 og 17 er slått sammen. Se vedlegg 12.3.17.

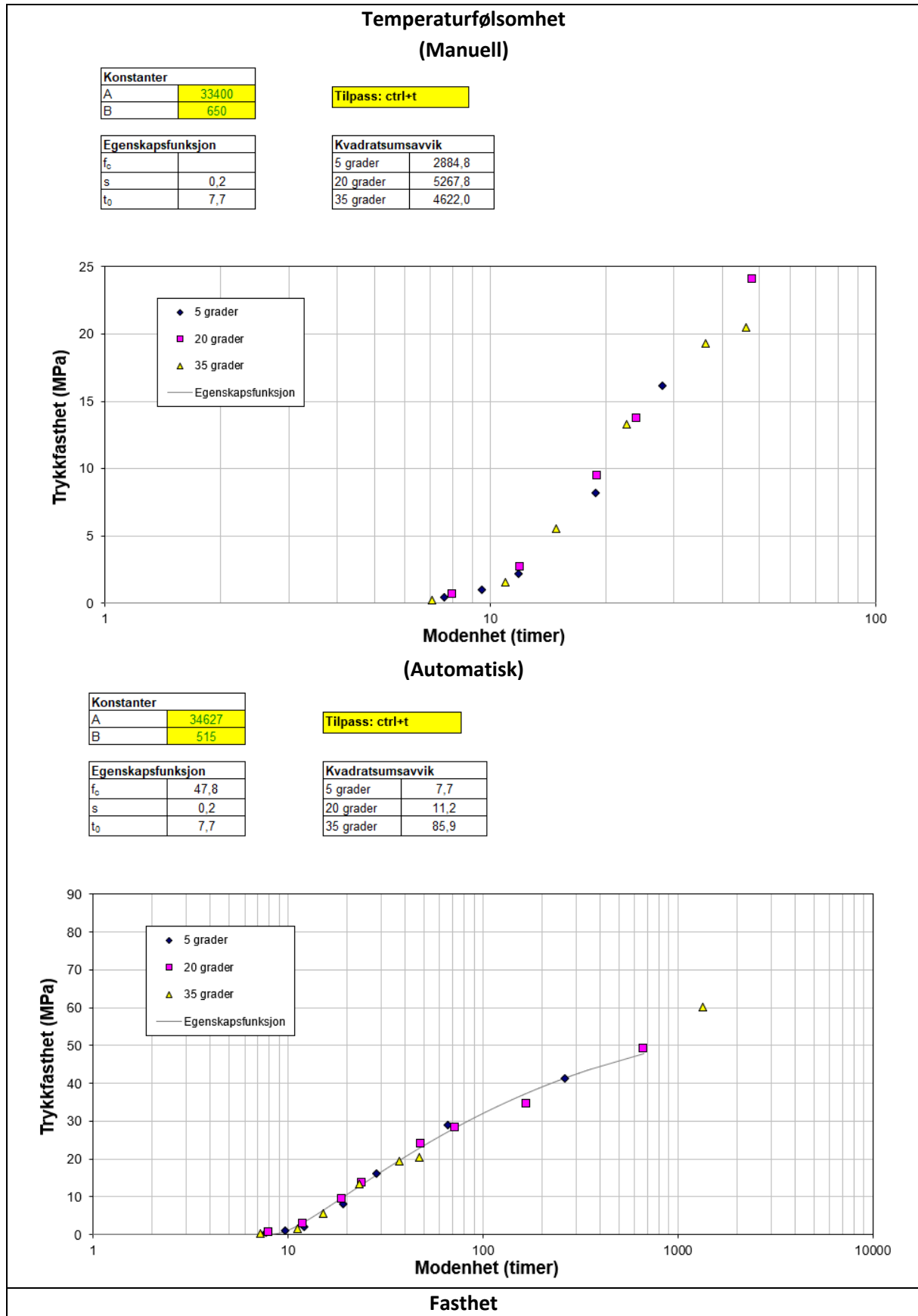
12.3.10 STD FA - B45 - M40 - 25%FA







12.3.11 STD FA - B30 - M60 - 35%FA



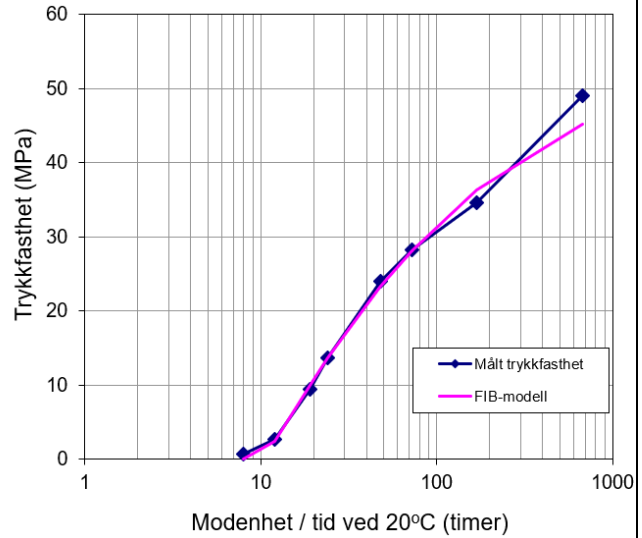
Tilpasning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{n+1}
0,33	8,0	0	0,7	-	-
0,50	12	2,5	2,7	5	0,2
0,79	19	10,0	9,4	5	1,9
1,00	24	13,7	13,7	5	0,0
2,00	48	23,4	24,1	10	4,3
3,00	72	28,2	28,3	10	0,1
7,00	168	36,3	34,6	5	15,3
28,00	672	45,3	49,1	1	14,5

f_{c28}	45,4
s	0,21
t_0	8,93
$\Sigma \Delta y^2$	36
R^2	0,9953

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2402
Varmetapstallet	1,03
Varmetapstallet (herdel)	1,03
Sementinnhold	377
Avbindingstid	8,3
A - avbinding	34627
B - avbinding	515
A - herdelase	34627
B - herdelase	515
Adabatsk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall	0,0176
dQ/dm	0
m	400
mc	480

Varmefunksjon

t_0 limt	390
W_0	267,34
t_1	9,03
t_2	1,97
R^2	0,9966
ΣdQ	3510

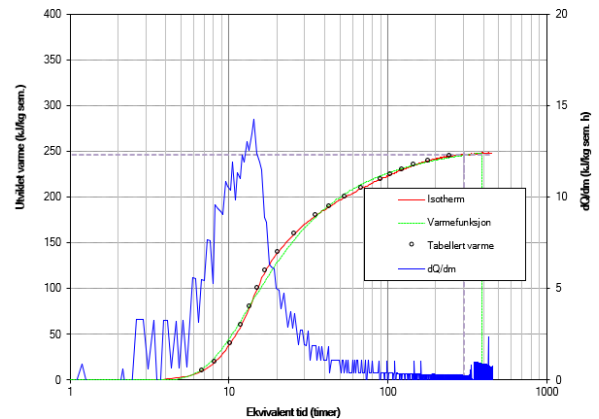
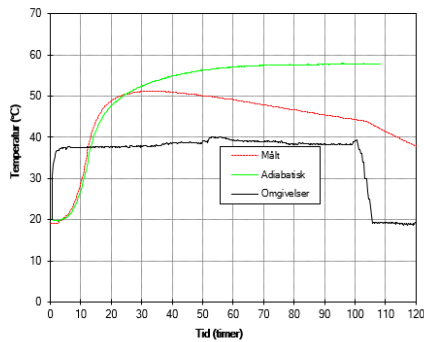
Tilpass varmetapstallet: $\langle C_{ib} \cdot t$
Tilpass varmfunksjonen: $\langle C_{ib} \cdot h$

Tabellert varme

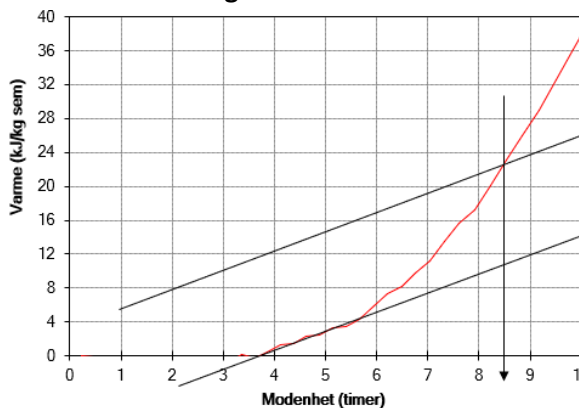
Varme mengde [kJ/kg]	Tilsvarende ekv. tid [h]
0	0,3
10	6,8
20	8,2
40	10,2
60	12,0
80	13,6
100	15,1
120	17,0
140	20,4
160	25,8
180	35,3
190	43,2
200	53,7
210	68,5
220	90,2
225	104,9
230	123,9
235	146,1
240	181,0
245	245,1

Karakteristisk varme

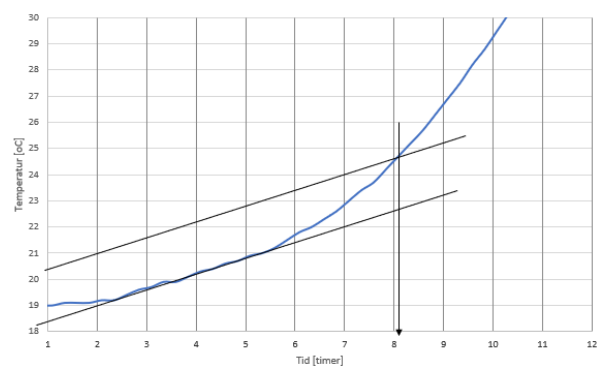
Ekv. tid [h]	Varme [kJ/kg]
300	246,5



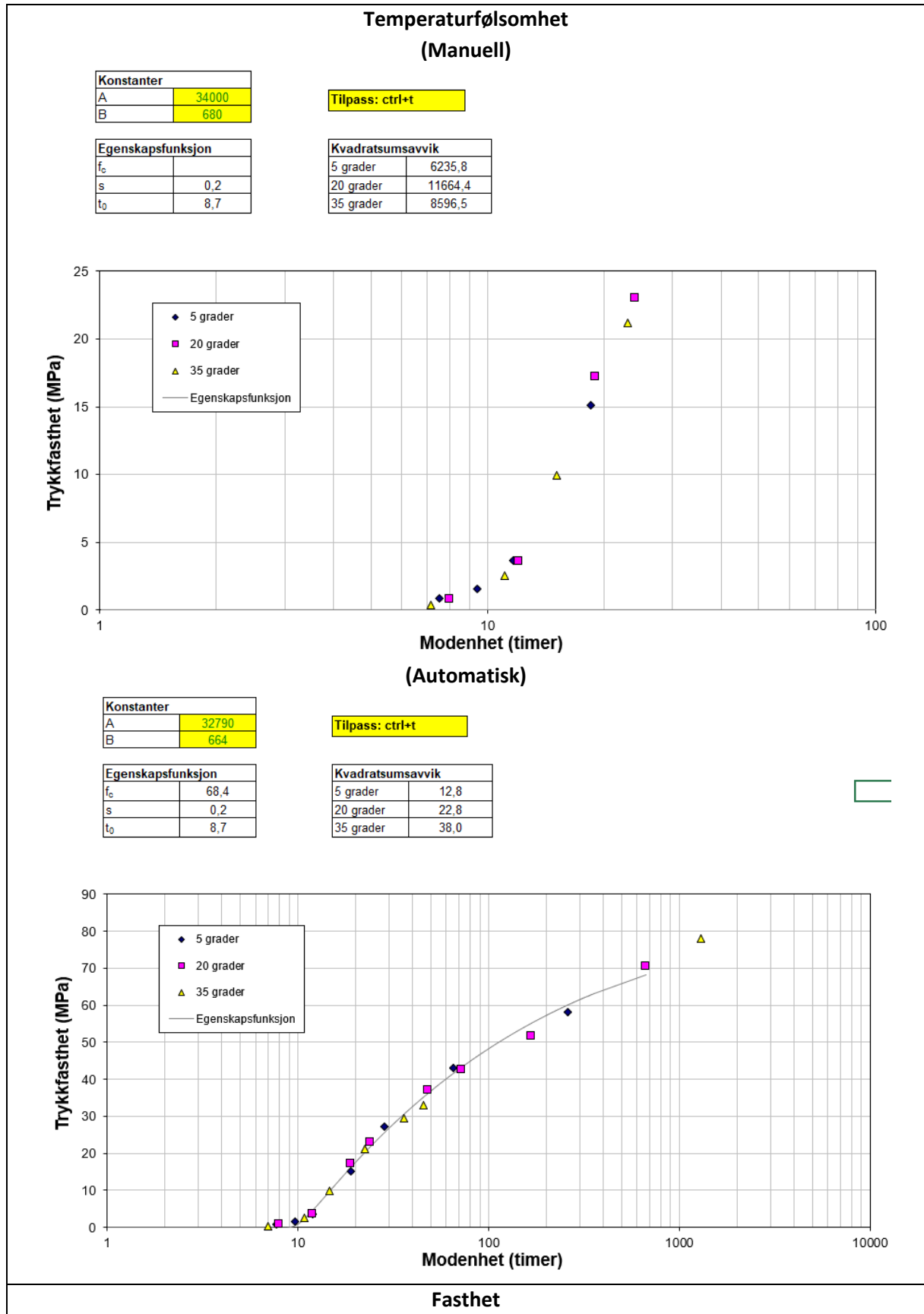
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.12 STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 4%S



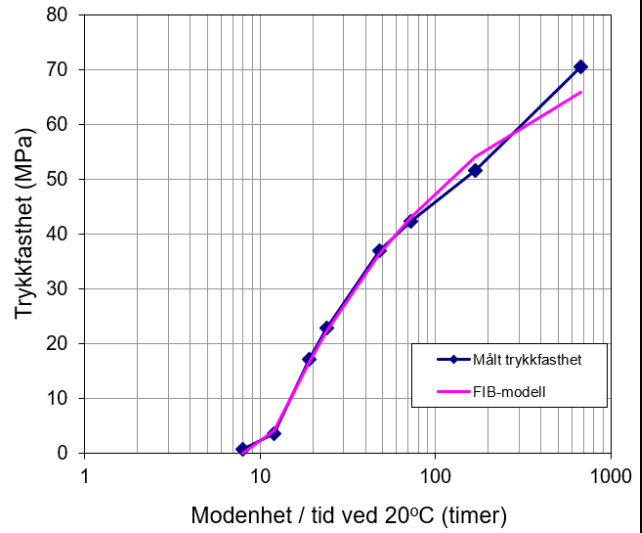
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{n+1}
0,33	8,0	0	0,8	-	-
0,50	12	4,2	3,6	5	1,7
0,79	19	16,7	17,2	5	1,0
1,00	24	22,4	23,0	8	2,6
2,00	48	36,5	37,0	8	2,0
3,00	72	43,1	42,5	15	6,9
7,00	168	54,2	51,7	1	6,2
28,00	672	66,0	70,6	1	21,1

f_{c28}	66,1
s	0,19
t_0	9,27
$\Sigma \Delta y^2$	42
R^2	0,9959

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2422
Varmekapasitet (fersk)	1,01
Varmekapasitet (herdet)	1,01
Sementinnhold	390
Avbindingstid	7,3
A - avbinding	33100
B - avbinding	690
A - herdelase	33100
B - herdelase	690
Adiabatsk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall	0,0196
dQ/dm	0
m	400
mc	450

Varmefunksjon

t_e limit	390
W_{pr}	284,72
t_1	8,51
t_2	2,00
R^2	0,9959
$\Sigma \Delta Q$	5336

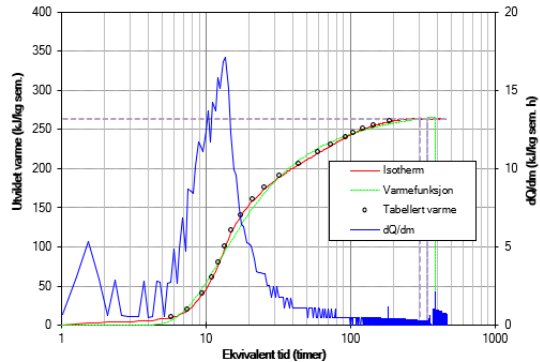
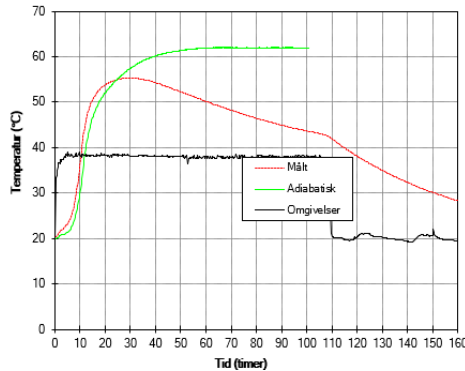
Tilpass varmetapstallet: <Cb> t
Tilpass varmfunksjonen: <Cb> h

Tabellert varme

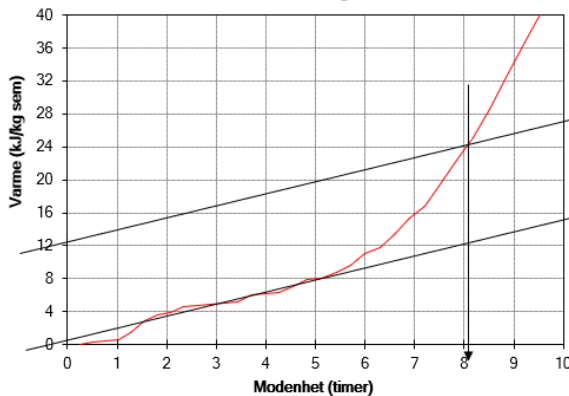
Varmemengde [kJ/kg]	Tilsvarende ekv. tid [h]
0	0,0
10	5,8
20	7,6
40	9,5
60	11,1
80	12,4
100	13,6
120	15,1
140	17,6
160	21,4
175	25,9
190	32,8
205	44,1
220	60,3
230	74,3
240	93,5
245	106,3
250	123,1
255	146,7
260	189,0

Karakteristisk varme

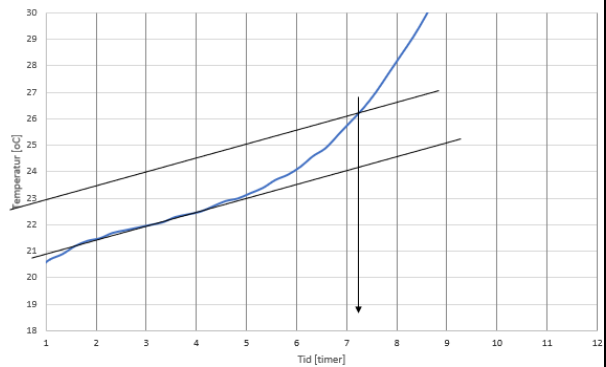
Ekv. tid [h]	Varme [kJ/kg]
300	263,3



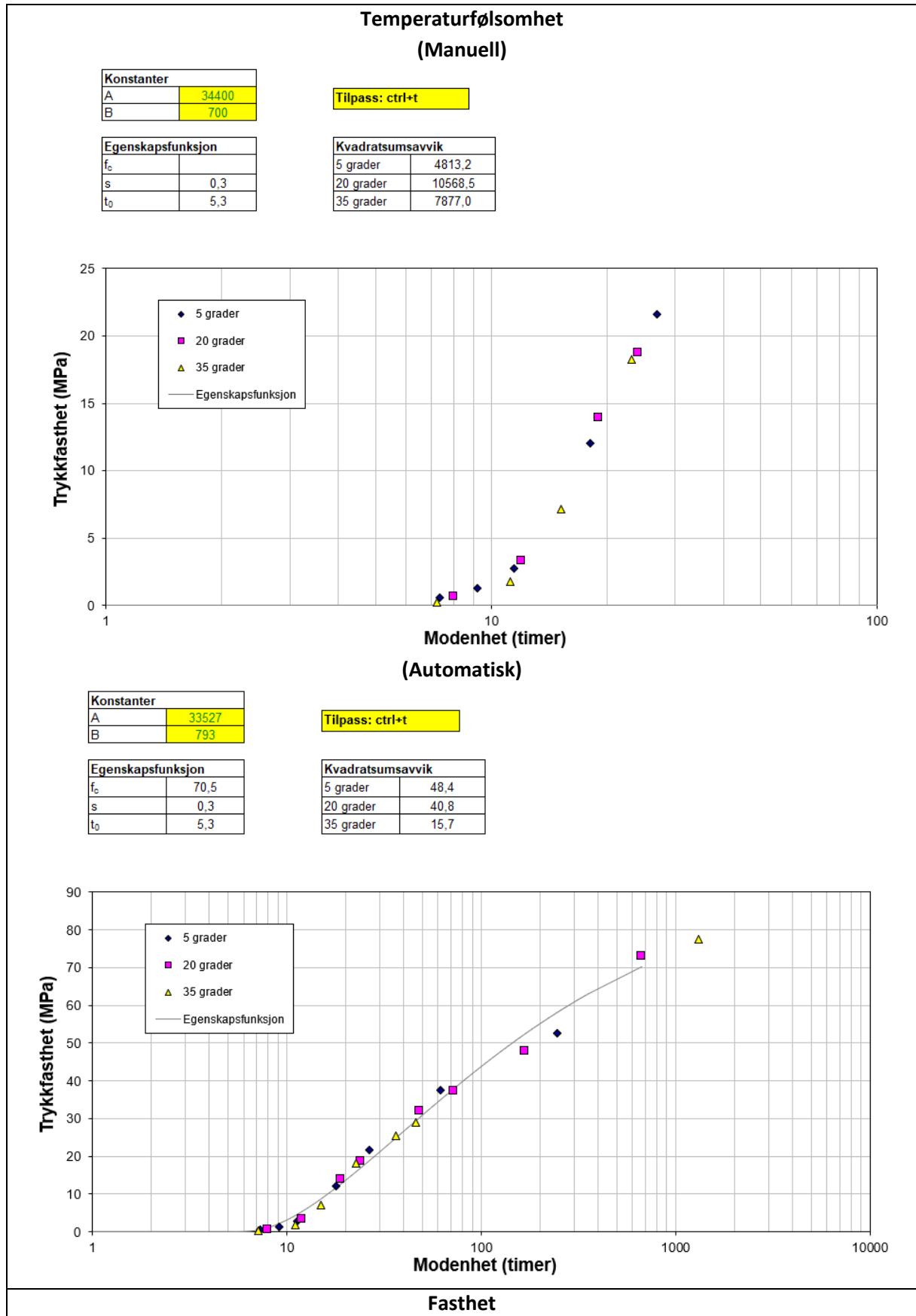
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.13 STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 8%S



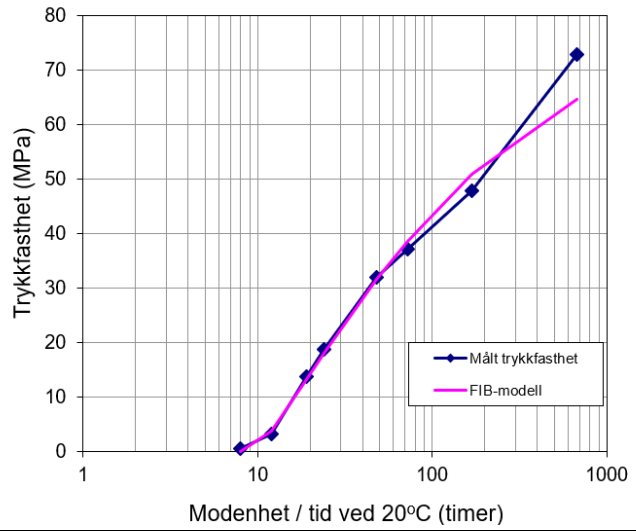
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{v+1}
0.33	8.0	0	0.6	-	-
0.50	12	3.8	3.3	20	5.3
0.79	19	13.3	13.9	15	6.3
1.00	24	18.2	18.8	15	5.1
2.00	48	31.7	32.0	10	1.0
3.00	72	38.7	37.2	10	21.2
7.00	168	50.9	47.9	2	18.7
28.00	672	64.8	72.9	1	66.3

f_{c28}	64.8
s	0.23
t_0	8.22
$\Sigma \Delta y^2$	124
R^2	0.9905

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2416
Varmekapasitet (fersk)	1.01
Varmekapasitet (herdet)	1.01
Sementinnhold	375
Avbindingstid	7.6
A - avbinding	34400
B - avbinding	740
A - herdefase	34400
B - herdefase	740
Adiabatsk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall	0.0183
d0/dm	0
m	490
mc	540

Tilpass varmetapstallet: <Ctrl> t
Tilpass varmfunksjonen: <Ctrl> h

Varmefunksjon

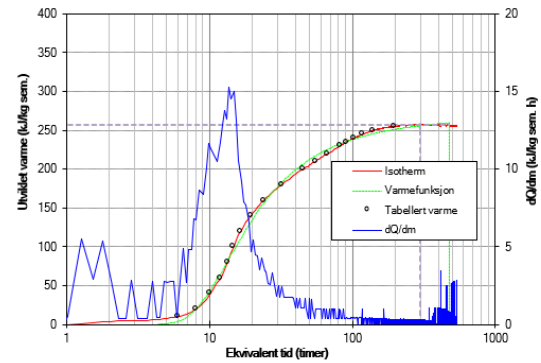
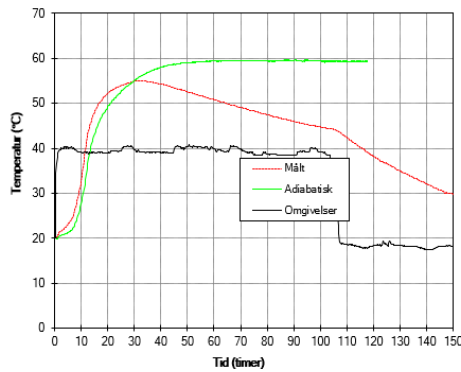
$t_{e\text{-limit}}$	480
W_{ad}	272.62
t_1	8.92
t_2	2.19
R^2	0.9970
$\Sigma \Delta y$	6847

Tabellert varme

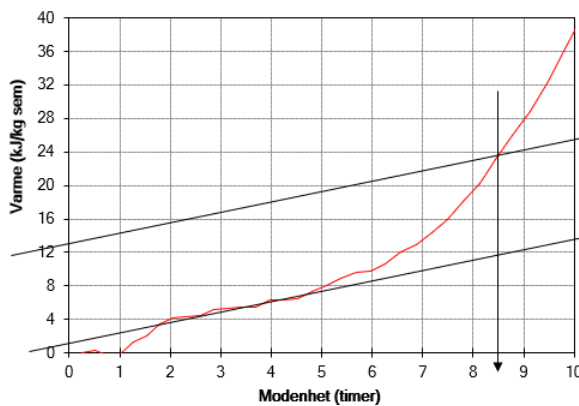
Varmemengde [kJ/kg]	Tilsvarende ekv. tid [h]
0	0.0
10	6.0
20	8.1
40	10.1
60	11.9
80	13.4
100	14.8
120	16.5
140	18.5
160	24.2
180	32.0
200	45.3
210	55.2
220	67.2
230	82.1
235	90.9
240	102.9
245	116.9
250	138.6
255	195.5

Karakteristisk varme

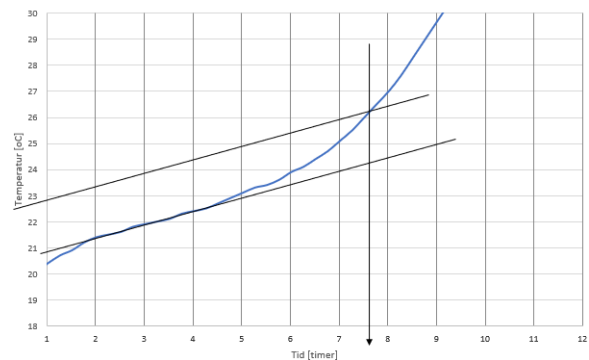
Ekv. tid [h]	Varme [kJ/kg]
300	257.2



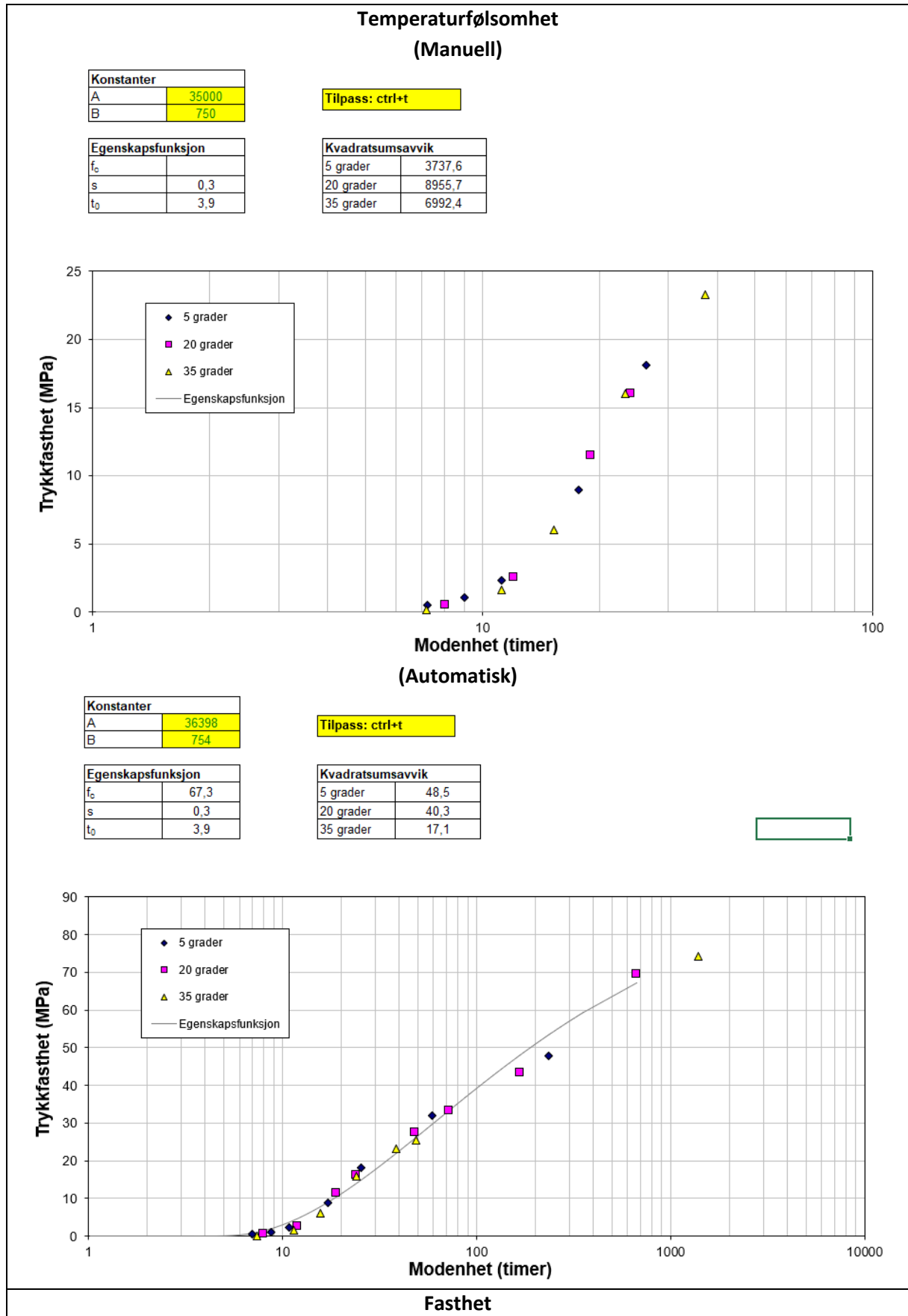
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.14 STD FA - B45 - M40 - 25%FA - 11%S



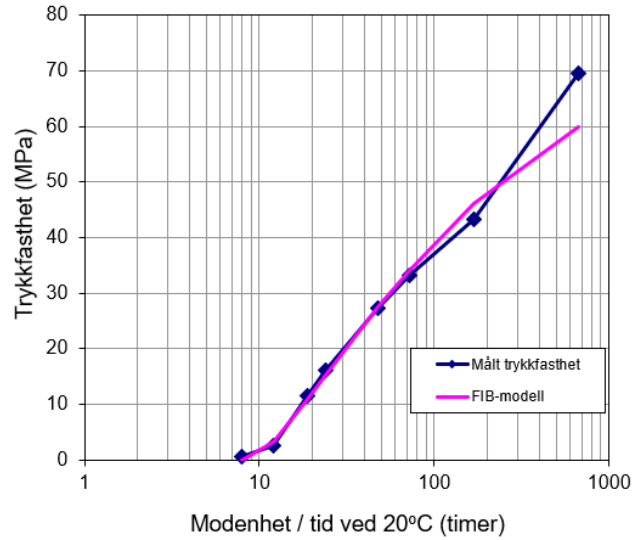
Tilpasning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{*+1}
0.33	8.0	0	0.5	-	-
0.50	12	3.3	2.6	15	7.5
0.79	19	11.0	11.5	13	3.1
1.00	24	15.2	16.0	14	9.4
2.00	48	27.5	27.4	1	0.0
3.00	72	34.1	33.2	5	4.6
7.00	168	46.0	43.4	5	36.1
28.00	672	59.9	69.5	1	91.8

f_{c28}	60.0
s	0.25
t_0	7.70
$\Sigma \Delta y^2$	153
R^2	0.9884

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{-\left[s \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre	
Densitet	2403
Varmekapasitet (fersk)	1.02
Varmekapasitet (herdet)	1.02
Sementinnhold	365
Avbindingstid	7.3
A - avbinding	35700
B - avbinding	780
A - herdelase	35700
B - herdelase	780
Adiabatisk starttemperatur	20

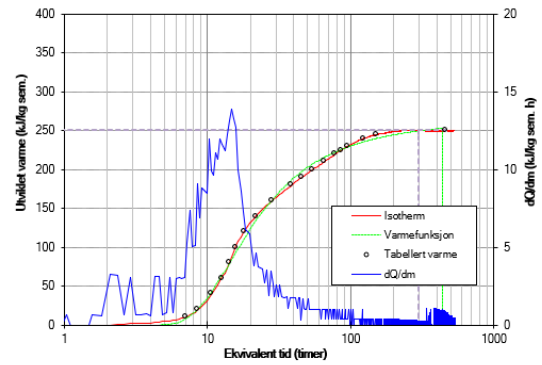
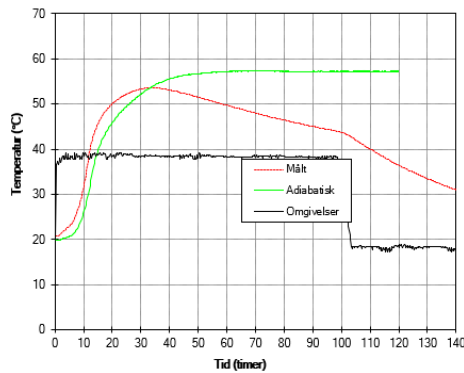
Varmetapstall	
Varmetapstall	0.0179
dQ/dm	0
m	450
m _c	800

Varmefunksjon	
t_0 -limit	440
W_{ad}	268.78
t_{10}	9.56
t_{20}	2.10
R^2	0.9870
$\Sigma \Delta Q$	6717

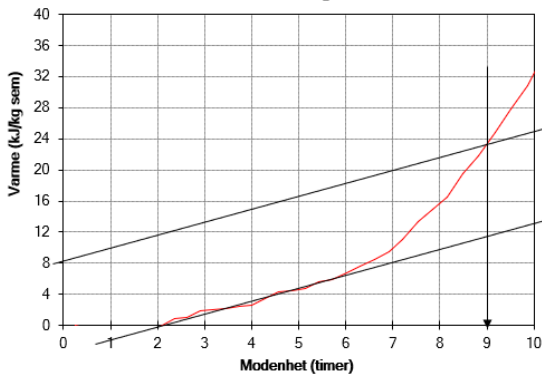
Tilpass varmetapstallet: <Ctrl> t
Tilpass varmfunksjonen: <Ctrl> h

Tabellert varme	
Varme-mengde (kJ/kg)	Tilsvarende ekv. tid (h)
0	0.0
10	7.0
20	8.6
40	10.7
60	12.5
80	14.2
100	15.7
120	18.0
140	21.9
160	28.2
180	38.7
190	45.6
200	54.4
210	64.9
220	77.6
225	85.9
230	96.2
240	123.5
245	151.3
250	459.6

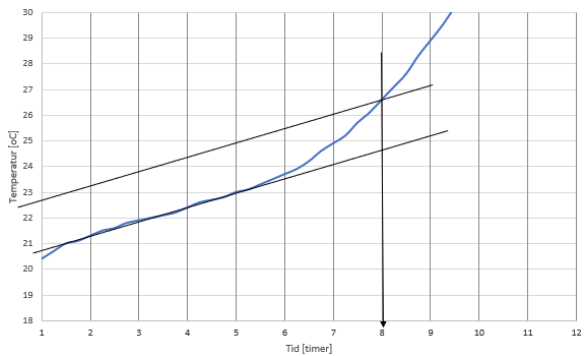
Karakteristisk varme	
Ekv. tid (h)	Varme (kJ/kg)
300	250.6



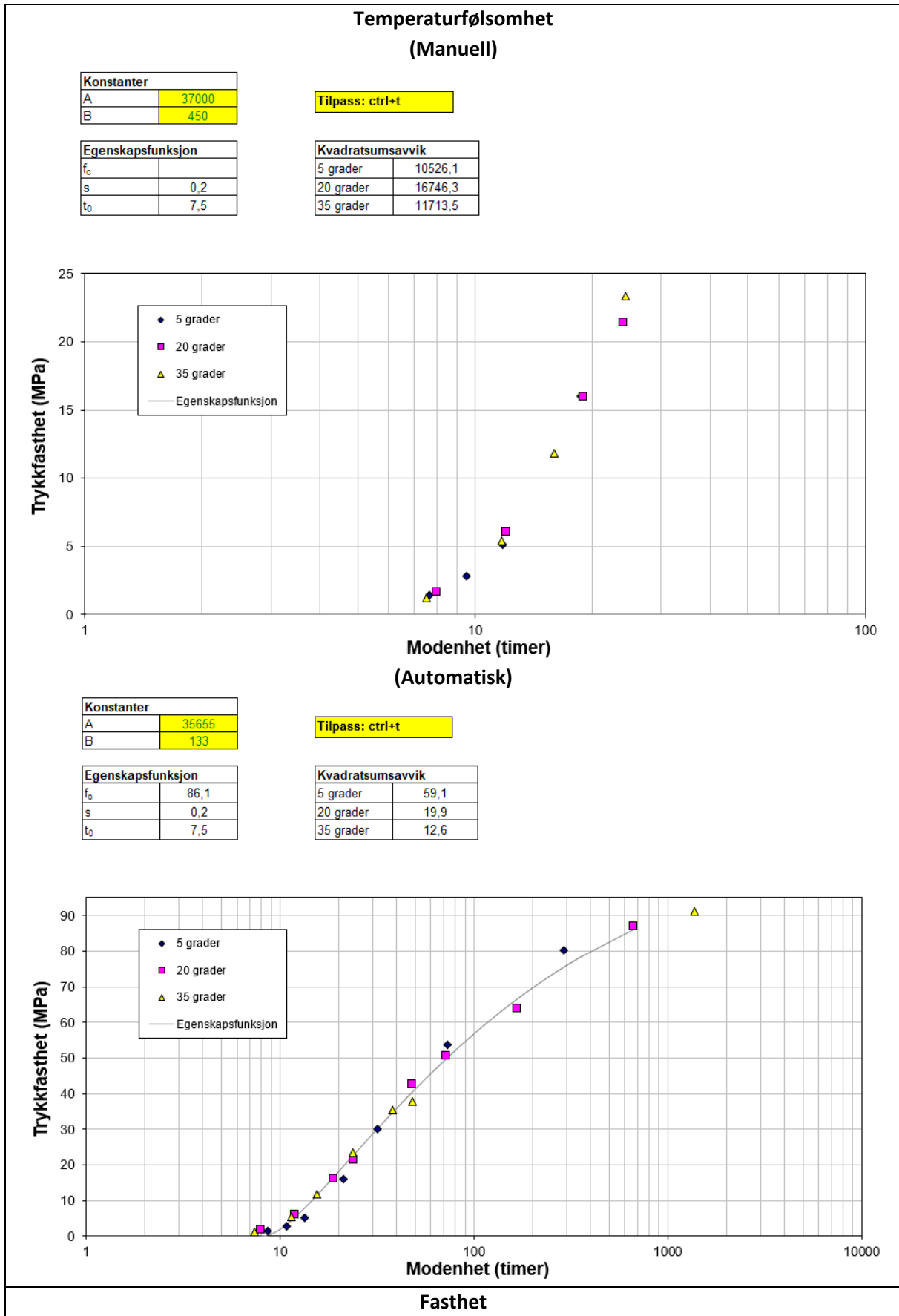
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.15 ANL FA - B45 - M40 REF



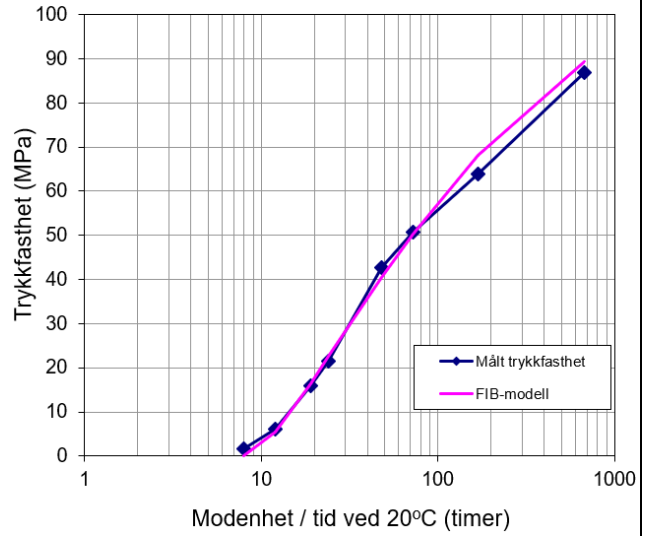
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{y+1}
0,33	8,0	0	1,6	-	-
0,50	12	5,5	6,0	30	7,6
0,79	19	16,4	15,9	20	5,2
1,00	24	22,5	21,4	20	25,0
2,00	48	40,4	42,7	10	49,3
3,00	72	50,2	50,6	10	1,6
7,00	168	68,1	63,8	1	18,9
28,00	672	89,2	86,9	1	5,7

f_{c28}	89,4
s	0,26
t_0	7,11
$\Sigma \Delta y^2$	113
R^2	0,9981

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2448
Varmekapasitet (lensk.)	1,01
Varmekapasitet (herdet)	1,01
Semenntetthet	480
Avbindingstid	6,4
A - avbinding	35655
B - avbinding	133
A - herdelase	35655
B - herdelase	133
Adiabatisk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall	0,0178
dQ/dm	0
m	500
mc	550

Varmefunksjon

Te limit	490
W _{te}	384,90
t _{te}	10,50
k _{te}	1,25
R ²	0,9978
dQ	4171

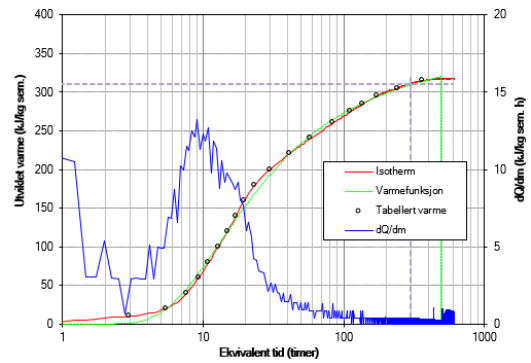
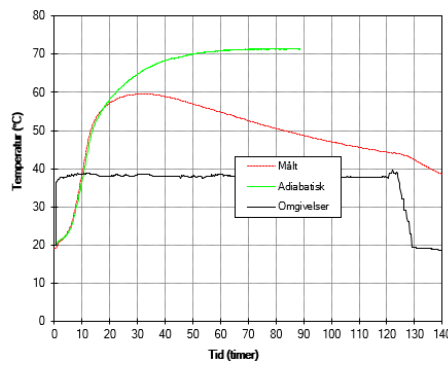
Tilpass varmetapstallet: <Crb> t
Tilpass varmfunksjonen: <Crb> h

Tabellert varme

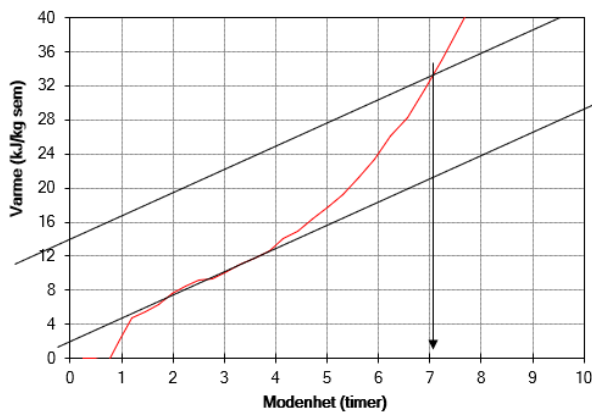
Varme mengde (kJ/kg)	Tilsvarende ekv. tid (h)
0	0,5
10	3,0
20	5,4
40	7,7
60	9,3
80	11,0
100	12,9
120	14,9
140	17,1
160	19,6
180	23,4
200	30,0
220	40,9
240	56,1
260	84,2
275	111,6
285	136,4
295	172,5
305	240,5
315	365,0

Karakteristisk varme

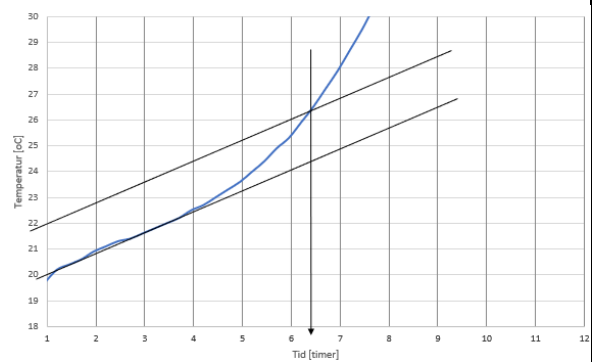
Ekv. tid (h)	Varme (kJ/kg)
300	311,0



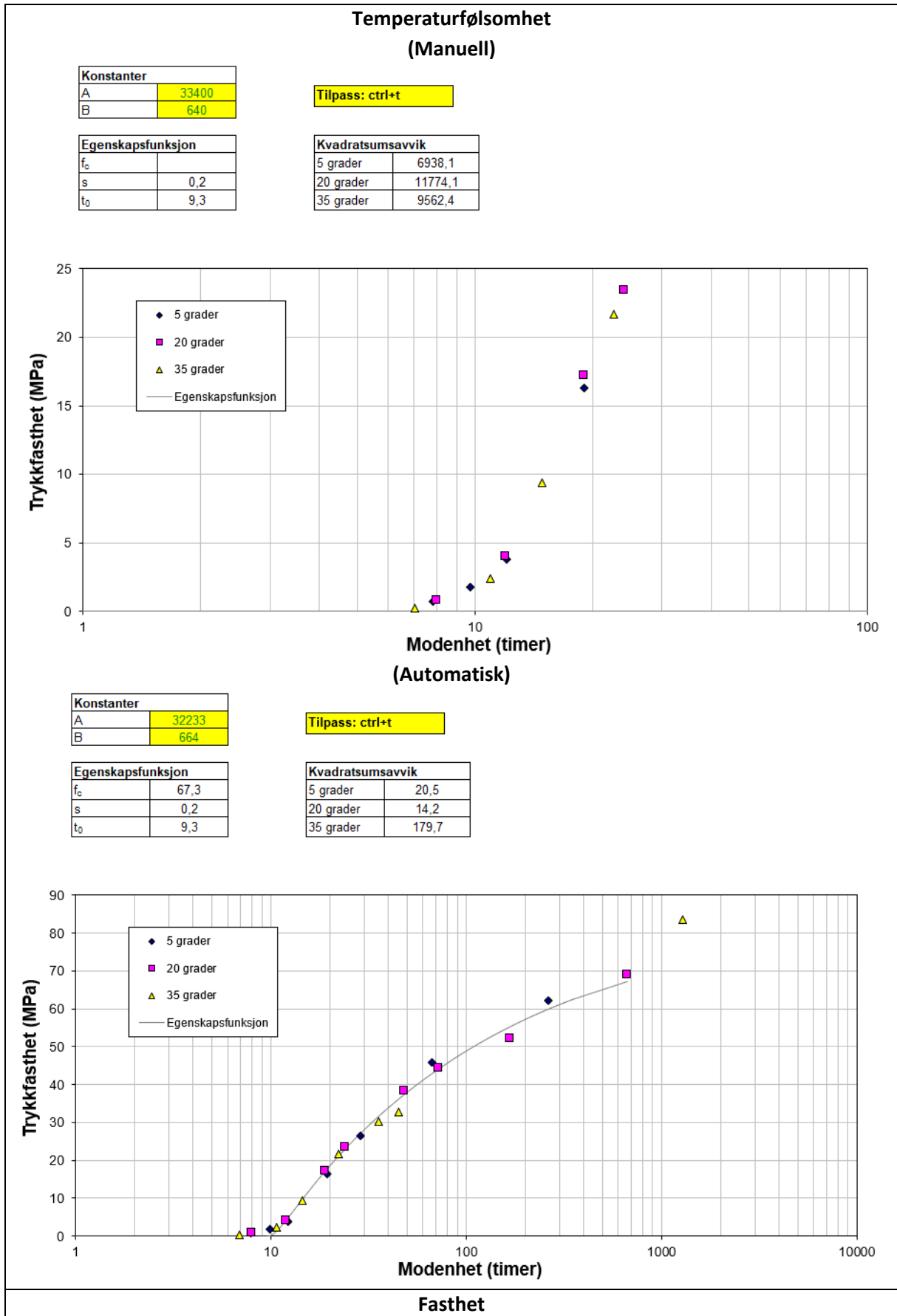
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.16 STD FA - B45 - M40 - 30%FA



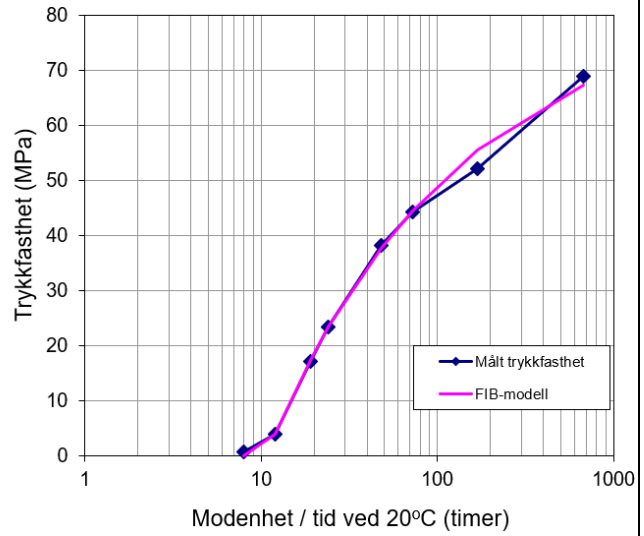
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{y+1}
0,33	8,0	0	0,8	-	-
0,50	12	4,0	4,0	5	0,0
0,79	19	17,4	17,2	5	0,3
1,00	24	23,4	23,5	5	0,0
2,00	48	37,8	38,3	5	1,2
3,00	72	44,5	44,4	1	0,0
7,00	168	55,6	52,2	1	11,3
28,00	672	67,3	69,0	1	2,7

f_{c28}	67,4
s	0,18
t_0	9,55
$\Sigma \Delta y^2$	16
R^2	0,9976

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Belongparametre

Densitet	2429
Varmekapasitet (fresk)	1,01
Varmekapasitet (herdet)	1,01
Sementinnhold	395
Avbindingstid	7,5
A - avbinding	32500
B - avbinding	570
A - herdefase	32500
B - herdefase	570
Adiabatisk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall	0,0184
dQ/dm	0
m	400
mc	450

Tilpass varmetapstallet: $\langle C_{tr} \rangle t$
Tilpass varmfunksjonen: $\langle C_{ab} \rangle h$

Varmefunksjon

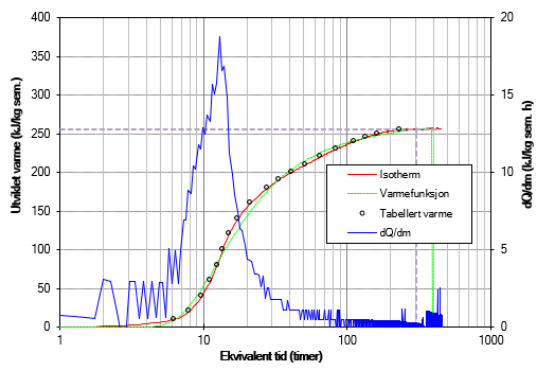
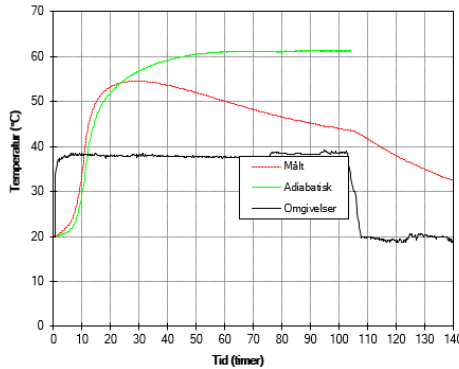
$t_{e\text{-limit}}$	350
$W_{e\text{-max}}$	272,42
t_1	8,25
k_1	2,13
R^2	0,9949
ΣQ	5195

Tabellert varme

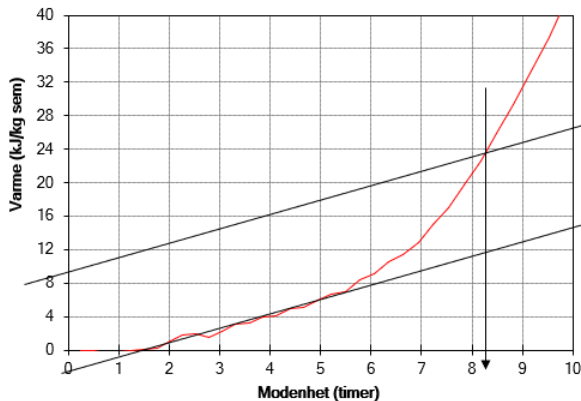
Varmemengde [kJ/kg]	Tilsvarende ekv. tid [h]
0	0,0
10	6,2
20	7,9
40	9,7
60	11,2
80	12,5
100	13,6
120	15,1
140	17,4
160	21,3
180	28,0
190	33,4
200	41,0
210	51,4
220	65,0
230	84,4
240	112,4
245	134,3
250	163,6
255	233,9

Karakteristisk varme

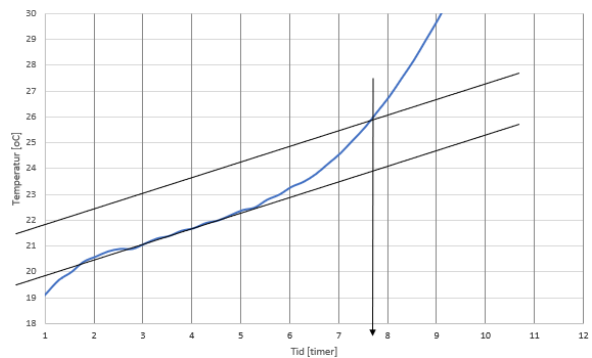
Ekv. tid [h]	Varme [kJ/kg]
300	255,4



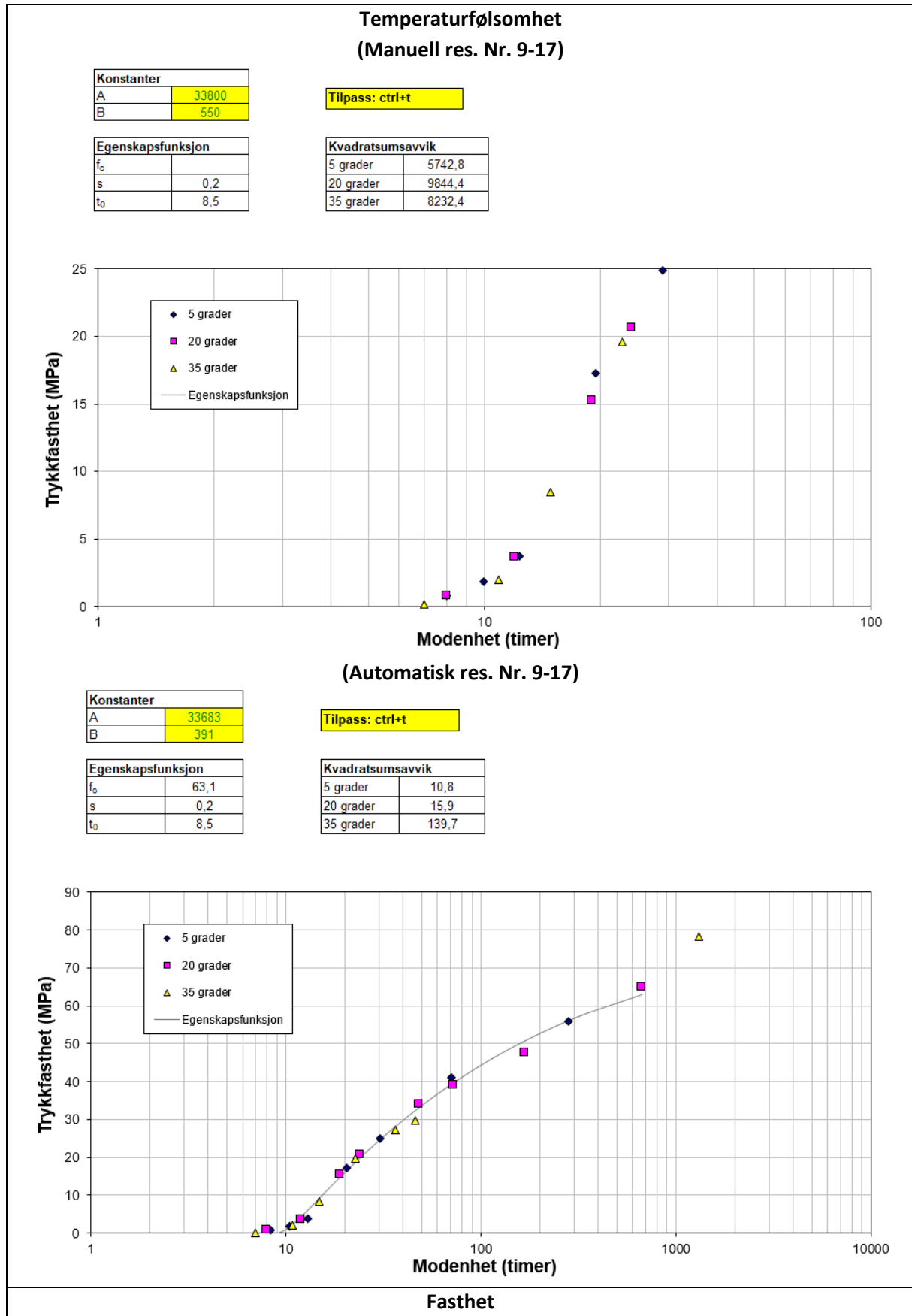
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.17 STD FA - B45 - M40 - 35%FA



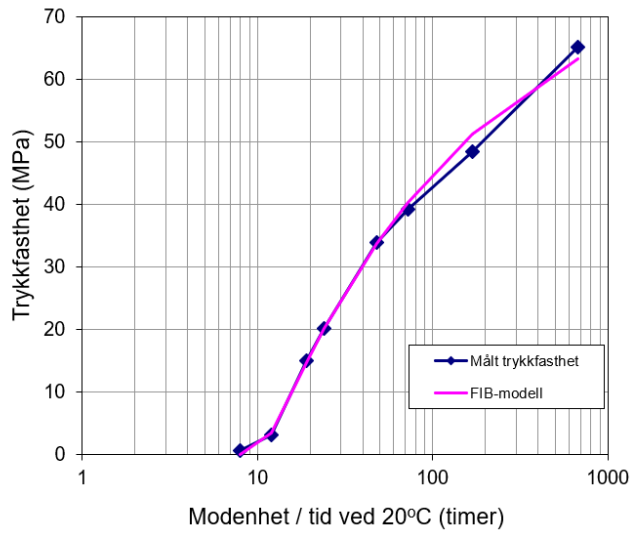
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{*+1}
0,33	8,0	0	0,7	-	-
0,50	12	3,4	3,2	5	0,2
0,79	19	14,8	15,1	5	0,4
1,00	24	20,1	20,2	5	0,0
2,00	48	33,7	34,0	5	0,4
3,00	72	40,3	39,3	1	1,0
7,00	168	51,3	48,5	1	8,0
28,00	672	63,3	65,3	1	3,8

f_{c28}	63,4
s	0,20
t_0	9,25
$\Sigma \Delta y^2$	14
R ²	0,9976

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2422
Varmekapasitet (fersk)	1,01
Varmekapasitet (herdet)	1,01
Sementinnhold	388
Avbindingstid	7,9
A - avbinding	33800
B - avbinding	440
A - herdefase	33800
B - herdefase	440
Adiabatisk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall:	0,0179
dQ/dm	0
m ₀	410
m _c	460

Varmefunksjon

$t_{e,mit}$	400
W_m	295,38
t_1	8,50
t_2	2,11
R^2	0,9361
ΔQ	4988

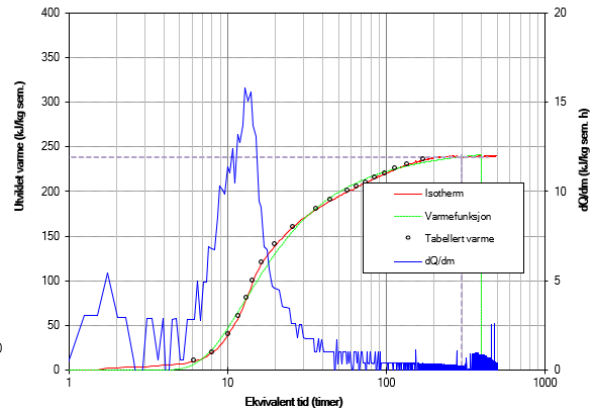
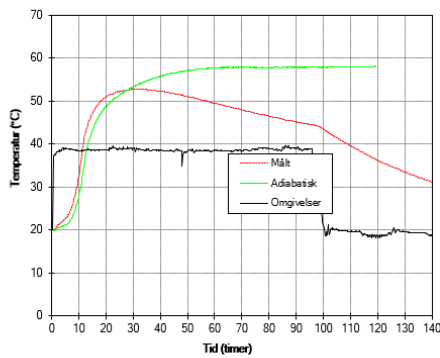
Tilpass varmetapstallet: $\langle C_{it} \rangle t$
Tilpass varmfunksjonen: $\langle C_{it} \rangle h$

Tabellert varme

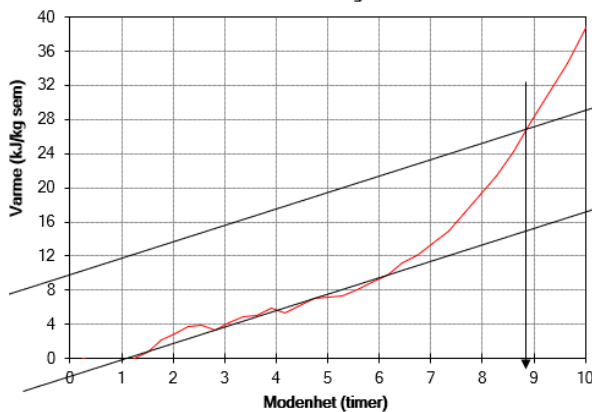
Varmemengde (kJ/kg)	Tilsvarende ekv. tid (h)
0	0,0
10	6,2
20	8,1
40	10,1
60	11,8
80	13,2
100	14,5
120	16,5
140	20,1
160	25,3
180	36,6
190	45,1
200	57,3
205	65,2
210	75,2
215	85,9
220	98,9
225	114,8
230	137,3
235	173,3

Karakteristisk varme

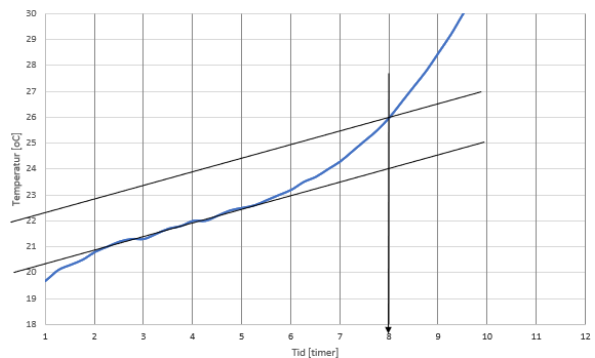
Ekv. tid (h)	Varme (kJ/kg)
300	238,5



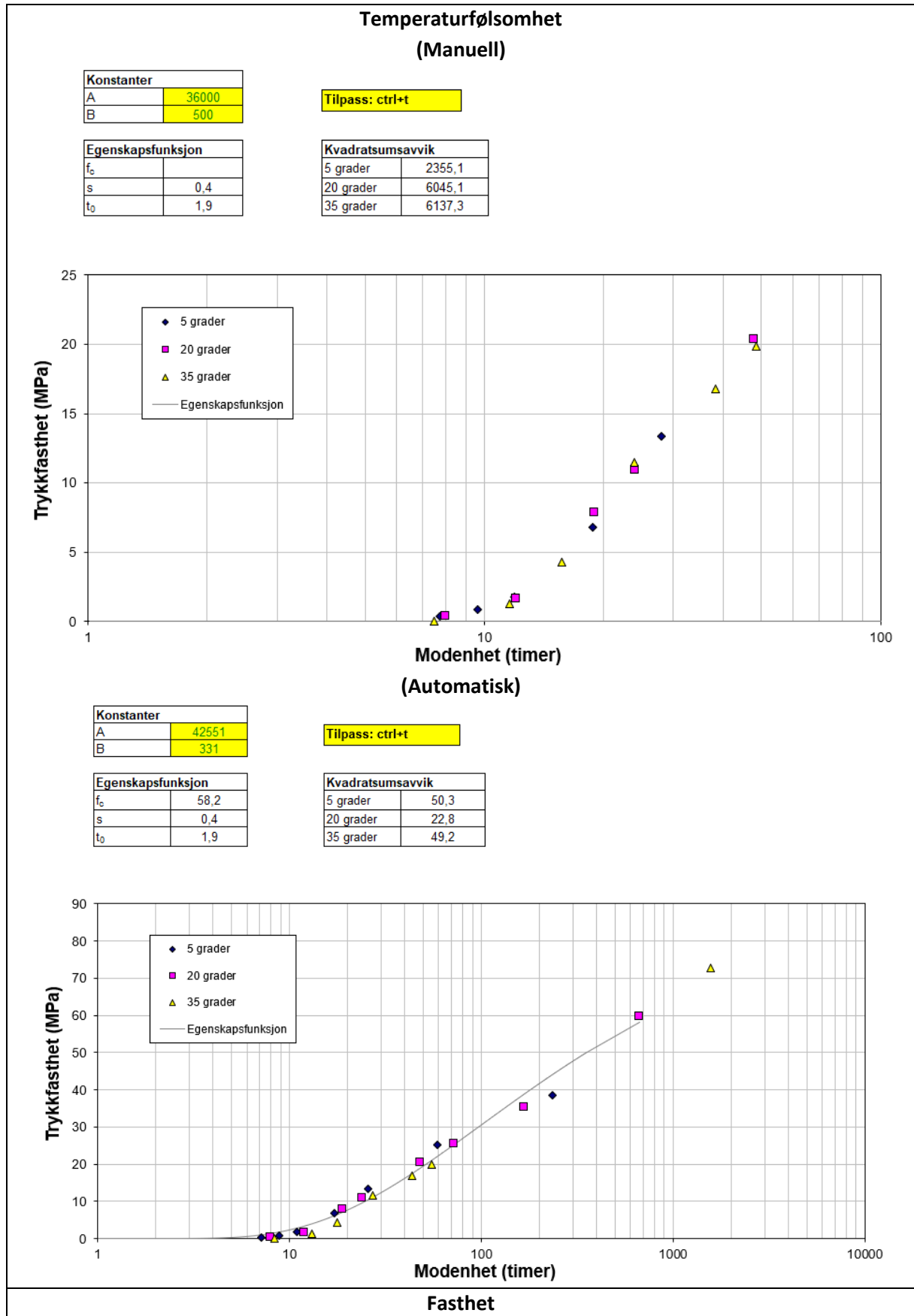
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.18 STD FA - B45 - M40 - 35%FA - 11%S



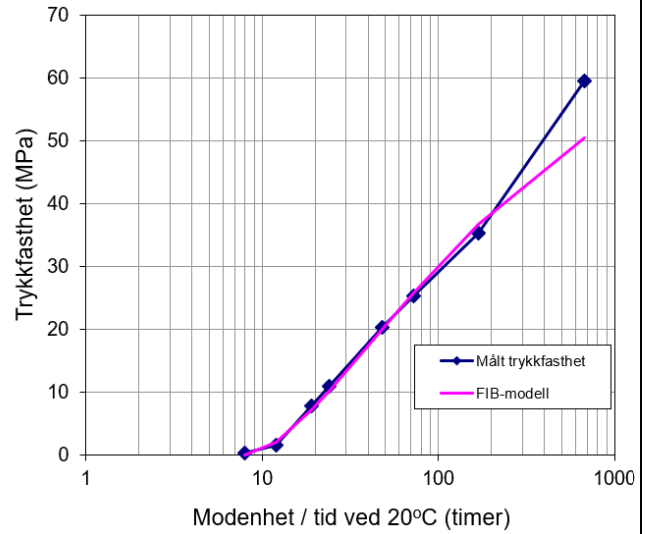
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{n+1}
0,33	8,0	0	0,4	-	-
0,50	12	2,2	1,6	30	9,5
0,79	19	7,2	7,8	20	9,2
1,00	24	10,2	11,0	10	5,1
2,00	48	20,1	20,3	10	0,7
3,00	72	25,8	25,4	10	1,5
7,00	168	36,8	35,4	10	21,9
28,00	672	50,5	59,6	1	82,8

f_{c28}	50,6
s	0,30
t_0	6,78
$\Sigma \Delta y^2$	131
R^2	0,9898

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2404
Varmekapasitet (fersk)	1,01
Varmekapasitet (herdet)	1,01
Sammenheng	349
Avbindingstid	8,5
A - avbinding	42551
B - avbinding	331
A - herdelase	42551
B - herdelase	331
Adiabatisk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall	0,0177
dQ/dm	0
m	560
m'	610

Varmefunksjon

te-limit	550
W _a	261,13
t ₁	11,69
k ₁	1,71
R ²	0,9961
t _{avg}	8282

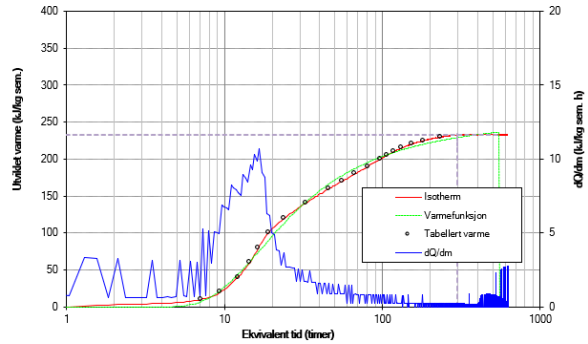
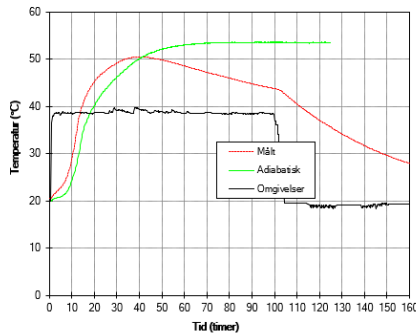
Tilpass varmetapstallet $\langle C_{fb} \cdot t$
Tilpass varmfunksjonen $\langle C_{fb} \cdot h$

Tabellert varme

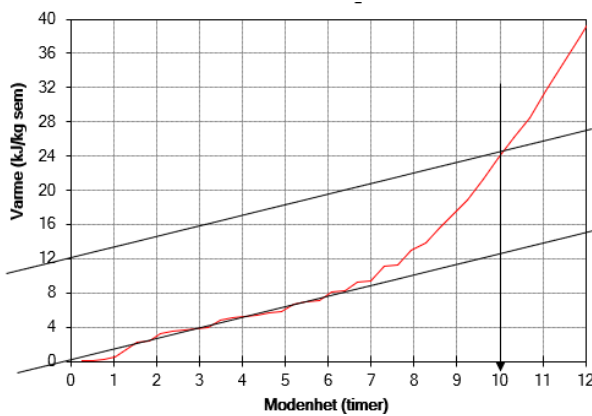
Varmemengde (kJ/kg)	Tilsvarende ekv. tid (h)
0	0,0
10	7,1
20	3,4
40	12,1
60	14,4
80	16,5
100	19,0
120	23,9
140	32,6
160	45,8
170	55,6
180	67,1
190	81,5
200	97,0
205	106,6
210	118,3
215	132,6
220	153,4
225	181,3
230	238,1

Karakteristisk varme

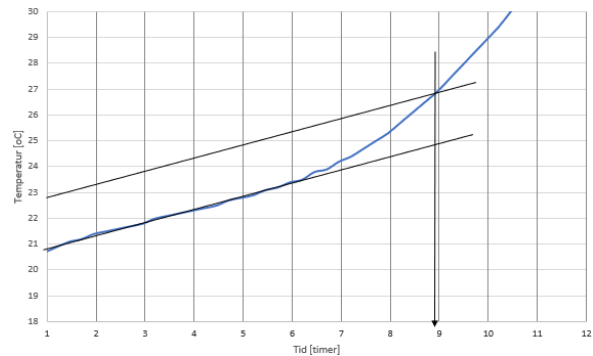
Ekv. tid (h)	Varme (kJ/kg)
300	232,2



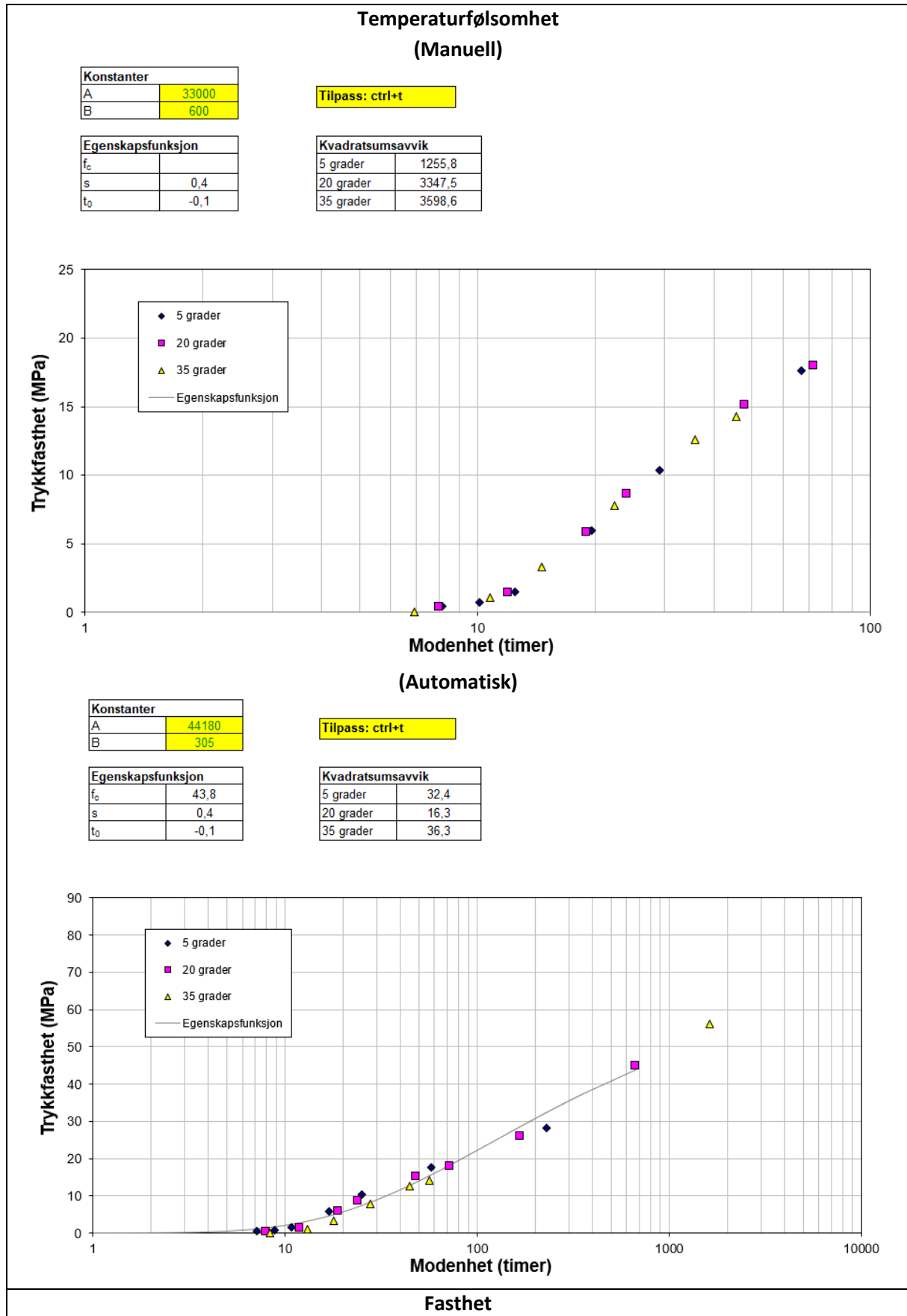
Avbindingstid 12kJ-metoden



Avbindingstid 2°C-metoden



12.3.19 STD FA - B35 - M45 - 35%FA - 11%S



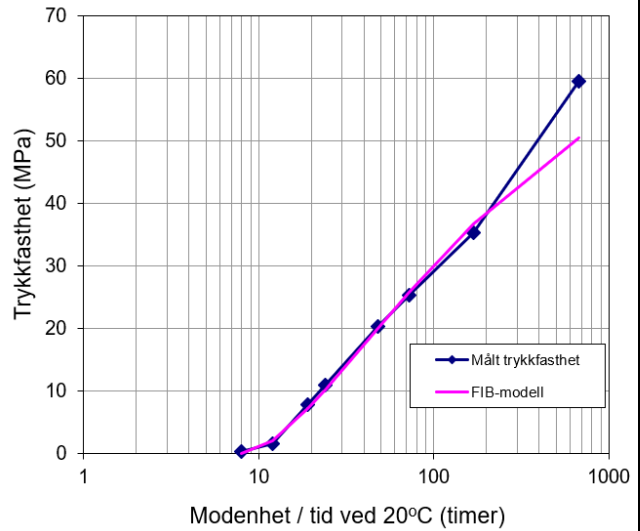
Tilpassning av formfunksjon - trykkfasthet

Tid (døgn)	Tid (timer)	FIB-modell	Målt trykkfasthet	Vekt ved avvik	Δy^{v+1}
0,33	8,0	0	0,4	-	-
0,50	12	2,2	1,6	30	9,5
0,79	19	7,2	7,8	20	9,2
1,00	24	10,2	11,0	10	5,1
2,00	48	20,1	20,3	10	0,7
3,00	72	25,8	25,4	10	1,5
7,00	168	36,8	35,4	10	21,9
28,00	672	50,5	59,6	1	82,8

f_{c28}	50,6
s	0,30
t_0	6,78
$\Sigma \Delta y^2$	131
R^2	0,9898

Tilpass

$$f_c(M) = f_{c28} \cdot e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{672}{M - t_0}} \right) \right]}$$



Varmeutvikling

Betongparametre

Densitet	2404
Varmekapasitet (fersk)	1,02
Varmekapasitet (herdet)	1,02
Sementinnhold	340
Avbindingstid	7,9
A · avbinding	44180
B · avbinding	305
A · herdefase	44180
B · herdefase	305
Adiabatisk starttemperatur	20

Varmetapstall

Varmetapstall:	0,0175
dQ/dm	0
m ₀	540
m _c	590

Varmefunksjon

$t_{e, \text{limit}}$	530
$W_{\#}$	278,94
t_1	12,00
κ_c	1,53
R^2	0,9974
$\Sigma \Delta Q$	6,225

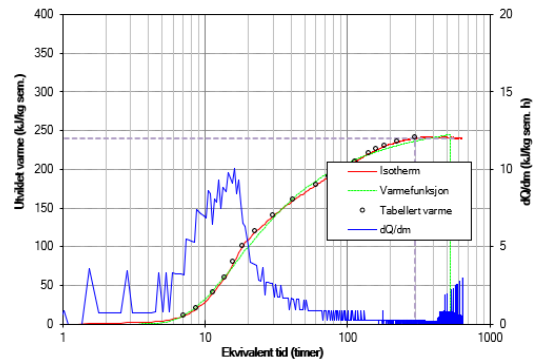
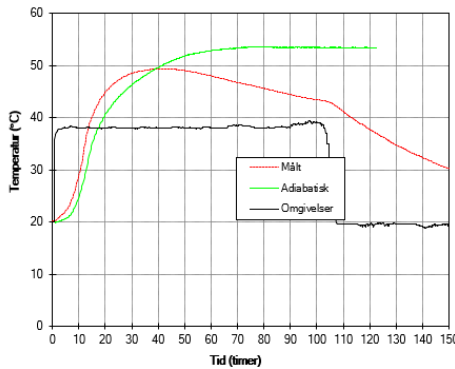
Tilpass varmetapstallet: $cGrb \cdot t$
Tilpass varmfunksjonen: $cGrb \cdot h$

Tabellert varme

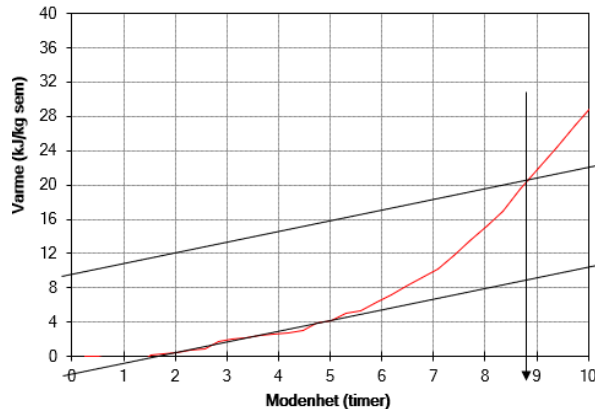
Varmemengde [kJ/kg]	Tilsvarende ekv. tid [h]
0	0,8
10	7,0
20	8,8
40	11,4
60	13,8
80	15,9
100	18,4
120	22,8
140	30,4
160	41,8
180	50,9
190	74,1
200	91,7
205	102,2
210	113,1
220	141,3
225	159,4
230	183,0
235	225,6
240	238,4

Karakteristisk varme

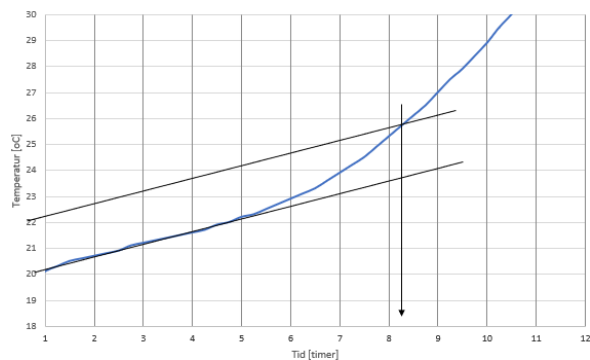
Ekv. tid [h]	Varme [kJ/kg]
300	239,8



Avbindingstid 12kJ-metoden

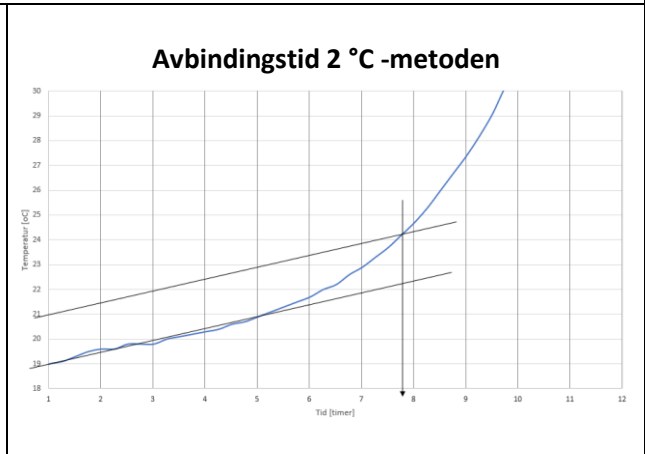
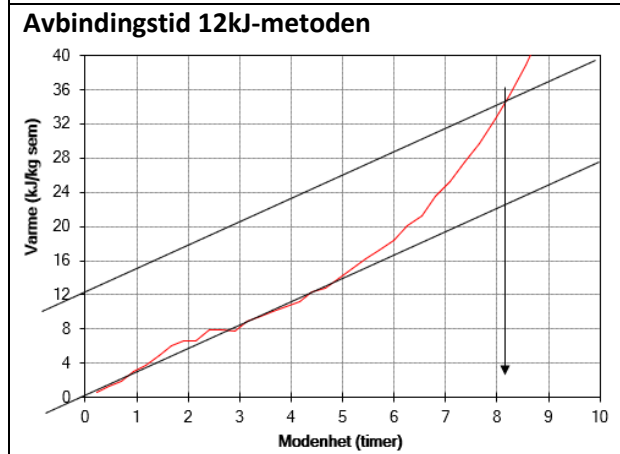
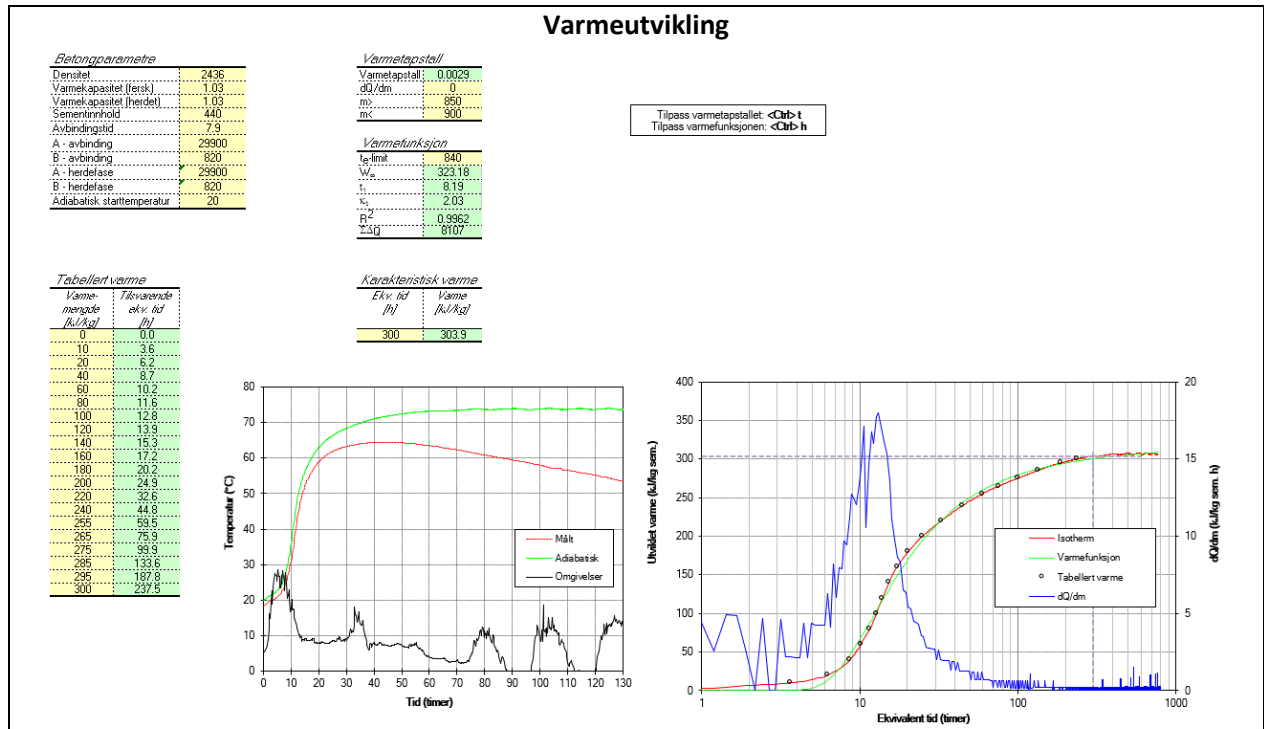


Avbindingstid 2°C-metoden

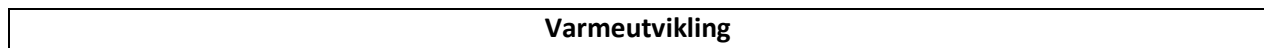


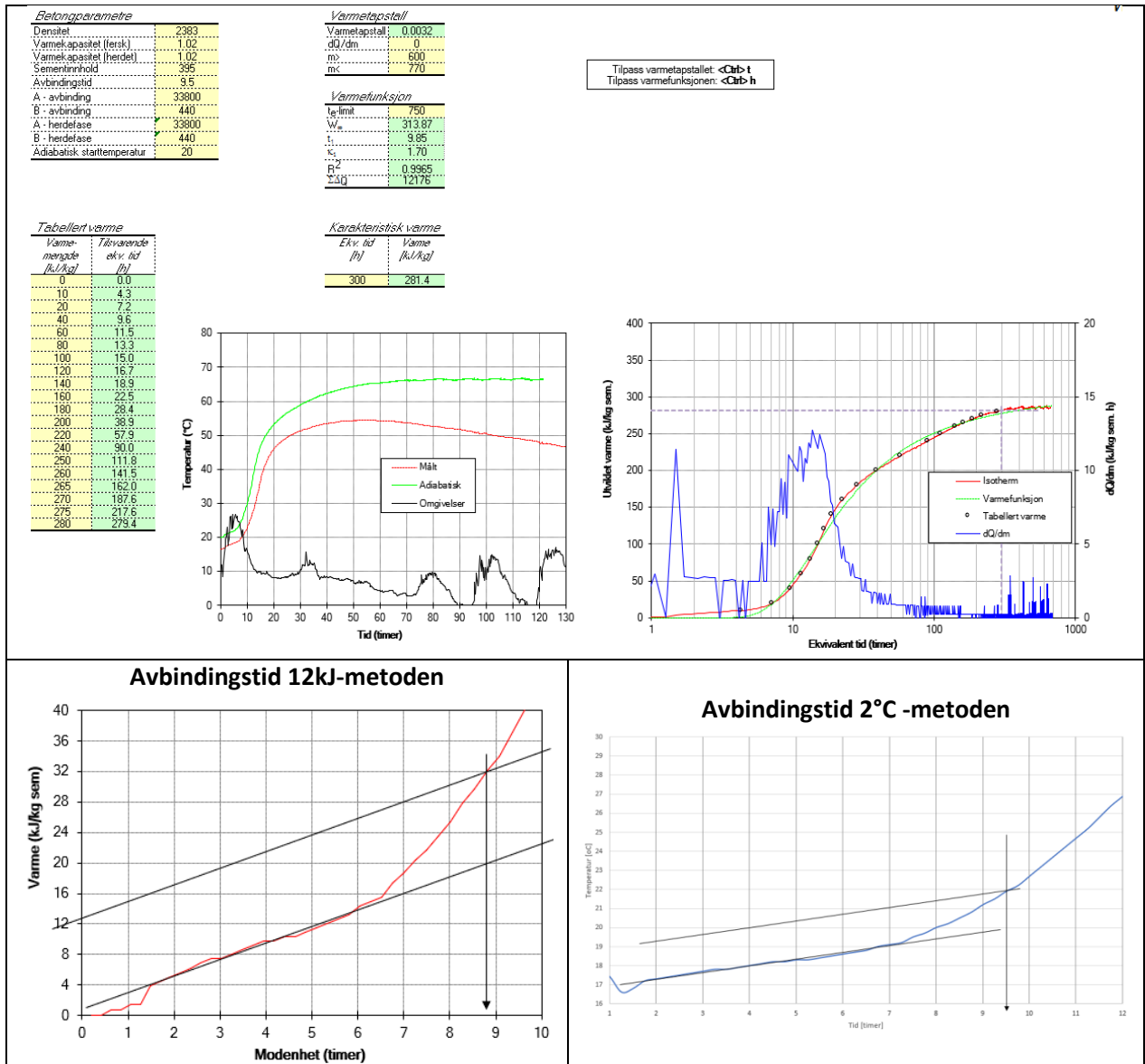
12.4 Kubikk herdekasse regneark resultatene

12.4.1 STD FA – B45 – M40 REF

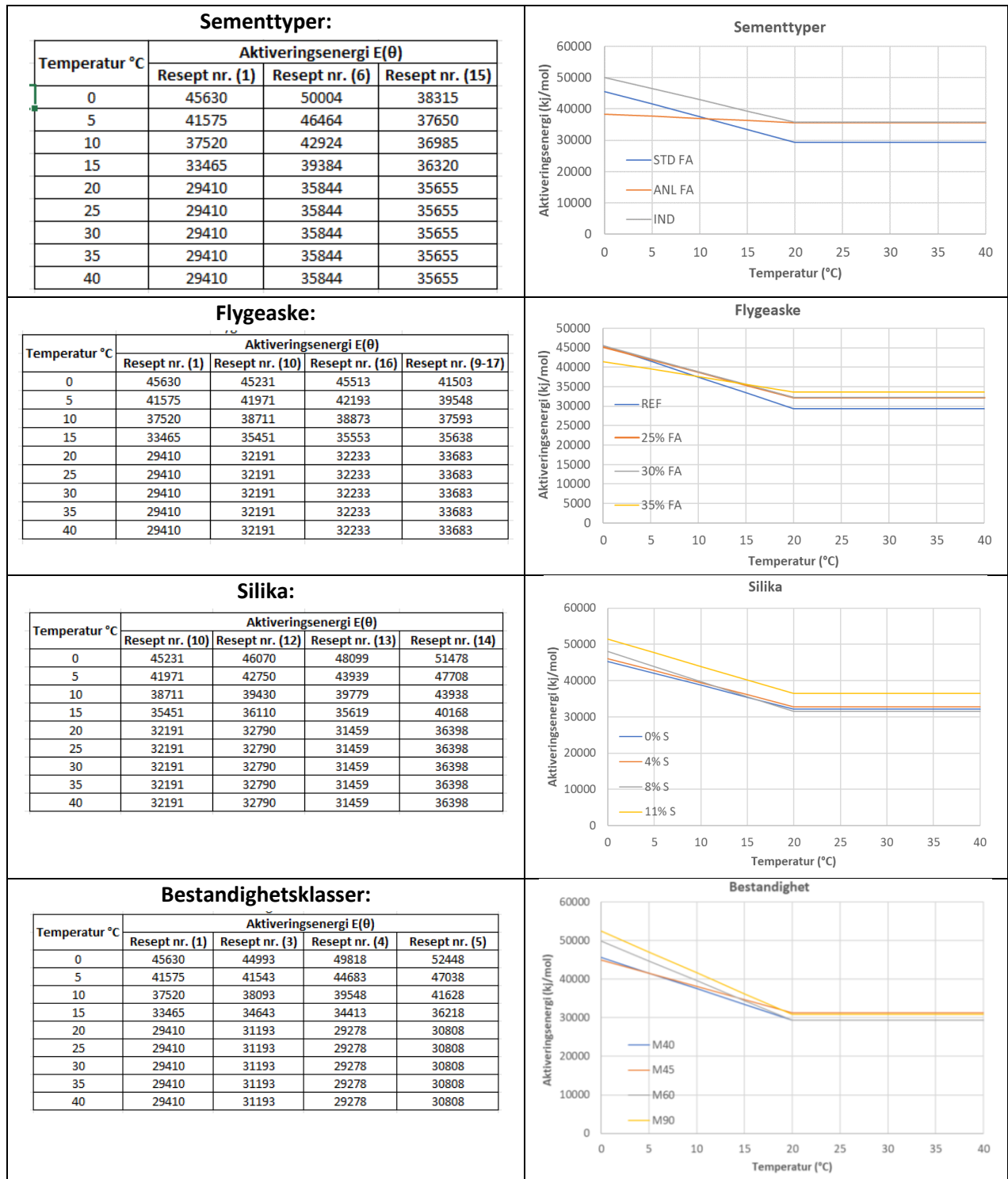


12.4.2 STD FA – B45 – M40 – 35%FA REF



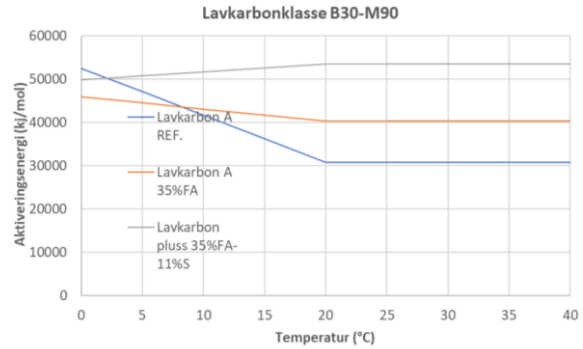


12.5 Aktiveringsenergi ved automatisk tilpasning av A og B



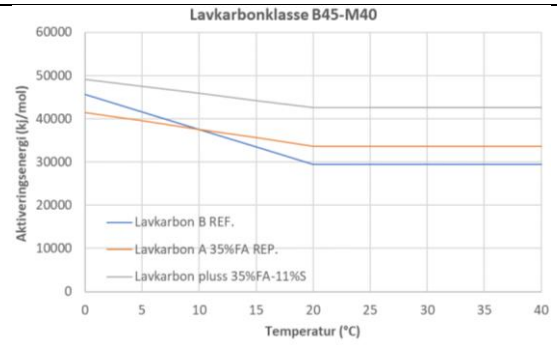
Lavkarbonklasse (B30-M90 betong):

Temperatur °C	Aktiveringsenergi E(θ)		
	Resept nr. (5)	Resept nr. (7)	Resept nr. (8)
0	52448	45906	49840
5	47038	44496	50740
10	41628	43086	51640
15	36218	41676	52540
20	30808	40266	53440
25	30808	40266	53440
30	30808	40266	53440
35	30808	40266	53440
40	30808	40266	53440



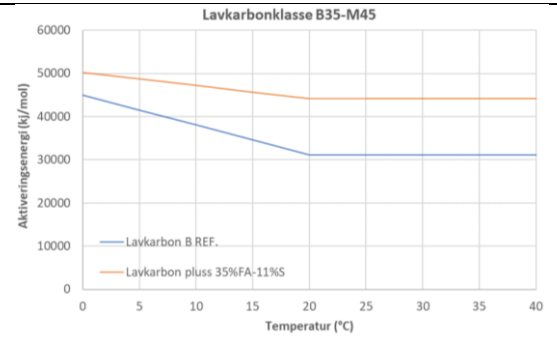
Lavkarbonklasse (B45-M40 betong):

Temperatur °C	Aktiveringsenergi E(θ)		
	Resept nr. (1)	Resept nr. (9-17)	Resept nr. (18)
0	45630	41503	49171
5	41575	39548	47516
10	37520	37593	45861
15	33465	35638	44206
20	29410	33683	42551
25	29410	33683	42551
30	29410	33683	42551
35	29410	33683	42551
40	29410	33683	42551



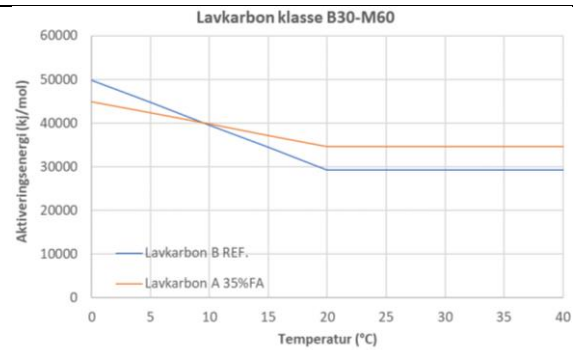
Lavkarbonklasse (B35-M45 betong):

Temperatur °C	Aktiveringsenergi E(θ)	
	Resept nr. (3)	Resept nr. (19)
0	44993	50280
5	41543	48755
10	38093	47230
15	34643	45705
20	31193	44180
25	31193	44180
30	31193	44180
35	31193	44180
40	31193	44180



Lavkarbonklasse (B30-M60 betong):

Temperatur °C	Aktiveringsenergi E(θ)	
	Resept nr. (4)	Resept nr. (11)
0	49818	44927
5	44683	42352
10	39548	39777
15	34413	37202
20	29278	34627
25	29278	34627
30	29278	34627
35	29278	34627
40	29278	34627



12.6 Trykkfasthet resultater med skalerende farge

Time	Temperatur	res 1	res 2	res 3	res 4	res 5	res 6	res 7	res 8	res 9	res 10	res 11	res 12	res 13	res 14	res 15	res 16	res 17	res 18	res 19
4	35 °C	0,38	0,49	0,26	0,30	0,35	2,13	0,29	0,00	0,35	0,27	0,23	0,35	0,23	0,18	1,22	0,25	0,00	0,00	0,00
6	35 °C	3,88	4,52	2,90	2,05	2,04	18,66	1,21	0,93	2,53	2,29	1,54	2,56	1,74	1,64	5,37	2,36	1,41	1,30	1,03
8	20 °C	0,89	1,27	0,99	0,78	0,94	4,32	0,43	0,30	0,90	0,82	0,66	0,76	0,64	0,52	1,61	0,78	0,68	0,37	0,34
8	35 °C	12,42	16,48	9,75	6,97	5,84	35,02	3,08	2,45	9,62	10,92	5,55	9,91	7,16	6,00	11,82	9,38	7,26	4,28	3,30
12	20 °C	5,13	6,46	4,65	3,49	3,29	22,26	1,41	0,98	4,02	4,22	2,70	3,60	3,27	2,56	6,02	4,02	3,25	1,60	1,39
12	35 °C	28,59	30,68	22,29	16,24	11,33	45,90	6,68	5,15	20,57	24,40	13,30	21,16	18,29	16,01	23,35	21,68	18,55	11,51	7,78
19	5 °C	1,00	0,98	0,74	0,54	0,48	2,89	0,32	0,25	0,94	0,77	0,44	0,85	0,61	0,48	1,40	0,74	0,60	0,35	0,44
19	20 °C	24,07	24,00	17,30	14,32	10,10	46,36	4,59	3,28	15,49	17,80	9,42	17,20	13,90	11,47	15,93	17,21	15,07	7,85	5,81
19	35 °C	38,30	38,63	30,67	22,33	16,40	53,26	9,73	7,46	27,46	32,93	19,33	29,52	25,43	23,27	35,33	30,35	27,23	16,82	12,62
24	5 °C	2,27	2,82	1,78	1,28	1,09	6,42	0,69	0,49	2,12	2,00	1,02	1,53	1,28	1,07	2,83	1,79	1,51	0,85	0,74
24	20 °C	30,72	31,55	25,35	18,01	13,32	51,12	6,71	4,50	21,09	26,45	13,70	23,00	18,75	16,05	21,40	23,46	20,15	10,95	8,58
24	35 °C	40,12	40,00	33,70	24,87	18,11	55,62	10,95	8,21	30,05	35,75	20,50	33,11	28,90	25,50	37,85	32,74	29,65	19,87	14,24
30	5 °C	5,20	6,52	3,71	2,62	2,09	14,89	1,12	0,89	4,18	4,17	2,17	3,65	2,76	2,34	5,13	3,79	3,24	1,78	1,46
2 dager	5 °C	21,70	21,35	15,45	9,96	7,38	40,28	3,96	2,64	15,03	16,80	8,18	15,13	12,01	8,93	16,00	16,32	13,55	6,80	5,93
2 dager	20 °C	47,25	47,70	36,27	28,40	20,93	62,75	12,05	8,73	34,23	42,25	24,05	36,97	32,00	27,41	42,65	38,26	34,00	20,32	15,1
3 dager	5 °C	38,55	38,15	28,89	19,85	13,24	57,40	7,85	5,57	25,21	31,60	16,16	27,20	21,64	18,15	29,99	26,35	24,55	13,36	10,35
3 dager	20 °C	53,90	53,70	43,40	32,95	24,22	66,05	14,45	10,68	38,80	47,85	28,26	42,45	37,21	33,15	50,63	44,35	39,29	25,42	17,975
7 dager	5 °C	57,00	54,05	47,60	34,65	23,90	73,60	14,40	9,90	40,70	48,65	29,00	43,10	37,60	32,05	53,65	45,79	41,58	25,15	17,6
7 dager	20 °C	61,95	61,60	51,60	39,85	29,50	72,30	18,55	14,20	46,95	56,50	34,58	51,70	47,85	43,35	63,80	52,21	48,51	35,35	25,9
28 dager	5 °C	72,20	74,55	61,40	47,90	34,95	81,45	20,95	16,20	55,68	65,70	41,35	58,25	52,70	47,90	80,35	62,15	55,95	38,65	28,3
28 dager	20 °C	74,25	68,25	63,00	50,15	38,35	78,30	27,15	26,50	64,45	73,13	49,10	70,60	72,90	69,50	86,85	68,95	65,25	59,6	44,9
28 dager	35 °C	76,05	78,75	68,65	56,15	44,05	76,25	36,95	37,25	77,88	80,94	60,15	77,95	77,50	74,20	91,20	83,70	78,90	72,85	56,25

12.7 Produktdatablad og analyserapport

Produktdatablad Standardsement FA

PRODUKTDATABLAD

STANDARDSEMENT FA

CEM II/B-M(V-L) 42,5 R

SIST REVIDERT OKTOBER 2022

Sementen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portland blandingssement CEM II/B-M (V-L) 42,5 R.


Egenskap		Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m^2/kg)		450	
Spesifikk vekt (kg/dm^3)		3,00	
Volumbestandighet (mm)		1	≤ 10
Begynnende størkning (min)		150	≥ 60
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	19	
	2 døgn	29	≥ 20
	7 døgn	40	
	28 døgn	53	$\geq 42,5 \leq 62,5$
Sulfat (% SO_3)		$\leq 4,0$	$\leq 4,0$
Klorid (% Cl^-)		$\leq 0,085$ (B) / $\leq 0,05$ (K)	$\leq 0,10$
Vannløselig krom (ppm Cr^{6+})		≤ 2	$\leq 2^1$
Alkalier (% Na_2O_{ekv})		14 (B) / 15 (K)	
Klinker (%)		76	65-79
Flygeaske (%)		18	21-35
Kalksteinsfiller (%)		6	

1. I henhold til EU forordning REACH Vedlegg XVII point 47 krom VI forbindelser.
B = Brevik og K = Kjølsvik

NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS, Postboks 142, Lilleaker, 0216 Oslo
Tlf. 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no

Analyserapport av Standardsement FA batchen benyttet i dette prosjektet


REPORT ON QUALITY TEST				
Customer:	FoU	Your ref.:	2020-113	
Date received:	11.01.2023	Our ref.:	AI-2023-0001	
Sample Marked:	Standard FA CEM II/B-M 42.5 R Big bag pakket 05.01.2023			
Parameter:		Results:		Method:
CHEMICAL COMPOSITION				
Chemical Parameters				
Fly Ash		17.2	%	PD1748
Free Lime		1.78	%	PD0468
Loss On Ignition	LOI	3.93	%	EN196-2
Sulfur Trioxide-IR	SO3	3.01	%	PD1752
Total Chloride	Cl	0.058	%	EN196-2
XRD Analysis				
Limestone		5.70	%	
XRF Analysis				
Silica Oxide	SiO2	23.94	%	EN196-2
Aluminium Oxide	Al2O3	7.67	%	EN196-2
Ferric Oxide	Fe2O3	3.88	%	EN196-2
Calcium Oxide	CaO	52.83	%	EN196-2
Potassium Oxide	K2O	1.007	%	EN196-2
Sodium Oxide	Na2O	0.384	%	EN196-2
Magnesium Oxide	MgO	2.25	%	EN196-2
Titanium Dioxide	TiO2	0.448	%	EN196-2
Phosphorous Pentoxide	P2O5	0.315	%	EN196-2
Manganic Oxide	Mn2O3	0.304	%	EN196-2
Chloride	Cl	0.048	%	EN196-2
Sodium Oxide Equivalent	Na2O Eq.	1.05	%	EN196-2
TECHNICAL PARAMETERS				
Compressive Strength				
After 1 day		20.9	MPa	EN196-1
After 2 days		29.3	MPa	EN196-1
After 7 days		39.8	MPa	EN196-1
After 28 days		50.1	MPa	EN196-1
Fineness				
Specific surface, Blaine		452	m ² /kg	EN196-6
Particle Size Distribution				
Sieve Passing	<24 µm	78.1	%	PD1749
Sieve Passing	<30 µm	86.4	%	PD1749
Sieve Residue	>64 µm	0.1	%	PD1749
Sieve Residue	>90 µm	0.0	%	PD1749
Quantile d(95)	d(0.95)	40.5	µm	PD1749
Other Technical Parameters				
False Set		4	min	PD1793
Time of Setting				
Initial		162	min	EN196-3
Soundness				
Le Chatelier		1.0	mm	EN196-3
Normal Consistency				
Temperate climate 20°C		29.9	%	EN196-3
Norcem A.S Brevik, Cement and Concrete Laboratory,	10.02.2023	 Laboratory Manager		
NORCEM AS				

Produktdatablad Anleggsement FA

PRODUKTDATABLAD

ANLEGGSEMENT FA

CEM II/A-V

SIST REVIDERT JUNI 2020

Sementen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portland-flygeaskesement CEM II/A-V 42,5 N.

Egenskap		Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m ² /kg)		390	
Spesifikk vekt (kg/dm ³)		3,02	
Volumbestandighet (mm)		1	≤ 10
Begynnende størkning (min)		165	≥ 60
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	12	
	2 døgn	21	≥ 10
	7 døgn	37	
	28 døgn	53	≥ 42,5 ≤ 62,5
Sulfat (% SO ₃)		≤ 3,5	≤ 3,5
Klorid (% Cl ⁻)		≤ 0,07	≤ 0,10
Vannløselig krom (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalier (% Na ₂ Oekv) ²		0,5	
Klinker (%)		81	80-94
Flygeaske (%)		15	6-20
Kalkmel (sekundær bestanddel %)		4	< 5


1. I henhold til EU forordning REACH Vedlegg XVII punkt 47 krom VI-forbindelser.

2. Alkaliinnholdet av sementen fratrukket alkalibidraget fra flygeaskedelen (iht. NB21 pkt. 4.4 og bruk av den generelle grensen på 2,5 kg Na₂Oekv./m³ betong). I betong beregnes alkalibidraget fra sementdelen slik: Sementmengde (kg/m³) x 0,5%

NORCEM
HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS, Postboks 142 Lilleaker, 0216 Oslo
Tlf. 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no

Analyserapport av Anleggsement FA batchen benyttet i dette prosjektet


REPORT ON QUALITY TEST				
Customer:	FoU		Your ref.:	
Date received:	13.01.2023		Our ref.:	TF-2023-0001
Sample Marked:	Anlegg FA - CEM III/A-V 42.5 N Big bag 1, CM 6 12.01.2023			
Parameter:		Results:		Method:
CHEMICAL COMPOSITION				
Chemical Parameters				
Fly Ash		12.4 %		PD1748
Free Lime		2.63 %		PD0468
Sulfur Trioxide-IR	SO3	3.13 %		PD1752
Total Chloride	Cl	0.009 %		EN196-2
Water soluble Chromium	Cr(VI)	0.00 mg/kg		EN196-10
XRD Analysis				
Limestone		3.72 %		
XRF Analysis				
Silica Oxide	SiO2	23.26 %		EN196-2
Aluminium Oxide	Al2O3	6.17 %		EN196-2
Ferric Oxide	Fe2O3	3.48 %		EN196-2
Calcium Oxide	CaO	56.96 %		EN196-2
Potassium Oxide	K2O	0.458 %		EN196-2
Sodium Oxide	Na2O	0.309 %		EN196-2
Magnesium Oxide	MgO	2.32 %		EN196-2
Titanium Dioxide	TiO2	0.372 %		EN196-2
Phosphorous Pentoxide	P2O5	0.442 %		EN196-2
Manganic Oxide	Mn2O3	0.959 %		EN196-2
Chloride	Cl	0.009 %		EN196-2
Sodium Oxide Equivalent	Na2O Eq.	0.61 %		EN196-2
TECHNICAL PARAMETERS				
Compressive Strength				
After 1 day		11.9 MPa		EN196-1
After 2 days		22.5 MPa		EN196-1
After 7 days		39.7 MPa		EN196-1
After 28 days		54.0 MPa		EN196-1
Fineness				
Specific surface, Blaine		398 m ² /kg		EN196-6
Particle Size Distribution				
Sieve Passing	<24 µm	73.5 %		PD1749
Sieve Passing	<30 µm	82.1 %		PD1749
Sieve Residue	>64 µm	0.5 %		PD1749
Sieve Residue	>90 µm	0.0 %		PD1749
Quantile d(95)	d(0.95)	46.0 µm		PD1749
Other Technical Parameters				
False Set		3 min		PD1793
Time of Setting				
Initial		166 min		EN196-3
Soundness				
Le Chatelier		5.5 mm		EN196-3
Normal Consistency				
Temperate climate 20°C		28.9 %		EN196-3
Norcem A.S Brevik, Cement and Concrete Laboratory,	15.03.2023			Laboratory Manager

NORCEM AS

Produktdatablad Industrisement

PRODUKTDATABLAD
INDUSTRISEMENT
CEM I 52,5 R
 SIST REVIDERT MARS 2021

Sementen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til Portlandsement CEM I 52,5 R.


Egenskap		Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m ² /kg)		550	
Spesifikk vekt (kg/dm ³)		3,13	
Volumbestandighet (mm)		1	≤ 10
Begynnendestørkning (min)		110	≥ 45
Trykkfasthet (MPa)	1 døgn	33	
	2 døgn	41	≥ 30
	7 døgn	50	
	28 døgn	59	≥ 52,5
Sulfat (% SO ₃)		≤ 4,0	≤ 4,0
Klorid (% Cl ⁻)		≤ 0,085 (B) / ≤ 0,05 (K)	≤ 0,10
Vannløselig krom (ppm Cr ⁶⁺)		≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalier (% Na ₂ O _{ekv})		1,3	
Klinker (%)		96	95-100
Sekundærestanddeler (%)		4	0-5

1. I henhold til EU forordning REACH Vedlegg XVII punkt 47 krom VI forbindelser.

NORCEM
 HEIDELBERGCEMENT Group

Norcem AS, Postboks 142, Lilleaker, 0216 Oslo
 Tlf. 22 87 84 00 firmapost@norcem.no www.norcem.no

Analyserapport av Industrisement batchen benyttet i dette prosjektet

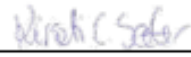

REPORT ON QUALITY TEST				
Customer:	FoU	Your ref.:	2020-113	
Date received:	11.01.2023	Our ref.:	CL-2023-0001	
Sample Marked:	Industri CEM I 52.5 R Big bag pakket 28.11.2022			
Parameter:		Results:		Method:
CHEMICAL COMPOSITION				
Chemical Parameters				
Free Lime		1.85	%	PD0468
Loss On Ignition	LOI	2.46	%	EN196-2
Sulfur Trioxide-IR	SO3	3.97	%	PD1752
Limestone Content		5.0	%	PD1752
Total Chloride	Cl	0.050	%	EN196-2
Water soluble Chromium	Cr(VI)	0.00	mg/kg	EN196-10
Insoluble Residue	I.R	0.62	%	EN196-2
XRF Analysis				
Silica Oxide	SiO2	19.15	%	EN196-2
Aluminium Oxide	Al2O3	4.80	%	EN196-2
Ferric Oxide	Fe2O3	3.24	%	EN196-2
Calcium Oxide	CaO	61.69	%	EN196-2
Potassium Oxide	K2O	1.110	%	EN196-2
Sodium Oxide	Na2O	0.441	%	EN196-2
Magnesium Oxide	MgO	2.49	%	EN196-2
Titanium Dioxide	TiO2	0.364	%	EN196-2
Phosphorous Pentoxide	P2O5	0.129	%	EN196-2
Manganic Oxide	Mn2O3	0.157	%	EN196-2
Chloride	Cl	0.046	%	EN196-2
Sodium Oxide Equivalent	Na2O Eq.	1.17	%	EN196-2
TECHNICAL PARAMETERS				
Compressive Strength				
After 1 day		31.7	MPa	EN196-1
After 2 days		40.0	MPa	EN196-1
After 7 days		48.3	MPa	EN196-1
After 28 days		55.6	MPa	EN196-1
Fineness				
Specific surface, Blaine		575	m2/kg	EN196-6
Particle Size Distribution				
Sieve Passing	<24 µm	87.1	%	PD1749
Sieve Passing	<30 µm	93.7	%	PD1749
Sieve Residue	>64 µm	0.0	%	PD1749
Sieve Residue	>90 µm	0.0	%	PD1749
Quantile d(95)	d(0.95)	31.6	µm	PD1749
Other Technical Parameters				
False Set		3	min	PD1793
Time of Setting				
Initial		103	min	EN196-3
Soundness				
Le Chatelier		1.0	mm	EN196-3
Normal Consistency				
Temperate climate 20°C		32.0	%	EN196-3
Norcem A.S Brevik, Cement and Concrete Laboratory, 01.03.2023  Laboratory Manager				
NORCEM AS				

Analyserapport av flyveaske batchene benyttet i dette prosjektet

NORCEM
 HEIDELBERGCEMENT Group

REPORT ON QUALITY TEST				
Customer	Petter Thyholdt		Your ref.: 81-22	
Received date			Our ref.: LN-2022-0021	
Sample Marked	Flyveaske			
	1000 kg Flyveaske tatt ut 07.09.22 12:30			
Parameter:		Results:		Method:
CHEMICAL COMPOSITION				
Chemical Parameters				
Sulfur Trioxide-IR	SO ₃	0.40 %		PD1752
Carbon	C	2.84 %		PD1752
Loss On Ignition	LOI	3.03 %		EN196-2
XRF Analysis				
Silica Oxide	SiO ₂	56.24 %		EN196-2
Aluminium Oxide	Al ₂ O ₃	22.71 %		EN196-2
Ferric Oxide	Fe ₂ O ₃	6.02 %		EN196-2
Calcium Oxide	CaO	4.44 %		EN196-2
Potassium Oxide	K ₂ O	1.738 %		EN196-2
Sodium Oxide	Na ₂ O	0.786 %		EN196-2
Magnesium Oxide	MgO	2.09 %		EN196-2
Titanium Dioxide	TiO ₂	0.861 %		EN196-2
Phosphorous Pentoxide	P ₂ O ₅	0.681 %		EN196-2
Manganic Oxide	Mn ₂ O ₃	0.068 %		EN196-2
Chloride	Cl	0.004 %		EN196-2
Chromium Oxide	Cr ₂ O ₃	0.013 %		EN196-2
Zinc Oxide	ZnO	0.016 %		EN196-2
Strontium Oxide	SrO	0.160 %		EN196-2
Sodium Oxide Equivalent	Na ₂ O Eq.	1.93 %		EN196-2
TECHNICAL PARAMETERS				
Fineness				
Specific Weight		2.32 g/cm ³		PD1777
Specific surface, Blaine		356 m ² /kg		EN196-6
Particle Size Distribution				
Sieve Passing	-45 µm	83.3 %		PD1749
Norcem A.S Brevik, Cement and Concrete Laboratory,		26.09.2022		_____ Laboratory Manager

REPORT ON QUALITY TEST

Customer	Dalen fabrikk	Your ref.:
Received date		Our ref.: LN-2021-0005
Sample Marked	Flyveaske til forsendelse 1 big bag tatt ut 27.04.21	
Parameter:	Results:	Method:
CHEMICAL COMPOSITION		
Chemical Parameters		
Sulfur Trioxide-IR	SO ₃ 0.28 %	PD1752
Carbon	C 1.34 %	PD1752
Loss On Ignition	LOI 1.53 %	EN198-2
XRF Analysis		
Silica Oxide	SiO ₂ 60.08 %	EN198-2
Aluminium Oxide	Al ₂ O ₃ 22.62 %	EN198-2
Ferric Oxide	Fe ₂ O ₃ 5.88 %	EN198-2
Calcium Oxide	CaO 4.73 %	EN198-2
Potassium Oxide	K ₂ O 2.17 %	EN198-2
Sodium Oxide	Na ₂ O 0.65 %	EN198-2
Magnesium Oxide	MgO 1.74 %	EN198-2
Titanium Dioxide	TiO ₂ 1.001 %	EN198-2
Phosphorous Pentoxide	P ₂ O ₅ 0.472 %	EN198-2
Manganic Oxide	Mn ₂ O ₃ 0.111 %	EN198-2
Chloride	Cl 0.000 %	EN198-2
Chromium Oxide	Cr ₂ O ₃ 0.017 %	EN198-2
Zinc Oxide	ZnO 0.030 %	EN198-2
Strontium Oxide	SrO 0.116 %	EN198-2
Sodium Oxide Equivalent	Na ₂ O Eq. 2.08 %	EN198-2
TECHNICAL PARAMETERS		
Fineness		
Specific Weight	2.22 g/cm ³	PD1777
Specific surface, Blaine	349 m ² /kg	EN198-6
Particle Size Distribution		
Sieve Passing	-45 µm 78.5 %	PD1749
Norcem A.S Brevik, Cement and Concrete Laboratory,		07.10.2021
		 Laboratory Manager

Produktdatablad av SX-23**TEKNISKE DATA (typiske verdier)****PRODUKTBEKRIVELSE**

Form:	væske
Farge:	gulbrun
Viskositet:	lettflytende; <30 mPa·s
Tørrestoffinnhold (%):	23,0 ± 1,1
Densitet (g/cm³):	1,05 ± 0,02
pH:	6 ± 1
Kloridinnhold (%):	< 0,05
Alkaliinnhold (Na₂O-ekvivalenter) (%):	< 2,0



Produktdatablad av Elkem Microsilica



Product Data Sheet ELKEM MICROSILICA® 940, revision no 01, April 2023

Product Data Sheet

ELKEM MICROSILICA® 940

Concrete applications

Elkem ASA Silicon Products
 Drammensveien 169 P.O. Box 334
 Skøyen NO-0213 OSLO
 Fax: +47 22 45 01 11
 www.elkem.com

Description ELKEM MICROSILICA® 940 is a dry silica fume powder. In use, ELKEM MICROSILICA® 940 improves the properties and performance of high performance concrete and specialist mortar formulations.

It acts physically to optimise particle packing of the mixture, and chemically as a highly reactive pozzolan.

ELKEM MICROSILICA® 940 is available in two forms: Undensified (U) with a typical bulk density of 200 to 350 kg/m³ and Densified (D) with a typical bulk density of 500 to 700 kg/m³.


**Chemical &
physical data**

Property	Unit	Value
SiO ₂	%	Minimum 90.0
H ₂ O (when packed)	%	Maximum 1.0
Loss of ignition	%	Maximum 3.0
Retained on 45µm	%	Maximum 1.5*
Bulk density U	kg/m ³	200 - 350
Bulk density D	kg/m ³	500 - 700

Test methods are available on request. For typical analysis of minor elements, please contact our Elkem representative.

**Tested on undensified*

Analyserapport av sand og pukk benyttet i dette prosjektet



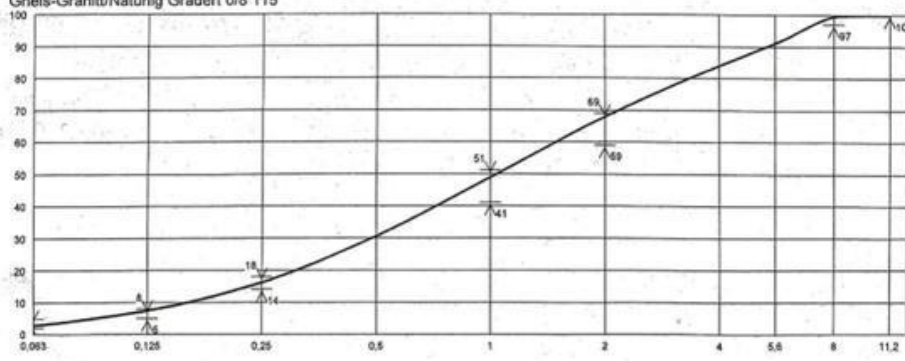
NORSTONE
HEIDELBERGCEMENT Group

Dato:	14.01.2022	Kunde:	Norcem AS
Materiale:	0/8 mm System 2+	Havn:	Brevik
Varenr:	101718-115	Båt:	
Følgeseddel nr:			
Test	NS-EN 933-1	Laboratorium	NorStone Årdal
Identifikasjon av prøven	0/8 mm 115	Operatør	Sæbø
Dato mottatt/uttatt	14.01.2022	Dato utført	14.01.2022
Metod (angi)	<input type="checkbox"/> Vasking og sikting <input checked="" type="checkbox"/> Tørrsikting	Standard	NS-EN 12620
		Sertifikat:	1111-CPD-0007
		Produksjonssted	NorStone Årdal

Total tørr masse $M_1 =$ 437,0 g
 Tørr masse etter vasking $M_2 =$ g
 Tørr masse av Finstoff fjernet ved vasking $M_1 - M_2 =$ g
 Vanninnhold (%) NS 1097-5 =

Sikteåpning (mm)	Masse tilbakehold (g)	Prosentandel (%)	Gjennomgang			
			Akkumulert Prosentandel (%)	Idealkurve (%)	Min (%)	Max (%)
11,2			100,0	100,0	100,0	
8	2,5	0,6	99,4	99,0	97,0	100,0
5,6	36,1	8,3	91,2	90,0		
4	31,6	7,2	83,9	80,0		
2	69,6	16,0	68,0	64,0	59,0	69,0
1	83,0	19,0	48,9	46,0	41,0	51,0
0,5	79,8	18,3	30,6	28,0		
0,25	63,1	14,5	16,2	16,0	14,0	18,0
0,125	38,3	8,8	7,4	7,0	5,0	8,0
0,063	19,7	4,5	2,9	3,0	2,0	5,0
< 0,063	12,6	2,9				
Sum	436,3	100,0	0,2	< 1% Prosentats materiale tap		

Gneis-Granitt/Naturlig Gradert 0/8 115



14.01.2022	Gro Sæbø
Dato	Signatur



NORSTONE
HEIDELBERGCEMENT Group

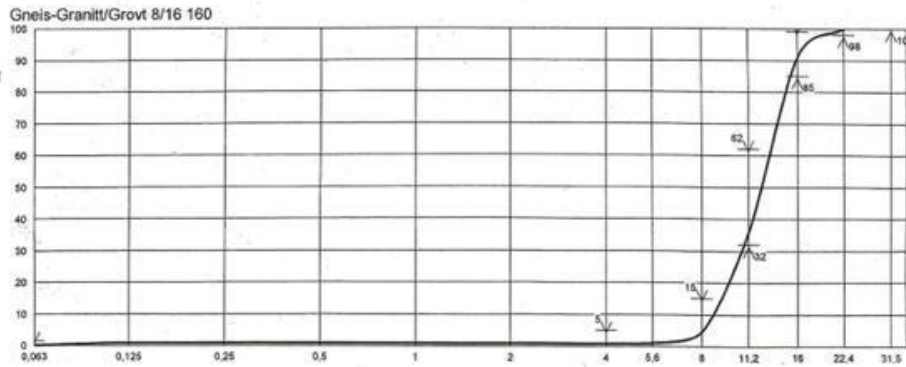
Dato:	14.01.2022	Kunde:	Norcem AS
Materiale:	8/16 mm System 2+	Havn:	Brevik
Varenr:	101711-160	Båt:	

Følgeseddel nr:

Test	NS-EN 933-1	Laboratorium	NorStone Årdal
Identifikasjon av prøven	8/16 mm 160	Operatør	Sæbø
Dato mottatt/uttatt	12.01.2022	Dato utført	12.01.2022
Metod (angi)	<input type="checkbox"/> Vasking og sikting	Standard	NS-EN 12620
	<input checked="" type="checkbox"/> Tørresikting	Sertifikat:	1111-CPD-0007
		Produksjonssted	NorStone Årdal

Total tørr masse $M_1 =$ 2001,0 g
 Tørr masse etter vasking $M_2 =$ g
 Tørr masse av Finstoff fjernet ved vasking $M_1 - M_2 =$ g
 Vanninnhold (%) NS 1097-5 = 1,1

Sikteåpning (mm)	Masse tilbakehold (g)	Prosentandel (%)	Akkumulert Prosentandel (%)	Gjennomgang		
				Idealkurve (%)	Min (%)	Max (%)
31,5					100,0	
22,4			100,0	100,0	98,0	100,0
16	180,7	9,0	91,0	90,8	85,0	99,0
11,2	1098,8	54,9	36,1	46,9	32,0	62,0
8	629,5	31,5	4,6	8,9		15,0
5,6	71,5	3,6	1,0	2,7		
4	3,3	0,2	0,9	2,3		5,0
2	0,0	0,0	0,9	2,0		
1	0,0	0,0	0,9	1,7		
0,5	0,0	0,0	0,9	1,3		
0,25	0,0	0,0	0,9	0,9		
0,125	0,0	0,0	0,9	0,6		
0,063	12,3	0,6	0,2	0,4		1,5
< 0,063	4,8	0,2				
Sum	2000,9	100,0	0,0	< 1% Prosentats materiale tapt		



14.01.2022	Gro Sæbø
Dato	Signatur