



FORORD

Denne rapporten ble skrevet våren 2014 som en avsluttende masteroppgave ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT). Oppgaven ble utført i samarbeid med AF Gruppen og har tittelen "*Bruk av frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer ved fuging av hulldekker*".

Jeg ønsker å takke mine veiledere som har vært Christian O. Sørensen fra IMT, og Bernt Kristiansen fra AF Gruppen. I tillegg ønsker jeg å takke alle de som har hjulpet meg med prøvene i laboratorium og temperaturloggingen på byggeplass.

Prøvene i laboratorium ble utført i samarbeid med Unicon, avdeling Sjursøya. Temperaturmålingene ble utført på byggeplass i samarbeid med Contiga. Underveis ble det også gjennomført møter mellom AF Gruppen, Contiga, og Unicon.

Jeg fikk også muligheten til å delta på et seminar angående vinterarbeider på montasjeplass i regi av Betongelementforeningen. Her fikk jeg mange nyttige innspill og synspunkter fra ulike aktører i betongelementbransjen, som inkluderte entreprenører, montasjeentreprenører, betongelementprodusenter, ferdigbetong-, og tilsetningsstoffleverandører.

DANIEL WILLASSEN
13. MAI 2014

SAMMENDRAG

Hensikten med denne oppgaven er å se nærmere på problemene med fuging av hulldekker vinterstid i Norge. Denne rapporten har fokus på produksjonen av fugebetong med frysepunktreduserende tilsetningsstoffer, og nødvendig dokumentasjon av fasthet ved støping av fuger på byggeplass.

Rapporten er delt inn i følgende hovedkapitler:

- Litteratursøk i grunnleggende betongteknologi.
- Prøving i lab av resepter med frysepunktreduserende tilsetningsstoffer.
- Temperaturlogging av betongfuger på byggeplass.
- En anbefalt veiledning til dokumentasjon av fugestøping om vinteren.

På grunn av relativt lite volum og store kontaktflater mot kalde betongelementer, kan fugebetongen kjøles ned til minusgrader på under en time etter støp. Når vannet i betongen fryser vil hydratiseringsprosessen stoppe og fugene vil ikke utvikle videre fasthet. Dette er uheldig når fugene skal overføre krefter mellom betongelementene og andre konstruksjonsdeler. I denne oppgaven ble dette løst ved å benytte natriumnitrat (NaNO_3) i fugebetongen. Men natriumnitrat har en negativ effekt på trykkfastheten sammenlignet med betong uten natriumnitrat. Dette ble kompensert for ved å benytte SP-stoff og et lavt masseforhold i betongen.

Terninger fra ulike prøveresepter med natriumnitrat ble lagret i et fryseskap fra $-5\text{ }^\circ\text{C}$ til $-10\text{ }^\circ\text{C}$. Terningene ble så trykkprøvet over en periode på 28 døgn. Resultatene viste en god fasthetsutvikling for enkelte resepter, med 28-døgns terningtrykkfasthet opp til 39 MPa ved lagring i $-5\text{ }^\circ\text{C}$, og 33 MPa i $-10\text{ }^\circ\text{C}$. På byggeplass ble termoelementer plassert i fuger mellom hulldekker, og temperaturen ble logget over flere døgn i kaldt vær. Fra dette ble det observert at fugebetongen ble raskt avkjølt, og kunne nå minusgrader på under en time uten oppvarming. Under stabil lufttemperatur ville skjærfugens temperatur ligge $1\text{--}2\text{ }^\circ\text{C}$ over lufttemperaturen. Utstøpte kanaler hadde en litt høyere temperatur de første dagene på grunn av et større støpevolum. Konklusjonen ble å benytte fasthetskurver fra trykkprøvene sammen med temperaturlogger fra byggeplassen for å dokumentere fugebetongens trykkfasthet.

ABSTRACT

The purpose of this task is to take a closer look at the problems surrounding grouting of hollow core slab joints during the winter in Norway. This paper primarily focuses on the production of grout containing antifreeze admixtures, and the required documentation of strength when grouting concrete elements at the building site.

This paper is divided into the following main chapters:

- A literature study of the basics of concrete technology.
- Stress testing of different grout recipes at the lab.
- Logging of grout temperatures at the building site.
- A proposed guide to documentation of winter-grouting.

Due to the relative small volume of grouts and the large contact surface with the adjacent hollow core slabs, the subzero temperature may occur within an hour after casting. When the water in the grout freezes, the hydration process will stop and so will any further strength development. This is very unfortunate when the grouted joints have to transfer loads between each concrete element as well as to other structural elements. In this paper, this was solved by using antifreeze admixtures in the grout. However, antifreeze admixtures has a negative effect on the compressive strength of the grout compared to grout without any antifreeze. This effect was compensated for by using a low w/c-ratio grout and superplasticizer.

Test cubes from different recipes for grout with antifreeze admixture were stored in a freezer from -5 °C to -10 °C. The cubes were then compression tested during and after 28 days of curing. The results yielded an acceptable development of strength for some of the recipes, with a compressive strength (cube) as high as 39 MPa at -5 °C storage temperature, and 33 MPa at -10 °C. At the building site, temperature sensors were placed in the grout of the hollow core slabs, and the temperatures were then logged over several days in cold weather. From this, it was observed that the grout could reach subzero temperature within an hour without having been heated. At stable air-temperatures, the grouted shear joint would stay 1-2 °C above the air temperature. The grouted end joints would have a little higher temperature the first few days because of a larger casting volume. By using strength curves from the compression tests and temperature recordings, the strength development in the grouted joints was estimated.

INNHALDSFORTEGNELSE

Forord	1
Sammendrag	2
Abstract	3
1 Innledning	6
1.1 Bakgrunn.....	6
1.2 Mål og avgrensninger.....	8
2 Litteraturstudie	9
2.1 Grunnleggende betongteknologi.....	9
2.1.1 Betong generelt.....	9
2.1.2 Sement.....	13
2.1.3 Tilsetningsmaterialer	15
2.1.4 Tilslag.....	17
2.1.5 Tilsetningsstoffer	18
2.2 Natriumnitrat (NaNO ₃)	23
2.3 Fugestøp	26
2.4 Simulering	29
2.4.1 Hastighetsfunksjonen.....	29
2.4.2 Modenhetsprinsippet.....	30
2.4.3 Fasthet- og varmeutvikling.....	31
2.4.4 Varmeoverføring i FEM-modell	34
3 Laboratorieprøver	35
3.1 Innledning.....	35
3.2 Hensikt.....	35
3.3 Utstyr	35
3.4 Prosedyre.....	36
3.5 Prøveresepter	37
3.5.1 Prøveserie 1: 28 døgn -5 °C.....	38
3.5.2 Prøveserie 2: 28 døgn -10 °C.....	39
3.5.3 Prøveserie 3: 14 døgn -5 °C.....	40
3.6 Simulering av fasthet	41
3.7 Diskusjon.....	42
3.8 Konklusjoner av laboratorieprøver.....	43
4 Temperaturlogging på byggeplass	44
4.1 Innledning.....	44
4.2 Utstyr.....	44
4.3 Målepunkter	45
4.3.1 Måling 1: Skjærfuge og knutepunkt i HD kanal	45
4.3.2 Måling 2: Isolert og uisolert skjærfuge	48
4.3.3 Måling 3: Hulldekke og skjærfuge.....	50
4.4 Simulering av fugetemperatur	52
4.5 Diskusjon.....	55
4.6 Konklusjon av temperaturlogging.....	56

5	Veiledning til vinterfuging	57
5.1	Produksjon	57
5.2	Fugestøp.....	58
6	Diskusjon.....	60
7	Konklusjon.....	62
8	Videre arbeid	63
9	Figurliste.....	64
10	Tabelliste.....	66
11	Referanser.....	67
Vedlegg.....	.....	69
Vedlegg A: Betongelementer .....	.....	70
Vedlegg B: Kraftoverføring i fuge .....	.....	74
Vedlegg C: Temperaturlogger fra byggeplass.....	.....	81
Vedlegg D: Blandelogg.....	.....	89
Vedlegg E: Betongresepter .....	.....	90
Vedlegg F: Siktekurve.....	.....	93
Vedlegg G: Produktblader.....	.....	94
Vedlegg H: Trykkfastheter.....	.....	97
Vedlegg I: FEM-simulering av temperatur.....	.....	100

1 INNLEDNING

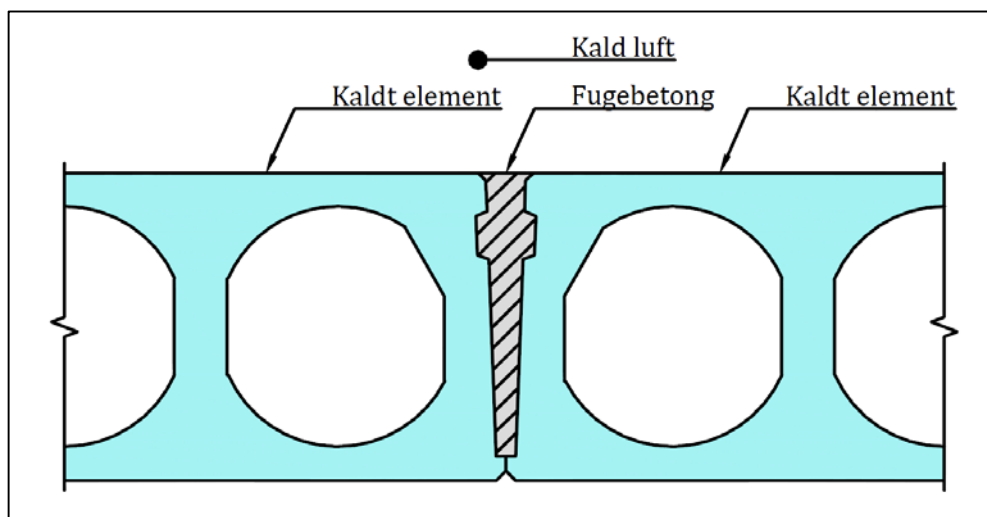
1.1 BAKGRUNN

Da det før ble konstruert mye plasstøpt betong, blir det i dag benyttet betongelementer som transporteres og monteres på byggeplass. Betongelementene produseres på egne produksjonsanlegg under kontrollerte omgivelser, og man får derfor en større kontroll på kvaliteten til betongelementene i forhold til plasstøpt betong. Siden betongelementene leveres til byggeplass i ferdig herdet tilstand, så er de ikke utsatt for frostskafer i fersk og delvis herdet tilstand slik som plasstøpt betong er om vinteren.

Støpingen av fuger utføres på byggeplassen etter at betongelementene er heist på plass. Fugebetong¹ består av en egen blanding som kan leveres med betongbil fra betongfabrikk, fugebetongen kan pumpes opp til hulldekkene (se Figur 1). Fugene har et relativt lite volum, og en stor kontaktflate til de nærliggende hulldekkene. Fugene blir derfor i stor grad påvirket av omgivelsene som luft- og elementtemperatur. På grunn av dette blir fugemassen raskt nedkjølt i kaldt vær da de nærliggende hulldekkene allerede er sterkt nedkjølt (se Figur 2). Betongelementenes temperatur vil følge lufttemperaturen med en treghet som er avhengig av faktorer som blant annet elementtype, vindhastighet, og snø på dekket.

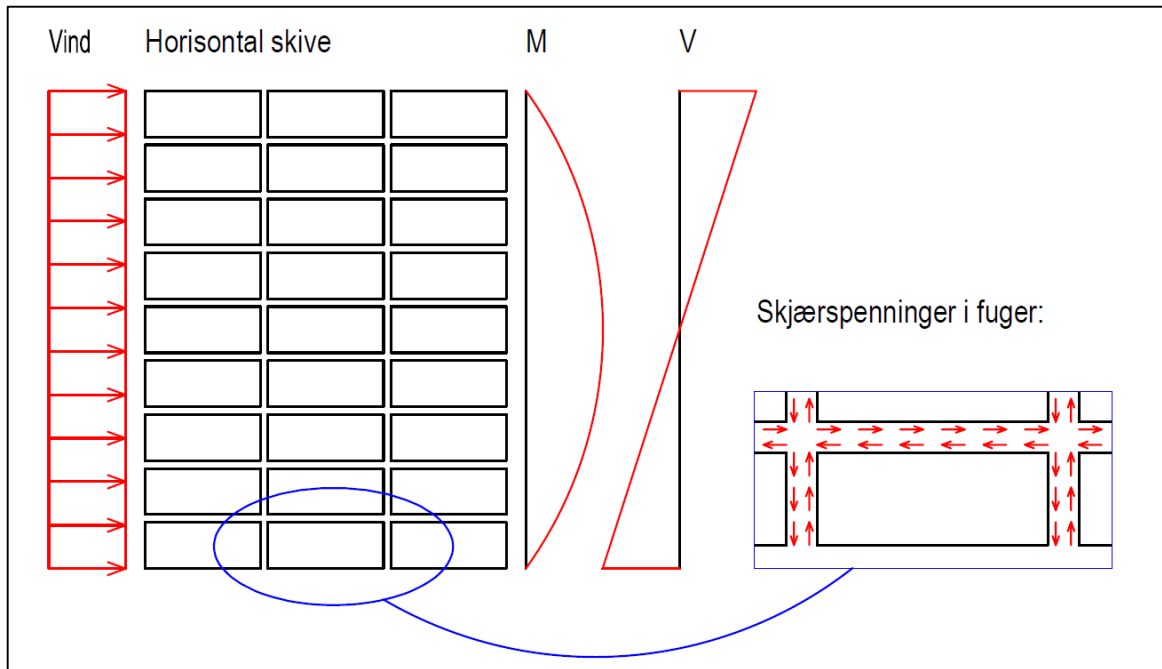


Figur 1
Fugebetong pumpes inn mellom nedkjølte hulldekker.



Figur 2
Tverrsnitt av nedkjølte hulldekker med fuge.

¹ I denne oppgaven beskrives fugemassen som "fugebetong" (med $d_{\max} = 8$ mm). Ordet "fugemørtel" blir også brukt i bransjen, men "fugebetong" blir benyttet her siden det anses som et spesialtilfelle (noe "sprøytebetong" også er).



Figur 3
Enkel illustrasjon av en horisontal skive sammensatt av mindre skiver.

Det er ikke uvanlig at fugene må overføre store krefter mellom betongelementene. Dette kan for eksempel være vindkrefter i et horisontalt dekke av betongelementer (se Figur 3). Eller skjær-, moment- og torsjonskrefter i et knutepunkt. Det er derfor viktig at fugene har stor nok fasthet til å overføre disse kreftene uten at det oppstår brudd i fugene. Dersom fugene fryser i fersk eller delvis herdet tilstand, vil de ikke lenger utvikle fasthet. Dette er fordi vannet ikke lenger kan reagere med sementen i betongblandingen, og hydratiseringsprosessen stopper. Når fugene tiner vil fritt vann være tilgjengelig og hydratiseringsprosessen kan starte igjen. Men fugene vil få varige frostskafer dersom de ikke har oppnådd stor nok fasthet før de fryser. I følge NS-EN 13670 pkt. 8.5(12) skal betongen ha en fasthet på minst 5 MPa før den kan gå under 0 °C. Det eneste tiltaket som kan tilfredsstillende dette kravet er å dekke til og varme opp betongelementene før fugestøpet begynner, men dette vil være kostbart og upraktisk for store bygg med store arealer. Et alternativt tiltak kan være å benytte frysepunktnedsettende tilsetningsstoff i fugebetongen for å hindre at vannet i betongblandingen fryser. Slike tilsetningsstoffer har en negativ effekt på fasthetsutviklingen i seg selv, men fordelene er at vannet ikke fryser ved 0 °C¹, og man unngår dermed frostskafer i fersk og delvis herdet betong. Siden fritt vann er tilgjengelig, vil hydratiseringsprosessen kunne fortsette, og betongen vil fortsette å utvikle fasthet.

Andre generelle vintertiltak er å benytte isolert forskaling, oppvarmede delmaterialer, finmalt sement, økt sementmengde, og akselererende tilsetningsstoffer. Men i beste fall vil disse tiltakene kun gi en raskere fasthetsutvikling i fugene. De vil ikke hindre at fugebetongen fryser, da de relativt små fugevolumene ikke klarer å generere nok varme i forhold til omgivelsene. De eneste alternativene er derfor (1) å varme opp elementene, (2) vente på varmere vær, eller (3) bruke frysepunktnedsettende tilsetningsstoff. Alternativ (1) og (2) kan være tid- og kostnadskrevende for et prosjekt, så i denne oppgaven vil mulighetene og begrensningene med alternativ (3) undersøkes nærmere.

¹ Vannet i fersk betong uten frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer fryser rundt -2 °C, avhengig av masseforholdet [1].

Det er ønskelig å kartlegge fasthetsutviklingen i fugene under vinterforhold. Dette kan være fordi man ønsker vite når fugebetongen er sterk nok til å fjerne eventuell forskaling, stag, eller stimpling, og kunne påbegynne videre montasje av bygget. Det kan også være ønskelig å kunne vite når fugebetongen kan fryse uten at man oppnår varige frostskafer, dvs. når betongen har oppnådd minst 5 MPa trykkfasthet. Og det er selvfølgelig ønskelig å vite at fugene har nok styrke til å overføre de største lastpåkjenningene som kan oppstå under hele byggets levetid.

1.2 MÅL OG AVGRENSNINGER

Denne oppgaven fokuserer på produksjon og støping av fugebetong til hulldekker under vinterforhold. Her menes vinterforhold når lufttemperaturen faller under 5 °C. Fokuset vil være på fugebetong som har risiko for å fryse til is. Med fugebetong menes det som støpes på montasjeplass mellom hulldekker, eller mellom hulldekker og andre konstruksjonsdeler.

I denne oppgaven blir det ikke fokusert på beregningene som ligger til grunn for kravet til fasthet i fugene. Noen prinsipper og eksempler gjennomgås i Vedlegg B, men det antas at alle konstruksjonsmessige beregningene er korrekt utført i henhold til gjeldende standard. Krav til fugebetong skal være gitt av konstruktør i dokumenter eller tegninger for bygget. Kravet til fugebetongen kan være gitt som en fasthet (for eksempel "minst 5 MPa før videre montasje"). Eller det kan oppgis en kvalitet som setter et krav til sluttfasthet (for eksempel "B35M40"). Målet med denne oppgaven er å kunne dokumentere at det gitte kravet er oppfylt, selv under vinterforhold.

2 LITTERATURSTUDIE

2.1 GRUNNLEGGENDE BETONGTEKNOLOGI

2.1.1 Betong generelt

Betong er et produkt av delmaterialene vann, sement, tilslag, og eventuelle tilsetninger. Og det er egenskapene og sammensetningen av disse delmaterialene som avgjør egenskapene til betongen. Betongen kan blandes direkte på byggeplass, eller blandes i en betongfabrikk og transporteres til byggeplass med betongbil. Når alle delmaterialene er blandet sammen, omtales betongen som helt fersk. Betongen er i størkningsfasen når den går fra plastisk til fast tilstand (1-3 døgn). Når betongen er fast og ikke lenger lar seg bearbeide, er den i herdefasen og vil fortsette å utvikle fasthet over tid (-28 døgn). Etter at en viss fasthet er oppnådd er betongen herdet (28+ døgn), men den vil fortsatt utvikle fasthet langsomt over flere år.

Ulike betongresepter vil ha ulike positive og negative egenskaper, som betyr at de ulike betongreseptene vil ha forskjellige bruksområder. For eksempel må en bærende betongkonstruksjon ha stor styrke mens vannrør av betong må ha god bestandighet og vanntetthet. Da betongens positive egenskaper er avhengig av bruksområde, kan man ikke lage en universell betong som passer til absolutt alle formål. Og det er derfor viktig å ha god kunnskap om de ulike betongreseptene, og deres sterke og svake sider.

Betongfasthet

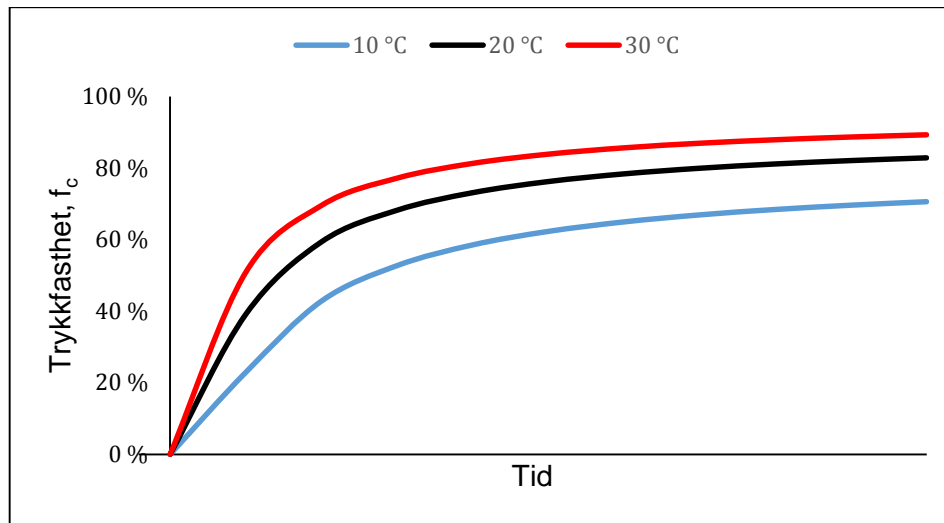
Betongens fasthet, også kalt styrke, har betydning for hvor mye mekanisk belastning betongen tåler før den går i brudd. Det er først og fremst trykkfastheten som er av betydning når man beskriver betong. Da betongen i seg selv har lav strekkfasthet, er det armeringen som må overføre strekkrefter. Trykkfastheten uttrykkes som en tillatt spenning med enhet MPa eller N/mm², og måling av trykkfastheten kan gjøres ved at det støpes en standardisert terning- eller sylinder som trykkprøves. Betongen utvikler fastheten over tid, og vil ha en høy utvikling de første dagene som så flater ut (se Figur 4). Betongens fasthetsklasse er basert på fastheten betongen kan oppnå etter 28-døgn. Betongens fasthet avhenger av vann/semementforholdet (se Figur 7). Fasthetsutviklingen vil påvirkes av blant annet temperatur, sementens finhet, og innhold av akselererende tilsetningsstoffer. Standarden angir følgende fasthetsklasser som kan benyttes i Norge for normal- og tungbetong:

Tabell 1
 Fasthetsklasser etter NS-EN 206-1 tab. NA.2 [2].

	B10	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65	B75	B85	B95
f_{ck} [MPa]	10	20	25	30	35	45	55	65	75	85	95
$f_{ck,cube}$ [MPa]	12	25	30	37	45	55	67	80	90	100	110

Fasthetsklassene er basert på karakteristisk 28-døgn sylindetrykkfasthet. Den karakteristiske verdien har 5 prosent sannsynlighet for underskridelse [3:7], så den må divideres med en materialfaktor for å få en dimensjonerende fasthet. Materialfaktoren for betong er satt til $\gamma_c = 1,5$ etter Eurokode 2 [4]. Det er vanlig å øke materialfaktoren for fugestøp på montasjeplassen, dette gjøres fordi det ikke alltid er praktisk å gjennomføre

kontrollopplegget som kreves i standarden. Betongelementboken [5:15] anbefaler derfor en materialfaktor for fugestøp på $\gamma_c = 1,8$.



Figur 4
 Utvikling av trykkfasthet for betong over tid relativt til total potensial.

Betongens bestandighet

Med bestandighet menes betongens motstand mot nedbrytning over tid. Betong brytes ned når den utsettes for påkjenninger fra miljøet i form av væsker og gasser som trenger inn i betongen. Er betongen tett, vil nedbrytningen av betongen bli redusert. Lavt v/c-forhold vil resultere i færre og mindre luftporer og gir en sterk og bestandig betong. Men det må også benyttes riktig mengde sement slik at alle hulrommene mellom tilslagskornene blir fylt med sementpasta. Et lavt v/c-forhold vil også gjøre betongen stiv og tregtflytende, noe som kan motvirkes med vannreducerende tilsetningsstoffer.

Salt fra sjøvann eller veisalt kan trenge inn i armeringen og få den til å korrodere. Korrodert jern får større volum og vil sprengte i stykker betongen. NS-EN 206-1 angir krav til maksimalt kloridinnhold i selve betongen. Kravet for armert betong er gitt som 0,4 kloridioner i prosent av sementmengden (NS-EN 206-1: tab. 10). Klorider kommer fra betongens delmaterialer, for eksempel fra tilslaget og tilsetningsstoffer.

Alkalier i betongen kan reagere med mineraler i tilslaget. Dette danner et reaksjonsprodukt som sveller og sprenger betongen. Konsekvensen kan være estetisk for ikke bærende konstruksjoner, eller meget alvorlig for bærende konstruksjoner. For at alkalireaksjoner skal kunne oppstå, må følgende faktorer være oppfylt [6:60]:

- Tilstrekkelig mengde alkalier (gitt i NB 21 [7] som Na_2O ekvivalent).
- Alkalireaktivt tilslag, dvs. finkornet/deformert SiO_2 (kvarts).
- Høy fuktighet i betongen (RF > 80% [8]).

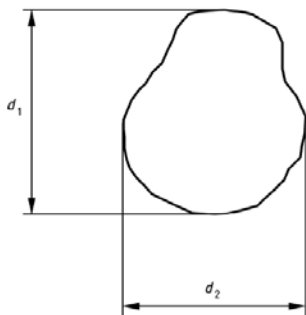
Dersom en av disse faktorene ikke er til stede, vil ikke alkalireaksjonen forekomme. Reaksjonen er i tillegg temperaturavhengig, der høy temperatur vil øke hastigheten på reaksjonen. Alkalier blir i hovedsak tilført via sementer og tilsetningsstoffer med høyt alkaliinnhold. Ved å benytte pozzolaner som silikastøv og flygeaske, kan sannsynligheten for alkalireaksjoner reduseres.

Betongens støpelighet

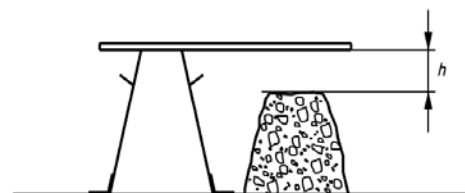
Med betongs støpelighet menes hvor lett det er å transportere betongen (pumpbarhet), få den fordelt ut i formen (mobilitet/komprimerbarhet), og hvor bearbeidelig den er. Her er kravene til støpelighet forskjellige for ulike formål, og ved å prioritere en av egenskapene kan det gi en negativ effekt på de andre egenskapene. Så det er derfor ikke mulig å lage en støpelig betong til absolutt alle formål. Vannmengden vil ha en betydning for betongens konsistens fordi vannet gjør at de faste partiklene lettere vil flyte om hverandre. Formen og graderingen av tilslaget vil også påvirke konsistensen dersom mengden sementpasta holdes konstant. Avrundede korn (som finnes i naturlig gradert tilslag) flyter lettere om hverandre, mens kantede korn (som finnes i maskinknust tilslag) hefter seg mer sammen. Et godt gradert tilslag vil ha kornstørrelser som fyller ut alle hulrom. For et dårlig gradert tilslag må man øke mengden sementpasta for å få bedre konsistens. Det er ikke mulig å øke vannmengden uten å øke sementmengden da dette også vil øke v/c-forholdet og redusere betongens styrke og bestandighet. For v/c-forhold under 0,45 må man ofte benytte tilsetningsstoffer for å gjøre betongen støpelig, både L-stoffer, P-stoffer, og SP-stoffer kan benyttes for å øke konsistensen (tilsetningsstoffer er beskrevet nærmere i kapittel 2.1.5). For å måle betongens konsistens, kan man benytte en av metodene som er gitt i følgende tabell:

Tabell 2
 Metoder for måling av konsistens.

Metode	Eurokode	Anbefalt område etter NS-EN 206-1
Utbredingsmål	NS-EN 12350-5	> 340 mm og ≤ 620 mm
Synkmål	NS-EN 12350-2	≥ 10 mm og ≤ 210 mm
Vebe-metoden	NS-EN 12350-3	≤ 30 s og > 5 s
Komprimeringsgrad	NS-EN 12350-4	≥ 1,05 og ≤ 1,46



Figur 5
 Måling av utbredning [9].



Figur 6
 Måling av slump [10].

Hvilken metode som bør benyttes er avhengig av den ferske betongens bløthet, der utbredingsmål er best egnet for bløt betong og vebe-metoden for stiv betong. SINTEF [11] anbefaler følgende metoder basert på betongens bløthet:

Synkmål (også kalt slump) er en enkel metode som er vanlig å benytte. Her fylles betong i en kjegle med høyde 300 mm, og diameter 100 mm topp og 200 mm bunn. Når kjeglen fjernes vil betongen synke sammen og synkmålet finnes ved å måle avstanden som betongen har sunket fra kjeglens topp. NS-EN 206-1 angir konsistensklasser basert på synkmål fra S1 til S5 der S1 er den stiveste betongen (synkmål fra 10 til 40 mm), og S5 er den bløteste betongen (synkmål ≥ 220 mm). Som man kan se på fra Tabell 2 så ligger klasse S5 utenfor det anbefalte området, fordi metoden har manglende nøyaktighet for så bløt betong.

Utbredningsmål er en metode hvor betong fylles i en kjegle med høyde 200 mm, og diameter 130 mm topp og 200 mm bunn. Kjeglen fjernes over et fallbord hvor betongen utsettes for en fysisk påkjenning ved at platen slippes ned 15 ganger. Deretter måles det to diametere vinkelrett på hverandre, og utbredningsmålet er gitt av gjennomsnittet av disse to verdiene. Konsistensklassene er angitt fra F1 til F6 der F1 er stivest (≤ 340 mm), og F6 er bløtest (≥ 630 mm).

Vebe-metoden benyttes vanligvis når konsistensen er så stiv at man ikke kan benytte synkmål (dvs. synkmål < 10 mm, men også opp til 40 mm [12]). For fugebetong vil en så stiv konsistens være uaktuelt, men det kan nevnes at metoden består av å måle tiden det tar for en glassplate å bli helt dekket av betong som er utsatt for vibrasjon. Antall sekunder blir omtalt som vebetallet, og er betongen stiv vil den få et høyt vebetall.

Komprimeringsgrad er en metode som angir hvor mye fersk betong lar seg komprimere [12:49]. En beholder med høyde $h = 400$ mm fylles med fersk betong som vibreres enten med en vibrator eller vibratorbord. Når betongen er ferdig komprimert måles avstanden s fra betongen til beholderens topp. Komprimeringsgraden c bestemmes så av formelen:

$$c = \frac{h}{h - s} \quad (1)$$

Betongens stabilitet

Betongens stabilitet angir risikoen for at delmaterialene separerer under transport og støping. Det er nødvendig å ha en homogen betong for at den skal få god styrke og bestandighet. Et høyt v/c -forhold vil gjøre at de faste partiklene flyter lettere fra hverandre og øker faren for separasjon. I tillegg kan vannet stige opp mens de tyngre partiklene synker ned (bleeding). Inhomogen betong gir dårligere tetthet, og dermed dårligere styrke og bestandighet. For å redusere faren for separasjon bør det benyttes riktig mengde finstoff (diameter $< 0,25$ mm [12:57]), der 5 prosent av tilslaget vil vanligvis være ok. En tommelfingerregel for å unngå separasjon er å benytte nok finstoff slik at følgende formel tilfredsstilles:

$$\frac{\text{vann}}{\text{sement} + \text{finstoff}_{\leq 0,125}} < 0,5 \quad (2)$$

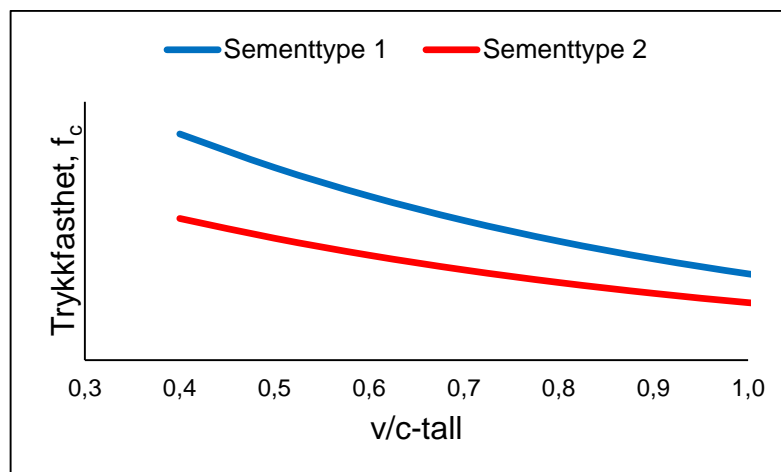
Grunnen til at finstoff hindrer separasjon er at vannet ikke kan bevege seg like lett gjennom en finkornet masse. Men for mye finstoff i betongen kan gjøre den klebrig og vanskelig å støpe ut.

Betongens pumpbarhet gir en nedre og øvre grense for finstoffinnholdet, dette er fordi det er vannet som lar seg pumpe trekker med seg de faste partiklene. For lite finstoff gjør betongen ustabil og finstoff og vann separeres fra de større tilslagspartiklene. Disse store tilslagspartiklene blir stående stille i røret og danner dermed en propp (også kalt plugg). Er det nok finstoff i betongen, vil de små partiklene kunne trekke med seg de større tilslagskornene. For å redusere risikoen for propp, bør det benyttes tilstrekkelig finstoff til at Formel (2) er tilfredsstilt. Men for mye finstoff gjør betongen klebrig, betongen kan dermed hefte seg fast langs rørveggen og skaper friksjon. Dette gir større nødvendig pumpetrykk eller redusert pumpekapasitet. For at betongen ikke skal bli for seig eller for ustabil, bør mengden finstoff (diameter $< 0,25$ mm) ligge i området 450 kg/m^3 [12:57].

2.1.2 Sement

Sement er et hydraulisk bindemiddel som reagerer med vann for å starte en kjemisk reaksjon, under denne reaksjonen sier vi at sementen hydratiserer. Blandingen av sement og vann kalles for sementpasta, og det er denne som i hovedsak avgjør hvor sterk og bestandig betongen blir. Når sementen hydratiserer vokser det ut silikater fra sementkornet som gir betongen fasthet og bestandighet og gjør også betongen basisk (pH \sim 12). En høy pH i betongen beskytter armeringen med et oksidlag som hindrer armeringen fra å korrodere.

Vannet i sementpastaen blir forbrukt på forskjellige måter. En vannmengde tilsvarende ca. 25 prosent av sementvekten blir knyttet til den kjemiske reaksjonen og blir kjemisk bundet. En vannmengde tilsvarende ca. 15 prosent av sementvekten blir fysisk bundet som gelvann i gelporene. Derfor trengs det en vannmengde på ca. 40 prosent av sementvekten for at all sementen skal reagere med vannet og gå over til sementpasta. Men i praksis vil det alltid være en del av sementen som ikke reagerer med vannet, selv med en vannmengde på over 40 prosent. Når vann og sement reagerer, får reaksjonsproduktet et mindre volum enn summen av utgangsmaterialene. Siden det ytre volumet forblir det samme, får man en volumreduksjon i form av kontraksjonsporer (luftporer) jevnt fordelt i sementpastaen. Masseforholdet mellom vann- og sementmengden blir kalt for v/c-tallet, så det er altså et v/c-tall på ca. 0,4 som er nødvendig for å få en full hydratisering av sementen. Ved å benytte et lavere v/c-tall blir det for lite vann til at all sementen kan hydratisere, den resterende sementen vil da fungere som tilslag. Dette er positivt i det at man får et mindre porevolum. Ved å benytte et høyere v/c-tall får vi mer vann i enn det som er nødvendig for full hydratisering, dette vannet vil fordele seg jevnt i den ferske sementpastaen. Når betongen herder vil vannet fordampe og etterlate større kapillærporer som bidrar til å redusere betongens fasthet og bestandighet (se Figur 7 for sammenheng mellom v/c-tall og trykkfasthet).



Figur 7
Forholdet mellom v/c-tallet og trykkfasthet.

Vannet i kapillærporene kan også fryse, noe som gir en volumøkning som kan føre til frostsprengning. For vinterstøp vil det derfor være mest gunstig å ha så lavt v/c-tall som mulig i fugebetongen. Vannet som er fysisk bundet i gelporene kan også delvis fordampe under normale klimatiske forhold, men for å drive ut alt vannet må temperaturen i sementpastaen stige til over 100 °C. Vannet i gelporene kan derimot ikke fryse (pga. liten størrelse). Det kjemisk bundne vannet i kontraksjonsporene vil ikke fordampe under normale klimatiske forhold, men det kan drives ut under ekstreme situasjoner som for eksempel under brann. Det kjemiske bundne vannet i kontraksjonsporene kan heller ikke fryse.

Portlandsement er et fellesbegrep på forskjellige sementer som benyttes i byggebransjen. Portlandsement består av fire hovedmineraler som typisk utgjør 90-95 prosent av sementen (se Tabell 3). C₃S gir sementen en rask varme- og fasthetsutvikling, det bidrar også til en moderat slutfasthet. C₂S gir en langsommere varme- og fasthetsutvikling, men bidrar til en høy slutfasthet. C₃A gir en rask varmetutvikling og bidrar derfor indirekte til tidlig fasthetsutvikling, men gir lite bidrag til slutfastheten. C₄AF gir lite bidrag til varme og fasthet, men fungerer som en katalysator under produksjonen av sementen, noe som gir et lavere energiforbruk. De resterende 5-10 prosentene av sementen har også en betydning, for eksempel kan alkalier bidra til tidlig fasthetsutvikling.

Tabell 3
De fire hovedmineralene i portlandsement [12, 13].

Navn	Kjemisk formel	Varmeutvikling [kJ/kg]	Symbol
Trikalsiumsilikat	3CaO · SiO ₂	500	C ₃ S
Dikalsiumsilikat	2CaO · SiO ₂	260	C ₂ S
Trikalsiumaluminat	3CaO · Al ₂ O ₃	900	C ₃ A
Tetrakalsiumaluminatferrit	4CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	300	C ₄ AF

Sementpulverets finhet vil påvirke hvor raskt vannet og sementen kan reagere. Finere sement har en større kontaktflate med vannet, noe som gir en raskere varme- og fasthetsutvikling og en tettere struktur i betongen. Dette er grunnen til at finmalt sement blir omtalt som "rapidsement". Sementens finhet blir uttrykt som sementkornenes overflateareal i en gitt mengde sement [m²/kg], denne parameteren kalles for Blain-finhet. Blain-finheten for portlandsement vil normalt ligge i området 250-550 m²/kg. Som man kan se i Tabell 4 så vil finkornet sement generelt ha en høyere deklarerert tidligfasthet. Både Aalborg Rapid og Norcem Industri har den høy Blain-finheten og 1-døgns fasthet. Men sammensetningen av de ulike mineralene og andre tilsetningsmaterialer i sementen har også en stor betydning på fasthetsutviklingen. Det er derfor ikke alltid finheten som er avgjørende for fasthetsutviklingen, så det er også nødvendig å vite hva sementens sammensetningen er.

Tabell 4
Typiske verdier for forskjellige sementtyper.

Sementtype	Blain-finhet [m ² /kg]	Deklarerert fasthet [MPa]			
		1 døgn	2 døgn	7 døgn	28 døgn
Norcem Standard	370	21	32	42	52
Norcem Standard FA	450	21	31	40	52
Norcem Anlegg	360	18	30	46	60
Norcem Anlegg FA	390	15	24	37	55
Norcem Industri	550	32	40	49	57
Aalborg Rapid	470	24	36	53	67
Cemex Miljø	470	18	28	-	58

Deklarerert fasthet er oppgitt av sementprodusenten som en sylindertykkfasthet med en standardisert mørtelblanding etter NS-EN 196-1 (med v/c = 0,5) [14].

For fugebetong vil de fleste sementtypene være brukbare. Det er fasthetsutviklingen og slutfastheten for den endelige fugeresepsten som vil være avgjørende. Her vil også blant annet tilsetningsstoffer, tilsetningsmaterialer, og tilslag være påvirkende faktorer. Men når det kommer til sementtype så vil det være mest naturlig å velge en sement med høy tidlig- og slutfasthet.

2.1.3 Tilsetningsmaterialer

Tilsetningsmaterialer er et finmalt materiale som blandes inn i sementen eller betongen. Disse materialene deles inn i følgende to hovedgrupper:

- Inaktive fillere.
- Pozzolaner og latente hydrauliske materialer.

Inaktive fillere bidrar ikke som bindemiddel i betongen, men påvirker egenskaper til fersk betong. Disse materialene kan for eksempel være kvartsmel eller kalksteinsmel. Pozzolaner bidrar til dannelse av bindestoffer, og latente hydrauliske materialer vil sammen med sement kunne danne bindemiddel. I denne oppgaven omtales bare pozzolanene flygeaske og silikastøv, da disse er mest vanlig benyttet i Norge.

Når C_3S og C_2S reagerer med vann, blir et av produktene kalsiumhydroksid ($Ca(OH)_2$). Dette produktet bidrar ikke til høyere fasthet, men gir betongen en høyere pH (dvs. gjør betongen mer basisk). Kalsiumhydroksidet kan gjerne være oppløst i kapillærporene og legge seg som sjikt rundt tilslagskorn. Silikastøv og flygeaske kan inngå i kjemiske forbindelser med kalsiumhydroksid. Disse forbindelsene vil virke som bindemiddel og dermed reduseres størrelsen på porene, noe som bidrar til økt styrke og tetthet i betongen. Pozzolaner kan benyttes som et tillegg til sement, eller som erstatning for en del av sementen. Siden silikastøv og flygeaske i utgangspunktet er avfallsstoffer fra annen industri, er det mer miljøvennlig å benytte disse som en erstatning til en del av sementen. Pozzolanreaksjonen er følsom for temperaturen i betongen, og en høyere temperatur gir en raskere reaksjon. For at pozzolanreaksjonen skal kunne starte, kreves en temperatur på over 5 °C [12:42].

Siden pozzolaner gir et bidrag til betongens styrke, blir de også inkludert i betongens masseforhold. Istedenfor v/c benyttes det da v/b -tall, hvor b er den effektive bindemiddelmengden:

$$b = c + \sum k \cdot s \quad (3)$$

Der c er sementvekten.
 k er virkningsgraden av gitt pozzolan.
 s er vekten av gitt pozzolan.

NS-EN 206-1 angir høyeste k -verdi for silikastøv til 2,0 og flygeaske til 0,4, men i Norge er det mulig å benytte en k -verdi for flygeaske på 1,0 med riktig type flygeaske og riktig dokumentasjon.

Silikastøv

Silikastøv er et biprodukt fra smelteverk i produksjonen av ferrosilisium (benyttes blant annet til fremstilling av rustfritt stål). Ferrosilisium ($FeSi$) produseres ved å blande jernmalm (Fe_3O_2), kvarts (SiO_2), og karbon (C) i form av kull og koks. Dette smeltes under høy temperatur ($\sim 2000\text{ °C}$ [15:68]) og ferrosilisiumet kan tappes fra ovnen. Fra smelteprosessen vil det dannes avgasser i form av silisiummonoksid (SiO) som blandes med luft og transporteres til røykgassfiltre ved hjelp av vifter, hvor silikastøv blir samlet. Den kjemiske sammensetningen av silikastøv vil variere fra ulike produksjonssteder, men en typisk sammensetning er gitt i følgende tabell:

Tabell 5
 Typisk kjemisk sammensetning
 av silikastøv [16].

Element	Typiske verdier [%]
SiO ₂	91,8
Al ₂ O ₃	0,7
Fe ₂ O ₃	1,5
CaO	0,5
MgO	1,1
K ₂ O	1,2
Na ₂ O	0,4
SO ₃	0,3
LOI	2,5

Det er innholdet av SiO₂ som i hovedsak bidrar til pozzolanreaksjon, men andre stoffer som Al₂O₃ og Fe₂O₃ gir også et positivt bidrag. I tillegg inneholder silikastøv små mengder av alkalier som K₂O og Na₂O, men silikastøv vil bidra til å binde opp alkalierne og virker derfor gunstig med tanke på å redusere faren for alkalireaksjoner. LOI står for «loss on ignition» og kalles også for glødetap, LOI kommer av organiske materialer som ikke har blitt forbrent i produksjonsprosessen. Glødetapet har ingen positiv effekt og blir derfor sett på som en forurensning i betongen.

Silikastøv har en Blain-finhet på ca. 20 000 m²/kg som gjør det til et fint materiale som vil binde opp mye vann (sement har en Blain-finhet på 250-550 m²/kg). Dette vil påvirke egenskapene til fersk betong, og kan redusere sannsynligheten for separasjon under transport og utstøping. Men for store doser vil gjøre betongen klebrig og vanskelig å støpe, derfor benyttes det vanligvis ikke mer enn 5 prosent silika av sementvekten. Med silikastøv vil fasthetsutviklingen være lavere enn for ren sement, men slutfastheten kan bli større.

Flygeaske

Flygeaske er et biprodukt som fanges opp fra røykgassen i kullkraftverk, og som i hovedsak importeres fra Danmark. Under forbrenningen vil mineraler fra kullet (leire, kvarts, feltspat, og leirskifer) slå seg sammen og sveve ut sammen med avgassene. Når disse mineralene kjøles ned vil det dannes glassaktige kuler som er flygeaske. Den kjemiske sammensetningen til flygeasken vil være avhengig av forskjellige faktorer som:

- Type brensel (form og sammensetning)
- Type forbrenningssovn
- Rensemethode for å samle opp flygeaske
- Etterbehandling av flygeaske
- Lagringsforhold

Dette gjør at sammensetningen til flygeasken vil variere fra de forskjellige kullkraftverkene, men også innenfor hvert kullkraftverk ved forskjellige tidspunkt. Følgende tabell er derfor kun et eksempel på sammensetningen av flygeaske:

Tabell 6
 Eksempel på kjemisk
 sammensetning av flygeaske [17].

Element	Typiske verdier [%]
SiO ₂	50,0
Al ₂ O ₃	23,9
Fe ₂ O ₃	6,0
CaO	6,3
MgO	2,1
K ₂ O	1,4
Na ₂ O	0,6
SO ₃	0,4
LOI	3,6

I flygeaske vil innholdet av Al₂O₃ og Fe₂O₃ generelt være høyere enn for silikastøv, og disse stoffene bidrar positivt til pozzolanreaksjonen. Finheten er omtrent på samme nivå som sement. Innhold av kalk (CaO) i flygeaske bør holdes lavt, da fri kalk vil kunne danne Ca(OH)₂, som kan føre til skader på betongen og redusere betongens styrke og bestandighet. Flygeaske binder også opp alkalier, så alkaliinnholdet i flygeasken blir ikke sett på som ugunstig i sammenheng med alkalireaktivt tilslag (forutsatt at det blir benyttet tilstrekkelig mengde flygeaske).

Flygeaske ble først benyttet for å redusere varmeutviklingen i massive betongstøp, dette ble gjort for å redusere dannelsen av riss og sprekker pga. betongens egen varmeproduksjon. Nå benyttes flygeaske også for å øke betongens slutfasthet, bestandighet, stabilitet, bearbeidelighet, og motstand mot kloridinntrengning. I tillegg får man en miljøgevinst ved å erstatte en del av sementen med flygeaske.

2.1.4 Tilslag

Kornstørrelsen på tilslaget må ikke være større enn den frie avstanden mellom parallelle armeringsstenger.

Kravet til fri avstand er $D_{maks} + 5$ mm, som er gitt i NS-EN 1992: pkt. 8.2(2), hvor D_{maks} er den største nominelle kornstørrelsen på tilslaget. Dette kravet er for å sikre at betongen dekker armeringen helt, og at det kan oppnås god heft mellom betong og armering. I tillegg angir NS-EN 1168 et krav til kornstørrelsen for hulldekkets skjærfuge. Kornstørrelsen skal ikke være større enn bunnbredden. Siden det også er et krav til at bunnbredden ikke skal være større enn 10 mm, bør det for hulldekker benyttes fugebetong med $D_{maks} = 8$ mm.

Tilslaget skal være velgradert slik at mindre korn kan fylle åpningene til større korn, noe som skal kontrolleres med en sikteprøve. Sikteprøving bør utføres etter NS-EN 993-1, som innebærer at prøvene vaskes og tørkes.

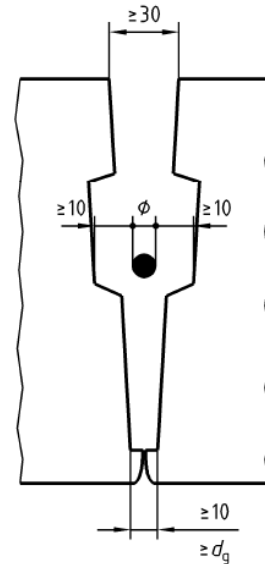
Vekten i tørr tilstand noteres før vasking (M_1) og etter vasking (M_2). Siktene skal være av standard størrelser, og bør være som gitt i NS-EN 12620. Typisk siktestørrelser for fingrus vil være 8 – 4 – 2 – 1 – 0,50 – 0,125 – 0,063 [mm]. Alle siktene summasjonveies og noteres (m_1, m_2, \dots, m_n), den resterende massen på bunnplaten veies for seg selv (P). Fra disse verdiene kan man kalkulere %-siktrest i forhold til M_1 , og fra dette lage en siktkurve. På siktkurven kan man kontrollere om tilslaget er velgradert, og at det ikke er partikkelsprang eller interferens av partikkelstørrelser. Finhetsmodulen kan beregnes med følgende formel:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad (4)$$

Dersom prøven ikke har blitt vasket etter NS-EN 993-1, kan finhetsmodulen beregnes etter en eldre metode [13:54]. Finhetsmodulen beregnes da ved å legge sammen halve %-siktresten fra 0,125 mm og alle hele %-siktresten oppover, summen divideres så med 100.

$$f = \frac{(0,5 \times \%SR_{0,125} + \sum \%SR_{>0,125})}{100} \quad (5)$$

Finhetsmodulen for fingrus er normalt mellom 2 og 4, mens stein (kornstørrelse over 4 mm) vil normalt ligge mellom 6 og 8.



Figur 8
 Krav til kornstørrelse i skjærfuge [18].

I tillegg til korngradering, må tilslaget fuktinnhold måles. For fingrus og sand er dette viktig da overflatearealet per vektenhet er stor, og kan binde opp mye vann. Tørt tilslag vil suge til seg vann og dermed redusere betongens konsistens. På samme måte vil fuktig tilslag kunne tilføre betongen vann, som øker v/c-tallet og reduserer fastheten. Måling av fuktinnholdet kan gjøres ved å tørke tilslaget til det blir lysere (dvs. akkurat i det overflaten blir tørr), dermed kan fuktinnholdet bestemmes basert på vekten av tilslaget før og etter tørkingen.

Enkelte tilslag kan, dersom betongen har et høyt fuktinnhold, reagere med alkaliinnholdet i betongen. Hvis tilslaget reagerer med alkaliene, vil det dannes et reaksjonsprodukt med et større volum enn utgangsstoffene, som vil sprengte betongen over tid. Alkaliinnholdet i betongen kommer i hovedsak fra sement (Na_2O og K_2O), men det kan også komme fra andre kilder som tilsetningsstoffer. Ved å begrense bruken av alkalireaktivt tilslag kan man redusere faren for alkalireaksjoner.

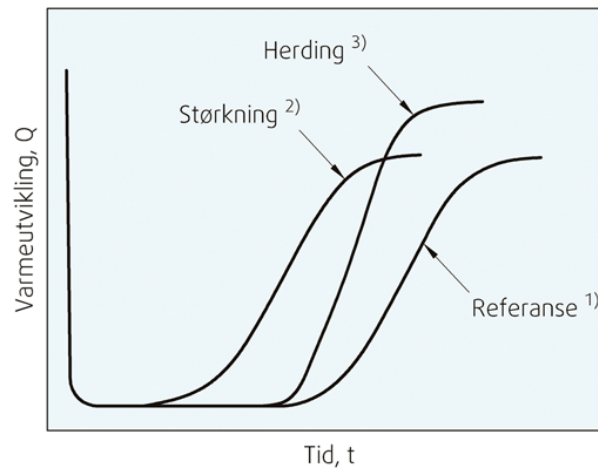
2.1.5 Tilsetningsstoffer

Tilsetningsstoffer er kjemiske stoffer som brukes i betong for å gi ønskede egenskaper i fersk eller herdet betong. NS-EN 934-2; tab. 1 angir forskjellige klasser av tilsetningsstoffer etter stoffets virkning. Tilsetningsstoffer kan ha flere gunstige (og ugunstige) virkninger, men kan kun klassifiseres innen en klasse. Det er blitt innført begrensinger mot innhold av klorider i tilsetningsstoffer, dette er for å hindre at stoffene gjør betongen mindre bestandig mot armeringskorrosjon. I denne oppgaven fokuseres det på de tilsetningsstoffene som kan ha en gunstig virkning ved bruk i fugebetonger under vinterforhold, da spesielt frysepunktnedsettende stoffer.

Akseleratorer

Akselererende tilsetningsstoffer gir en raskere reaksjon mellom vann og de forskjellige mineralene i sementen. Noen akseleratorer inneholder også alkalier som kan redusere betongens slutfastheten ved store doseringer [19]. De to hovedtypene er størkningsakselererende og herdningsakselererende tilsetningsstoffer. Ofte er akselererende tilsetningsstoffer en blanding av disse to typene og gir både akselerert størkning og herding. **Størkningsakselererende tilsetningsstoffer** (også kalt hurtigbindere eller kvikkstoffer) virker inn på reaksjonen mellom vann og sementmineralet C_3A , og reduserer dermed tiden betongen bruker i størkningsfasen (når den går fra plastisk til stiv tilstand). Dette kan være ønskelig ved bruk i sprøytebetong, glatting av dekker, eller ved tetting av vannsig i fjell. Effekten varierer med de ulike tilsetningsstoffene. Men det blir også variasjoner med alkaliinnholdet i betongen, hvor lavalkalisementer får en mer effektiv virkning. Ulempen med bruk av størkningsakselererende stoffer er at den ofte gir en redusert trykkfasthet i betongen. Rene størkningsakseleratorer gir en tidligere varme- og fasthetsutvikling, men effekten på selve utviklingen vil være marginal (se Figur 9).

Herdningsakselererende tilsetningsstoffer gir en raskere herding av betongen, dvs. en raskere varme- og fasthetsutvikling, uten å påvirke støpeligheten. Herdeakseleratorer benyttes blant annet i betongelementer, ved vinterstøping, eller når man ønsker å rive forskaling tidlig. Det kan også benyttes for å kompensere for retarderende effekter fra andre tilsetningsstoffer i betongen. Da det før ble brukt mye kloridbaserte tilsetninger som kunne gjøre armeringen utsatt for korrosjon, er det i dag utviklet flere kloridfrie løsninger. Økt varmeutvikling kan gi temperatursprekker og økt svinnpotensial noe som bidrar til en lavere slutfasthet. Men under vinterstøping kan den økte varmeutviklingen som oftest være gunstig.



Figur 9
 Effekten av akselererende tilsetningsstoff [19].

Plastifiserende tilsetningsstoffer

Plastifiserende (P) og superplastifiserende (SP) tilsetningsstoffer kan øke støpbarheten i fersk betong uten å øke vannmengden. Tilsvarende kan man bruke P- og SP-stoffer til å redusere vannmengden uten å redusere støpbarheten. Ved redusert vannmengde kan man redusere sementmengden for samme v/c-tall, eller redusere v/c-tallet for økt fasthet og bestandighet. Disse stoffene er nødvendig i betong med lavt masseforhold ($v/c < 0,45$) for å gjøre betongen støpelig og bearbeidelig.

Plastifiserende stoffer virker i hovedsak på to måter:

- Friksjonen mellom sammenklistrede sementkorn blir redusert og de glir lettere om hverandre, dette gir en bedre utnyttelse av vannet.
- Vannhinnen rundt tilslagskorn reduseres, dermed blir mer vann frigjort.

P-stoffer basert på lignosulfonater gir en vannreduksjon på 8 prosent [12:37], men kan også gi en størkningsretarderende effekt. Dette skjer ved at det dannes en hinne rundt sementkornene som hindrer sementen å reagere med vannet i en viss periode, en effekt som øker med økt doseringen. P-stoffer kan derfor ikke etterdoseres da retarderingen blir for uforutsigbar. Høyt innhold av finstoffer og finmalt sement med høyt innhold C_3A kan gi en kraftig reduksjon av retarderingseffekten. P-stoffer får tilsatt en luftdemper for å hindre uønsket luftdannelse i betongen, men dette kan også påvirke effekten av andre tilsetningsstoffer. LP-stoffer er plastifiserende uten luftdemper, og vil også tilføre betongen luft.

SP-stoffer basert på melamin og naftalen kan gi en dobbel vannreduksjonen sammenlignet med P-stoffer, i tillegg har SP-stoffer en mindre retarderende effekt. Virkningstiden er også mye kortere og de kan etterdoseres i flere omganger. Den tredje generasjonen SP-stoff består av co-polymerer som benyttes mye i selvkomprimerende betong. Denne typen stoff holder sementkornene fysisk adskilt og er derfor svært effektivt.

Tabell 7
Vannreduksjon for P og SP-stoffer [13:60].

Plastifiserende stoff	Vannreduksjon [%]
Lignosulfonat (P)	8
Melamin (SP)	15-17
Naftalen (SP)	17-19
Co-polymerer (SP)	Opptil 40

Luftinnførende tilsetningsstoffer

Luftinnførende tilsetningsstoffer (L-stoff) tilfører sementpastaen en jevnt fordelt mikroporestruktur. All betong vil inneholde luft fra blandingsprosessen (~2 prosent), men det er også nødvendig å ha kontroll på luftinnholdet. For lite luftinnhold reduserer betongens frostbestandighet, men for mye luftinnhold gir redusert fasthet (grovt regnet gir hver prosent luft ca. 5 prosent reduksjon i fasthet). Karboninnholdet i flygeaske kan redusere virkningen av L-stoffer. Og siden type og mengde av karbonrester i flygeaske vil variere, vil dette også påvirke virkningen av L-stoffer som benyttes sammen med flygeaskesement.

Størrelsen på luftporene har betydning, store luftporer gir en lavere bestandighet mot inntrengning av skadelige gasser og væsker. Når vannet i kapillærporene fryser, vil volumet utvide seg. Det dannes først en propp ved betongoverflaten, vannet stenges inne i kapillærporene og får en sprengvirkning på betongen. Ved en jevn mikrostruktur av luftbobler får vannet nok volum til å utvide seg, og sprengvirkningen blir redusert. Har betongen et luftvolum på ~5 prosent med riktig porestørrelse (0,1-0,3 mm) og fordeling, kan betongen anses som frostsikker. Små luftbobler gir også en smørende effekt på betongen som gir en bedre støpelighet. Med L-stoffer kan man kompensere for tapet av fasthet ved å redusere masseforholdet med bruk av P eller SP-stoffer.

L-stoffer virker ved at de reduserer vannets overflatespenning slik at det lettere dannes skum i sementpastaen ved blanding. Siden overflatespenningen i vannet blir redusert senkes også undertrykket i kappilærporene når betongoverflaten tørker, noe som resulterer i mindre plastisk svinn i betongen. Luftbobler har også den gunstige virkningen at den ved å reduserer den indre bindekraften til massene, som vil redusere faren for separasjon av vann (bleeding).

Frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer

Bruken av frysepunktnedsettende stoffer begynte på 50-tallet da Sovjetunionen startet å bruke store mengder kalsiumklorid (CaCl_2) og natriumklorid (NaCl) i betongen under vinterstøping [20]. Men det ble senere oppdaget at bruken av kloridsalter var uheldig med tanke på armeringskorrosjon. Det ble derfor utviklet frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer uten kloridsalter, og bruken av slike midler har vært vanlig i Finland siden midten av 80-tallet.

Frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer benyttes i betong og mørtler for å redusere vannets frysetemperatur, og består ofte av alkalisalter [19], noe som gjør betongen mer utsatt for alkalireaksjoner. Bruk av frysepunktnedsettende midler er ikke vanlig praksis da det kan resulterer i at betongen kan få en dårligere trykkfasthet [13, 20]. Enkelte frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer kan derimot ha en akselererende effekt og kan derfor bli klassifisert innenfor gruppen akseleratorer som en egen spesialklasse [21]. Ved å akselerere hydratiseringsprosessen vil vannet bindes raskere, og det resterende vannet kan få mer tilgjengelig volum til å utvide seg ved eventuell frysing. I tillegg gir det betongen nok tidligfasthet til å motstå frostsprengning. Andre frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer har

ingen akselererende effekt, og brukes kun til å senke frysepunktet i betongblandingen slik at hydratiseringsprosessen kan fortsette ved minusgrader. En betong uten frysepunktnedsettende tilsetningsstoff vil etter 28 døgn kun utvikle 20 prosent trykkfasthet ved -5 °C, og under 5 prosent trykkfasthet ved -10 °C i forhold til herding ved 20 °C [20]. Det er derfor mer gunstig å benytte frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer enn å la betongen fryse under herding.

Frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer kan bestå helt eller delvis av følgende stoffer:

- Natriumnitritt (NaNO_2) Frysepunktnedsettende/korrosjonshemmende
- Natriumnitrat (NaNO_3) Frysepunktnedsettende
- Kalsiumnitritt ($\text{Ca(NO}_2)_2$) Akselererende effekt
- Kalsiumnitrat ($\text{Ca(NO}_3)_2$) Størkningsakselererende effekt
- Kaliumkarbonat (K_2CO_3) Sterk størkningsakselererende effekt
- Natriumformiat (HCOONa) Retarderende effekt
- Kalsiumklorid (CaCl_2) Akselererende effekt
- Natriumklorid (NaCl) Frysepunktnedsettende

Når frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer tilsettes vann så økes molariteten til løsningen, dvs. antall partikler i ett en gitt masse. Dette reduserer damptrykket i vannet som gir redusert frysepunkt. For en ideell løsning kan man utrykke frysepunktet med følgende formel [22]:

$$\Delta T_f = E_f \times m \times i \quad (6)$$

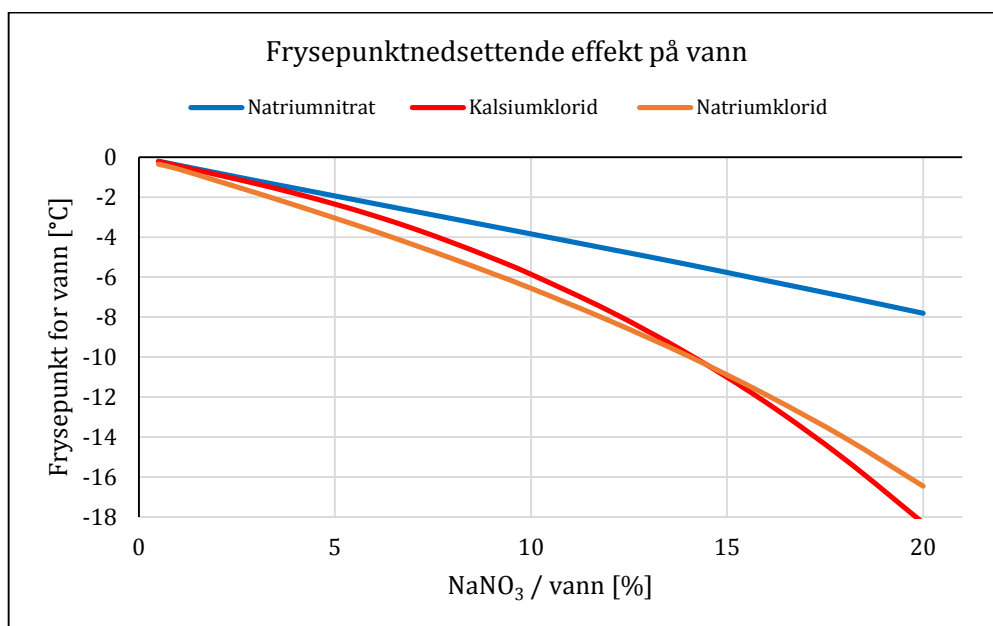
Der ΔT_f er reduksjonen av frysepunktet i °C ($T_{\text{vann}} - T_{\text{stoff}}$).

E_f er den kryoskopiske konstanten for vann, som er $1,86 \text{ K} \cdot \text{Kg} \cdot \text{mol}^{-1}$.

m er molariteten til stoffet per kg med vann [$\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$].

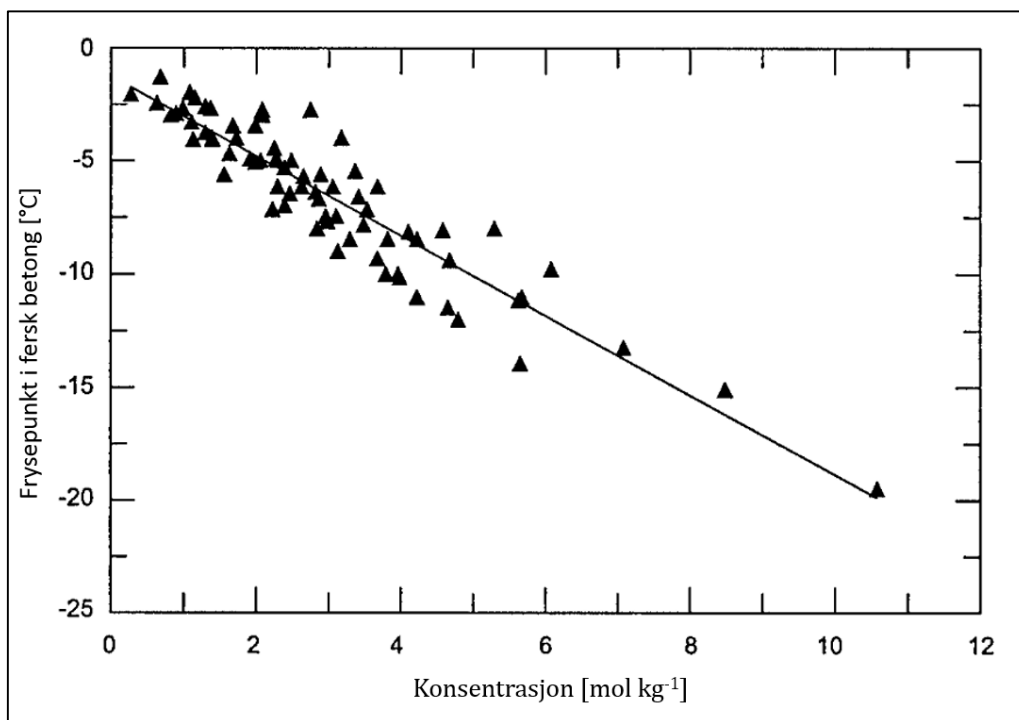
i er Van 't Hoffs faktor som angir hvor mange partikler som produseres i løsningen.

Siden denne ligningen er basert på en ideell løsning, vil den kun være nøyaktig hvor man har en fortynnet løsning (dvs. en lav konsentrasjon av frysepunktnedsettende tilsetningsstoff). For å redusere frysepunktet med en betydelig temperatur, kreves det relativt store konsentrasjoner med frysepunktnedsettende tilsetningsstoff. Fra Figur 10 ser man at det må tilsettes 20 prosent natriumnitrat for å senke frysepunktet til -8 °C i rent vann, dermed blir Formel (6) for unøyaktig å bruke i denne sammenhengen.



Figur 10
 Frysepunktnedsettende effekt på vann [22].

Man kan fortsatt benytte seg av prinsippet med at økt molaritet gir redusert frysepunkt. Det Amerikanske forsvaret [21, 23] utviklet en empirisk modell som gir en sammenheng mellom frysepunktet i prøvemørtler og molariteten til tilsetningsstoff. Modellen ble utviklet ved at de tok prøver av fugemørtler med ulike konsentrasjoner av ulike tilsetningsstoffer (denne modellen vil derfor virke uavhengig av type tilsetningsstoff). Ved å benytte minste kvadraters metode fant de fram til en sammenheng mellom frysepunkt og molaritet.



Figur 11
 Frysepunkter for betonger med ulike frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer [23].

Sammenhengen kan uttrykkes med følgende formel:

$$FP = -1,76 \text{ mol} - 1,28 \quad (7)$$

Der: FP er betongens frysepunkt.
mol er molariteten til løsningen [$\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$].

En ren betongblanding vil etter denne modellen fryse på $-1,28\text{ }^\circ\text{C}$. Dette passer rimelig med SINTEF Byggforsk som oppgir $-2\text{ }^\circ\text{C}$ som betongens frysepunkt. Frysepunktet vil også være avhengig av andre faktorer, spesielt betongens masseforhold [1].

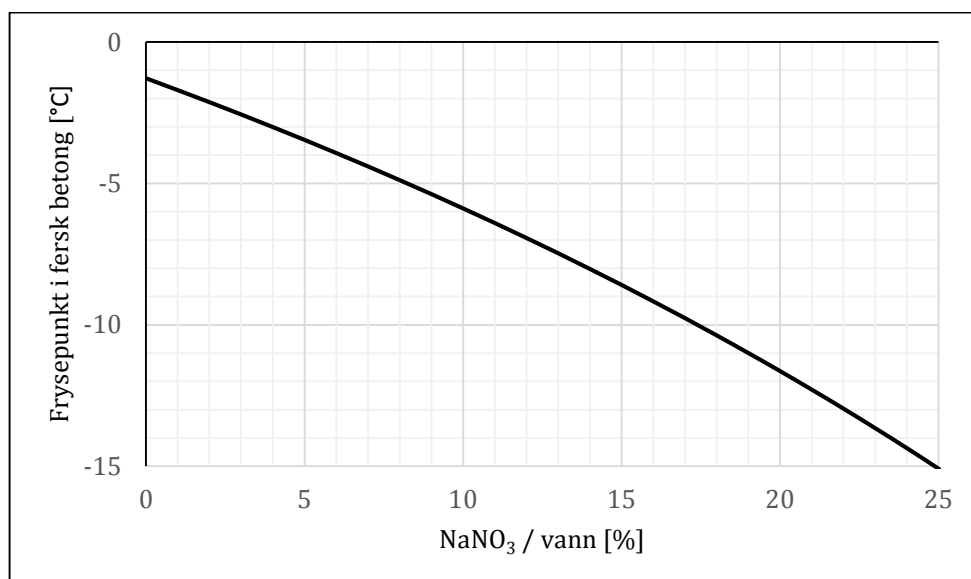
Formelen gir kun et estimert frysepunkt basert på molaritet, og kan dermed ikke uten videre benyttes som dokumentasjon til betongblandinger. Man kan se fra Figur 11 at de ulike tilsetningsstoffene varierer med $\pm 2,5\text{ }^\circ\text{C}$ fra denne formelen. For å finne nøyaktig frysepunkt må det tas prøver av den aktuelle resepten. Formelen kan derimot benyttes til å finne en estimert verdi, uavhengig av typen tilsetningsstoff, på hvor frysepunktet kan ligge.

2.2 NATRIUMNITRAT (NaNO_3)

NaNO_3 leveres enten som pulver eller i flytende form (for eksempel en løsning på 40 prosent NaNO_3). NaNO_3 vil redusere slutfastheten for betong med 20-30 prosent [24], der en økt dosering av NaNO_3 gir en økt reduksjon. Det er funnet en tendens til at reduksjonen er større for sementer med flygeaske enn for rene portlandsementer [25]. Det er ikke kjent hvordan NaNO_3 virker inn på sementpastaen, men det er klart at NaNO_3 forstyrrer reaksjonen mellom vann og sement, og i en større grad reaksjonen mellom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og flygeaske. NaNO_3 bør derfor kun benyttes når det faktisk er risiko for at fugebetongen kan fryse, da en tilsvarende resept uten NaNO_3 vil få en større slutfasthet ved plussgrader.

NaNO_3 er kloridfritt ($<0,01$ prosent kloridinnhold) og kan derfor benyttes med armert betong. NaNO_3 inneholder derimot store mengder alkalier i form av natrium (opptil 40 prosent Na_2O ekv. i tørrstoff), noe som begrenser bruken av NaNO_3 for mange typer betongkonstruksjoner. Fugebetong vil som oftest bli benytt til innendørs oppvarmede hulldekker, som gir en lav nok fuktighet til at alkaliinnholdet ikke har stor betydning. Men man må være oppmerksom på at NaNO_3 ikke skal benyttes der det kan forekomme fuktig miljø for fugebetongen, som for eksempel i en svømmehall.

Da natriumnitrat ble brukt som tilsetningsstoff i denne oppgaven, ble det laget en graf for å estimere frysepunkt i betongen ved bruk av NaNO_3 . NaNO_3 har en molar masse på $84,99\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ og en Van 't Hoffs faktor på 2 [24] som ble benyttet til å beregne kurven i Figur 12. Siden Formel (7) er basert på prøver ned til $-20\text{ }^\circ\text{C}$, så bør ikke kurven benyttes til lavere temperaturer uten videre. Det er uansett ikke hensiktsmessig å støpe ved så lave temperaturer, da andre forhold (sikkerhet og begrensinger ved teknisk utstyr) tilsier at montasjearbeider stanser ved ca. $-15\text{ }^\circ\text{C}$.



Figur 12
Estimert frysepunkt i betongblanding med NaNO₃ i forhold til vann.

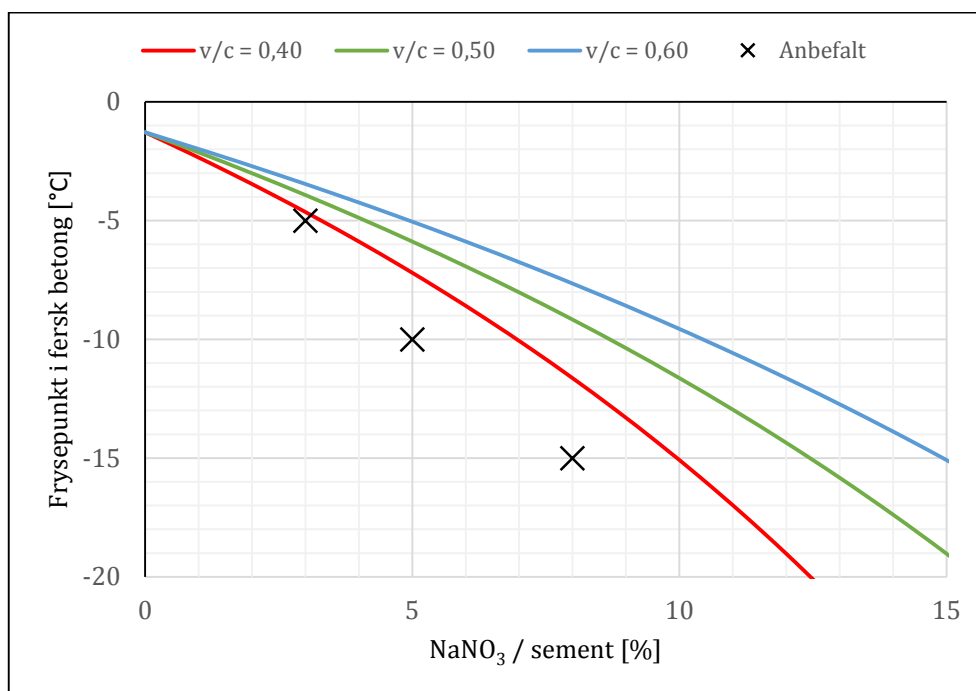
Anbefalte doseringer fra ulike tilsetningsstoffleverandører er gitt i følgende tabell:

Tabell 8
Anbefalt dosering¹ av tilsetningsstoff fra ulike leverandører av NaNO₃.

Produsent	Produkt	Anbefalt dosering [% av sement]		
		-5 °C	-10 °C	-15 °C
BASF	Natriumnitrat	-	5,0	8,0
Sika	Antifreeze-S	3,0	5,0	8,0
Mapei	Antifreeze N			
	v/c < 0,45	2,0	3,5	5,0
	v/c ≥ 0,45	2,5	4	6,0

Leverandørene av natriumnitrat oppgir anbefalt doseringsmengde på sine produktblad. De fleste gir doseringsmengde som prosent av sementmengden, men oppgir ikke hvilket masseforhold dette er regnet for (bare Mapei gjør dette). For eksempel hvis det anbefales 5 prosent av sementvekten, vil $v/c = 0,4$ gi et NaNO₃-innhold på 12,5 prosent av vannmengden. Og $v/c = 0,5$ gir 10 prosent av vannmengden. Dette betyr at økt v/c -tall vil tilsi en økt dosering av NaNO₃. Fra Figur 12 er det laget ulike estimater for dosering av NaNO₃ i forhold til v/c -tallet. Fra de nye estimerte grafene i Figur 13 kan man se at ved å øke v/c -tallet med 0,1 ved -5 °C, så bør doseringen av NaNO₃ økes med 1 prosent. Og ved å øke v/c -tallet med 0,1 ved -15 °C, bør doseringen av NaNO₃ økes med 2 prosent. Men man må følge anbefalt doseringsmengde fra leverandør istedenfor den estimerte verdien, da de estimerte grafene kun er basert på molaritet. Frysepunkt nedsettende tilsetningsstoff vil være mer komplisert sammensatt, og graden tar derfor ikke hensyn til effekten av de kjemiske forbindelsene.

¹ Dosering blir her gitt som tørrstoffinnhold.



Figur 13
 Estimert frysepunkt og anbefalte doseringer fra leverandører.

I denne oppgaven ble det benyttet "Natriumnitrat, 40%" fra BASF, og de anbefalte doseringene er opptil 3 prosent lavere enn de estimerte verdiene, noe som også tilsvarer de anbefalte doseringene fra Sika. Mapei har enda lavere anbefalte doseringer. Siden produktene fra de forskjellige leverandørene er omtrent identiske, tilsier det at de opererer med forskjellige sikkerhetsmarginer for frysepunktet. Det at de anbefalte doseringene ligger godt under de estimerte verdiene tilsier at NaNO₃ har kjemiske egenskaper som gjør den sært god som rent frysepunktnedsettende tilsetningsstoff.

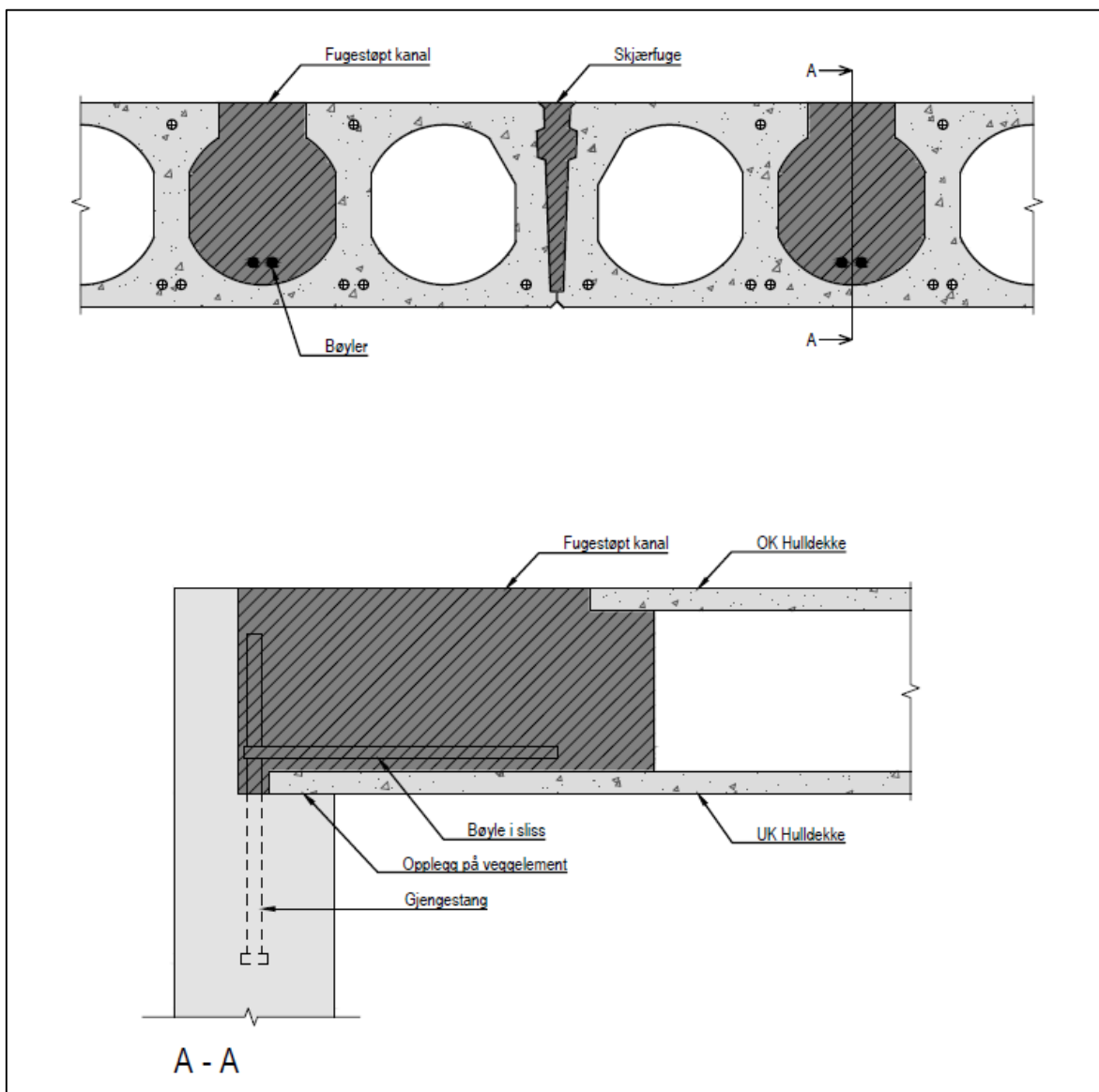
2.3 FUGESTØP

Når hulldekkene er riktig plassert, blir elementene justert slik at ulike oppbøyninger blir utjevnet, normalt blir fugesprang utjevnet på undersiden [26:50]. Når alle avstander er innenfor gitte toleranser, kan etasjen fugestøpes. Dersom fugespranget mellom hulldekkene er stor, må fugene forskales på undersiden. Andre hull og åpninger må dekkes til med plater eller lignende. Alle fuger må være rengjorte og fri for snø og is [27:94]. Man kan benytte trykkluft til å fjerne snø, støv, og andre materialer. Man kan benytte gassbrenner for å fjerne is og tørke fugene, men fugene må ikke være for varme når fugestøpet starter. Fugebetongen kan leveres med betongbil fra betongfabrikk, og den kan pumpes, løftes eller trilles opp til hulldekkene hvor den fylles ned i fugene mellom hulldekkene og kanalforbindelsene.

Fugebetongen skal være lettflytende slik at den lett fyller alle fuger og kanaler i hulldekkene. For at armeringen skal få god heft, må fugebetongen dekke armeringen fullstendig. Betongen vil også være med på å beskytte armeringen. Det er viktig at betongen kan oppnå høy fasthet da skjærfugene og kanalforbindelsene ofte må kunne overføre store krefter mellom hulldekker og andre konstruksjonsdeler. Lavt masseforhold i fugebetongen er ønskelig pga. økt bestandighet, bedre beskyttelse av armering, og lavere byggfukt. Lavere vanninnhold gir også mindre vann i den ferske og delvis herdede betongen som kan fryse til is. Når det fugestøpet er ferdig utført, blir overflødig fugebetong skrapet vekk fra dekket, slik at fuger og kanaler går i ett med overkanten av hulldekket. Undersiden bør også kontrolleres, og overflødig fugebetong kan kastes vekk før fugebetongen størkner. Ved høye lufttemperaturer må dekkene vannes før fugestøpet begynner, deretter vannes dekket igjen ca. 3 timer etter støp.



Figur 14
Kanal og skjærfuge i hulldekke.



Figur 15
 Eksempel på utførelse av skjærfuge og kanalforbindelse fra hulldekke til vegg.

NS-EN 13670 angir herdetiltak som skal utføres på byggeplass under vinterforhold. Men tiltakene er beregnet på støping av større volumer (i forhold til fugestøp), så flere av tiltakene får redusert eller ingen effekt for fugebetongen om vinteren

NS-EN 13670; pkt. 8.5(12): "Betongens overflatetemperatur skal ikke synke under 0 °C før betongens overflate har fått en trykkfasthet på minst 5 MPa."

Bakgrunnen for kravet er at frost i fersk og delvis herdet betong kan føre til permanent reduksjon av fasthet og bestandighet. Frost i fersk betong vil føre til grovere porer og store hulrom i betongen. I delvis herdet betong vil det frie vannet i betongen utvide seg og sprengne betongen dersom betongen ikke har stor nok fasthet. Den eneste muligheten til å rent teknisk tilfredsstillende dette kravet vil være å isolere og varme opp betongelementene. Siden fugens volum er såpass liten, vil ikke fugebetongen kunne generere nok varme til at temperaturen holder seg over 0 °C.

Ved bruk av frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer kan betongen gå under 0 °C uten at betongen tar varig skader. Dette punktet kan derfor modifiseres til følgende når det brukes frysepunktnedsettende tilsetningsstoff i fugebetongen:

"Betongens overflatetemperatur ved dosering av X% frysepunktnedsettende tilsetningsstoff skal ikke synke under Y °C, før betongens overflate har fått en trykkfasthet på minst 5 MPa."

X og Y for NaNO₃ kan for eksempel være gitt som i følgende tabell:

Tabell 9
Dosering av NaNO₃ og temperaturgrense.

X [%]	Y [°C]
3	-5
5	-10
8	-15

NS-EN 13670; pkt. 8.2 (8): *"Grunn, berg, forskaling eller konstruksjonsdeler som er i kontakt med fersk betong, skal ha en temperatur som ikke fører til at betongen fryser før den har tilstrekkelig fasthet til å unngå frostskafer."*

NS-EN 13670; pkt. 8.2 (9) *"Der omgivelsestemperaturen er lav eller antas å være lav på støpetidspunktet eller i herdeperioden, skal det tas forholdsregler for å beskytte betongen mot frostskafer."*

Disse to kravene har sammenheng med pkt. 8.5(12), og tar utgangspunkt i at betongen ikke skal ta varige frostskafer.

NS-EN 13670; pkt. 8.2(5): *"Formen bør være fri for rusk, is, snø og stående vann."*

Formen vil i hovedsak være betongelementene som skal fuges. Hvis fugebetongen støpes rett på is og snø, vil heften til betongelementene bli kraftig redusert. Is- og snøklumper vil føre til store hulrom som reduserer fugens fasthet og bestandighet. Det er derfor viktig at dette gjøres selv med bruk av frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer, noe som kan gjøres med lufttrykk, damp, varmluft, eller kosting.

2.4 SIMULERING

Simuleringsprogrammer kan forutsi betongens utvikling med hensyn på temperatur og fasthet. Resultatene fra disse programmene er basert på input fra bruker i form av geometri, betonegenskaper, og randbetingelser. De forskjellige programmene har ulike funksjoner, og noen kan også simulere forskyvninger, indre spenninger, og riss. Men mer komplekse programmer krever også mer input og kunnskap fra bruker. I denne oppgaven benyttes Hett 97 som er et enkelt endimensjonalt program med predefinerte betongresepter, og HACON som er et mer komplekst todimensjonalt program basert på elementmetoden. Andre simuleringsprogrammer som benyttes på markedet er TempSim, 4C-Temp&Stress, og Crack TeSt COIN.

2.4.1 Hastighetsfunksjonen

Betongens reaksjonshastighet $H(T)$ beskrives som en funksjon av temperaturen T . Denne er basert på Arrhenius funksjon, og reaksjonshastigheten er gitt relativt til hastigheten ved 20 °C (293 K) [28].

$$H(T) = e^{\frac{E(T)}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T} \right)} \quad (8)$$

Der $E(T)$ er empirisk aktiveringsenergi/temperaturfølsomheten.
 R er gasskonstanten, $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$.
 T er temperaturen gitt i °C.

Aktiveringsenergi $E(T)$ er avhengig av temperatur og sementtype. For temperaturer under 20 °C vil aktiveringsenergien være temperaturfølsom, og vil øke med synkende temperatur.

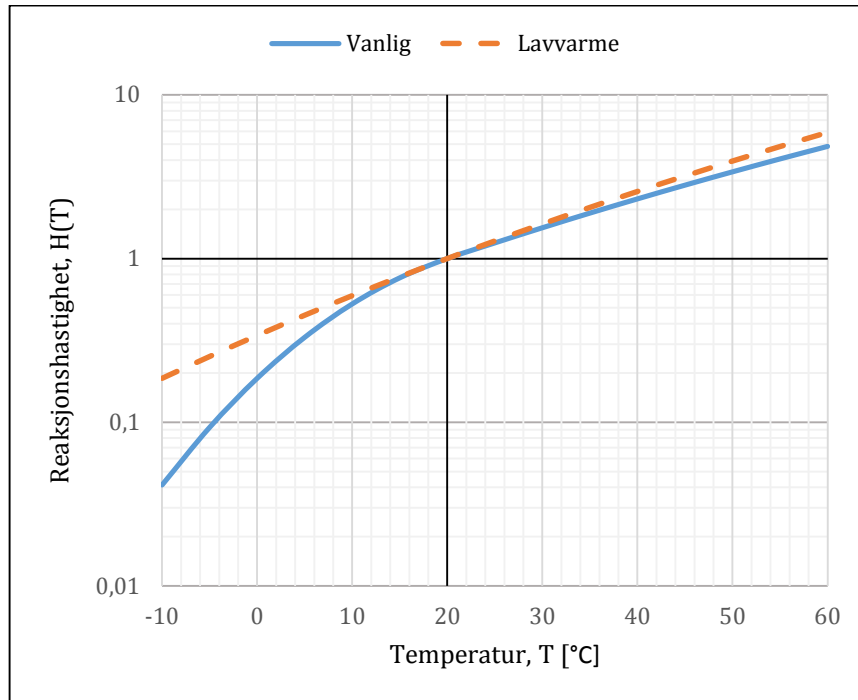
Aktiveringsenergien er gitt med følgende formel:

$$E(T) = \begin{cases} A + B(20 - T), & T < 20 \text{ °C} \\ A, & T \geq 20 \text{ °C} \end{cases} \quad (9)$$

A og B blir funnet fra forsøk etter NS-EN 3656, og er avhengig av sementtype og masseforhold. En økt innhold av flygeaske i betongen vil gi en økt aktiveringsenergi. SINTEF [29] angir følgende standardverdier dersom man mangler mer nøyaktige verdier:

Tabell 10
Konstantene for aktiveringsenergi for to betongtyper [29].

Betongtype	A [kJ/mol]	B [kJ/mol]
Vanlig	32 000	1 200
Lavvarme (30% FA)	36 000	0



Figur 16
 Hastighetsfunksjonen for to ulike betongtyper.

2.4.2 Modenhetsprinsippet

Betongens modenhet er den herdetiden betongen må ha for å få samme fasthet som en tilsvarende betong ved 20 °C, dvs. dens ekvivalente alder ved 20 °C. For en konstant temperatur blir modenheten et produkt av hastighetsfunksjonen $H(T)$ og tiden t . For en konstant temperatur $T = 20$ °C blir altså hastighetsfunksjonen $H(20) = 1$, og modenheten blir det samme som medgått tid. For temperatur over 20 °C blir modenheten større enn medgått tid.

$$M = H(T) \times t \quad (10)$$

Der t er tiden fra blandetidspunktet.
 T er konstant temperatur.

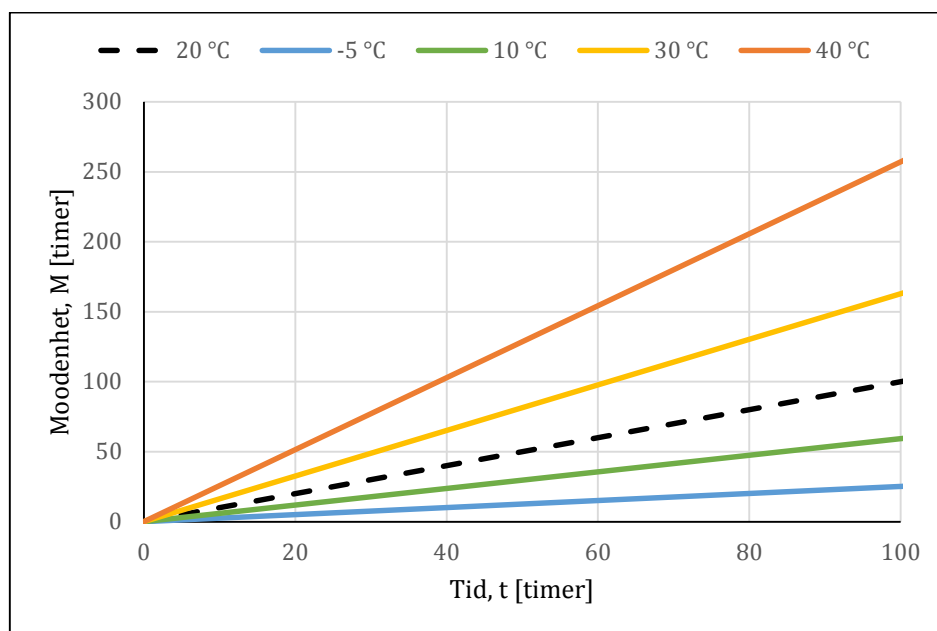
Siden temperaturen vil variere over herdeforløpet, kan man angi modenheten som et integral av hastighetsfunksjonen med hensyn på tid.

$$M = \int_0^t H(T) dt \quad (11)$$

Der T er varierende temperatur.

Man kan også med gitte tidsintervaller ha loggført temperaturen i betongen på byggeplass. Det vil da være mer anvendelig å beregne modenhet ved å multiplisere gitt tidsintervall med gjennomsnittstemperaturen for intervallet, deretter summeres produktet for alle intervallene.

$$M = \sum H(T_i) \times \Delta t_i \quad (12)$$



Figur 17
Eksempel på en betongs modenhetsutvikling ved ulike konstante herdetemperaturer.

2.4.3 Fasthet- og varmeutvikling

Betongens adiabatisk¹ temperaturstigning kan beregnes fra følgende formel:

$$\Delta T = \frac{Q \times C}{\rho_r \times c_b} \quad (13)$$

- Der ΔT er den adiabatisk temperaturstigningen [°C].
 Q er sementens spesifikke varmeutvikling [J/kg].
 C er sementmengde i betongen [kg/m³]
 ρ_r er betongens densitet [kg/m³]
 c_b er betongens spesifikke varmekapasitet [J/(kg °C)]

Både den isoterme² fasthetsutviklingen og den adiabatisk varmeutviklingen i betongen kan beskrives med en generell egenskapsutviklingsfunksjon [28].

$$y = y_\infty \times e^{\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha} \quad (14)$$

- Der y er egenskapens verdi
 y_∞ er egenskapens sluttverdi.
 τ_e er en karakteristisk retardasjonsparameter for betongen [timer].
 M er betongens modenhet [timer].
 α er en karakteristisk krumningsparameter for betongen.

¹ Uten varmetap til omgivelsene.

² Fasthetsutvikling ved konstant temperatur.

Fasthetsutvikling

Følgende formel kan benyttes til å beskrive betongens fasthetsutvikling:

$$f_c(M) = f_{c\infty} \times e^{\left(-\frac{t_e}{M}\right)^\alpha} \quad (15)$$

Der $f_c(M)$ er betongens trykkfasthet ved modenhet M [MPa].
 $f_{c\infty}$ er betongens slutfasthet [MPa].

Varmeutvikling

Følgende formel kan benyttes til å beskrive betongens varmeutvikling:

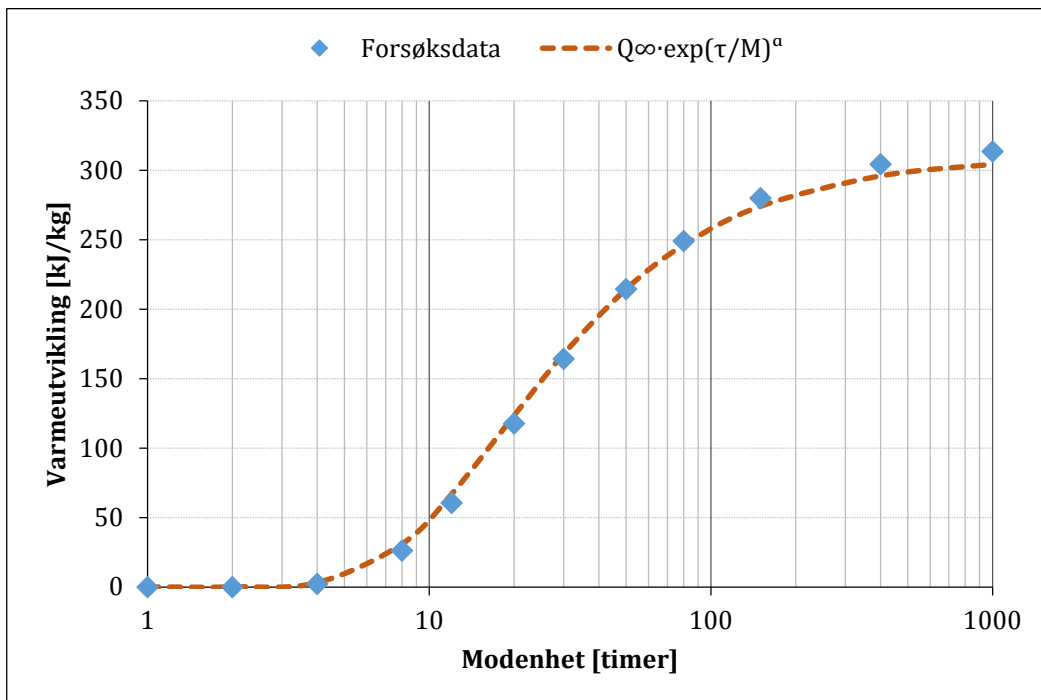
$$Q(M) = Q_\infty \times e^{\left(-\frac{t_e}{M}\right)^\alpha} \quad (16)$$

Der $Q(M)$ er betongens spesifikke adiabatisk varmeutvikling ved modenhet M [J/kg].
 Q_∞ er betongens totale varmeutvikling [J/kg].

Ved å snu på Formel (13) kan man finne den adiabatisk varmeutviklingen som en funksjon av temperaturstigningen.

$$Q = \frac{\Delta T \times \rho_r \times c_b}{C} \quad (17)$$

Ved bruk av herdekasse kan temperaturstigningen logges, og den adiabatisk varmeutviklingen kalkuleres. Ved å tilpasse Formel (16) med forsøksdataene, kan man finne de empiriske parameterne Q_∞ , τ_e , og α . Tilpassingen av formelen kan gjøres med regresjon (for eksempel minste kvadraters metode) ved bruk av regneprogram.



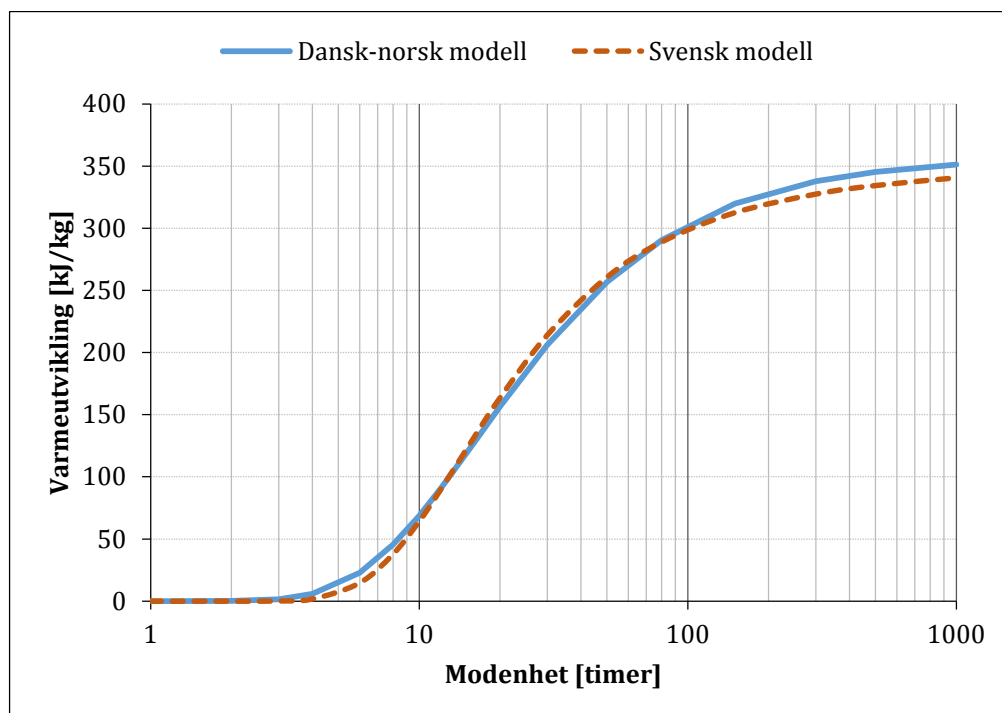
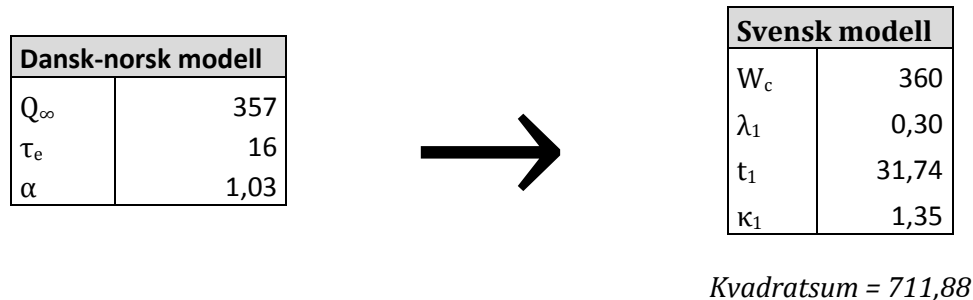
Figur 18
 Eksempel på varmeutvikling med trendlinje tilpasset forsøksdata.

Formel (16) er normalt brukt i Norge og Danmark, i Sverige benyttes en litt annerledes modell. Den svenske modellen er mer komplisert og krever en ekstra parameter. HACON er et svensk simuleringsprogram og benytter derfor disse parameterne.

$$Q(t_e) = W_c \times e^{(-\lambda_1 \times \ln(1 + \frac{t_e}{t_1})^{-\kappa_1})} \quad (18)$$

Der $Q(t_e)$ er varmeutviklingen etter modenhet t_e [J/kg].
 W_c er varmeutviklingen etter uendelig lang tid [J/kg].
 t_e er modenheten til betongen [timer].
 λ_1 , t_1 , og κ_1 er empiriske parametere.

Parameterne finnes ved bruk av forsøksdata på samme måte som for den dansk-norske modellen. Det er også mulig å konvertere parameterne fra den ene modellen til den andre med regresjon, men dette gir mindre nøyaktige parametere. I det følgende eksempelet er det gitt dansk-norske parameter for Aalborg Rapidsment som konverteres til svenske parametere.



Figur 19
 Konvertering fra dansk-norsk til svenske parametere med minste kvadraters metode.

2.4.4 Varmeroverføring i FEM-modell

Temperaturøkningen for et material vil være avhengig av varmetilførsel, varmestrøm, masse, og spesifikk varmekapasitet. I tillegg til å være temperaturavhengig, vil varmekapasiteten endre seg når betongen herder. Hvor raskt varmen kan fordele seg i materialet er også avhengig av varmekonduktiviteten. Følgende tabell angir noen typiske materialparametere:

Tabell 11

Typiske materialparametere for fersk og herdet betong [6:18].

	ρ [kg/m ³]	c [J/(Kg·K)]	λ [W/mK]
Fersk betong	2 400	1 000	2,1
Herdet betong	2 400	800	1,7

Varmebalansen i et element kan uttrykkes med følgende formel:

$$\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + C' \times \dot{T} - Q = 0 \quad (19)$$

Der q er varmestrømsvektoren.
 x_i angir et kartesisk koordinatsystem.
 C' er varmekapasiteten per volumenhet.
 \dot{T} er temperaturforandring med hensyn på tid.
 Q er generert varme.

Varmestrømmen vil være avhengig av temperaturforskjellen og materialets varmekonduktivitet, og er gitt med følgende formel:

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (20)$$

For å finne varmekapasiteten per volumenhet, multipliserer man den spesifikke varmekapasiteten med materialets densitet.

$$C' = \rho \times c \quad (21)$$

Generert varme kan uttrykkes som den deriverte av adiabatisk varmeutvikling med hensyn på tid:

$$Q = \frac{\partial(CQ(t_e))}{\partial t} \quad (22)$$

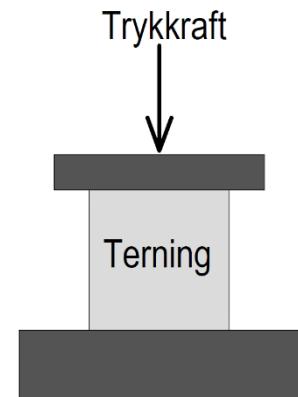
Der C er sementmengden per volumenhet betong [kg/m³].
 $Q(t_e)$ er den adiabatisk varmeutviklingen etter Formel (18).

Med alle disse parameterne er det nå mulig å simulere temperatur- og fasthetsutvikling for betong. I tillegg til geometri må det også defineres randbetingelser (lufttemperatur, vind, isolasjon, og forskaling) som også vil ha betydning for varmestrømmen.

3 LABORATORIEPRØVER

3.1 INNLEDNING

Støping av terninger og trykkprøving ble utført hos Unicon, avdeling Sjursøya. Trykkprøving er en standardisert metode for å finne trykkfastheten til betong. I denne oppgaven ble det benyttet prøveterninger med tverrsnitt 100×100 mm, som er vanlig i Norge. Internasjonalt benyttes det sylinderformer med diameter 150 mm og høyde 300 mm, og gir ca. 80 prosent trykkfasthet i forhold til terning. Trykkfastheten finnes ved å dividere trykkraften ved brudd med tverrsnittet.



Figur 20
 Trykkprøving av terning

$$\text{Trykkfasthet [MPa]} = \frac{\text{Trykkraft [N]}}{\text{Tverrsnitt [mm}^2\text{]}}$$

Vanligvis blir terningene lagret i vannbad med temperatur på $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, men under disse prøvene ble de lagret i fryseskap. Hensikten med prøvene var å finne fastheten til fugebetongen om vinteren. Ved å lagre prøvene i fryseskap ønsker man å simulere temperaturforholdene som fugebetongen faktisk blir utsatt for på byggeplassen. Fastheten er forventet å bli redusert på grunn av den lave temperaturen og den ugunstige effekten av NaNO_3 . Dette vil bli forsøkt kompensert for ved å benytte et lavt masseforhold i fugebetongen. Terningene trykkes etter 1, 2, 3, 4, 7 og 28 døgn for å kartlegge fasthetsutviklingen. To terninger ble også lagret i $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ vannbad, med og uten NaNO_3 , og ble trykket etter 28 døgn.

3.2 HENSIKT

- Kartlegge tidlig- og sluttfasthet for betong tilsatt NaNO_3 ved minusgrader.
- Ved å påse fasthetsutvikling kan man også bekrefte at betongen ikke har fryst til is.
- Kartlegge effekten av flygeaske på trykkfastheten i kombinasjon med NaNO_3 .
- Resultatene i form av fasthetskurver benyttes som dokumentasjon for fugebetongen på byggeplass.

3.3 UTSTYR

- Spade
- Målespann
- Vekt
- Blandemaskin
- Vibratorbord eller komprimeringsstav av stål
- Prøveformer
- Fryseskap
- Trykkprøvingsmaskin

3.4 PROSEDYRE

Oppmåling og blanding av delmaterialene foregikk i romtemperatur.

Det ble veid opp til ca. 15 liter prøveblanding per serie.

Fryseskapet var målt til gitt temperatur før prøvene ble laget.

1. Utstyret rengjøres før bruk.
2. Tilslag, sement, og tilsetningsmaterialer veies opp til riktig mengde.
3. Vann og NaNO_3 veies opp til riktig mengde og blandes sammen.
4. SP-stoff veies opp i riktig mengde.
5. Tilslag, sement, og tilsetningsmaterialer tørrblandes i 60 sekunder.
6. Vannet tilsettes og SP-stoff tilsettes 10 sekunder etter at alt vannet er tilsatt.
7. Våtblending i 60 sekunder etter tilsetning av vann.
8. Henstilling i 120 sekunder med kontroll av konsistens.
9. Eventuell etterdosering av SP-stoff og sluttblanding i 60 sekunder.
10. Formene fylles med betong (7 terninger + 1 reserve).
11. Betong komprimeres på vibratorbord. Alternativt kan betongen gis 25 støt med en komprimeringsstav.
12. Overflødig betong fjernes og overflaten avrettes.
13. Dato og tidspunkt for støp noteres.
14. Terningene merkes og plasseres i fryseskap.
15. Terningene trykkes etter 1, 2, 3, 4, 7, og 28 døgn.
16. Dato, tidspunkt og resultat for trykkingen noteres. Eventuelle avvik må kommenteres.



Figur 21
Tørrblanding av delmaterialer.



Figur 22
Ferdigblandet fugebetong.



Figur 23
Prøveformene fylles med fersk fugebetong.



Figur 24
Trykkprøving av terning.

3.5 PRØVERESEPTER

Det ble trykket 8 ulike resepter, med forskjellig innhold av NaNO_3 og ulik lagringstemperatur. Halvparten av reseptene inneholdt 20 prosent flygeaske.

Felles for alle reseptene:

$v/b = 0,4$

Konsistens: S5

Alle reseptene inneholdt 5 prosent silikastøv.

Pulvermengde: 480 kg/m^3 (uten FA) og 463 kg/m^3 (med FA).

Som tilslag ble det brukt naturlig gradert sand med $D_{\text{max}} = 8 \text{ mm}$.

SP-stoff besto av MasterGlenium SKY 615 (tidligere Glenium Sky 615).

Frysepunktnedsettende tilsetningsstoff besto av "Natriumnitrat, 40%" fra BASF.

Serie A (lagret i $-5 \text{ }^\circ\text{C}$):

A1: 2% NaNO_3 0% FA

A2: 2% NaNO_3 20% FA

A3: 5% NaNO_3 0% FA

A4: 5% NaNO_3 20% FA

A5: 8% NaNO_3 0% FA

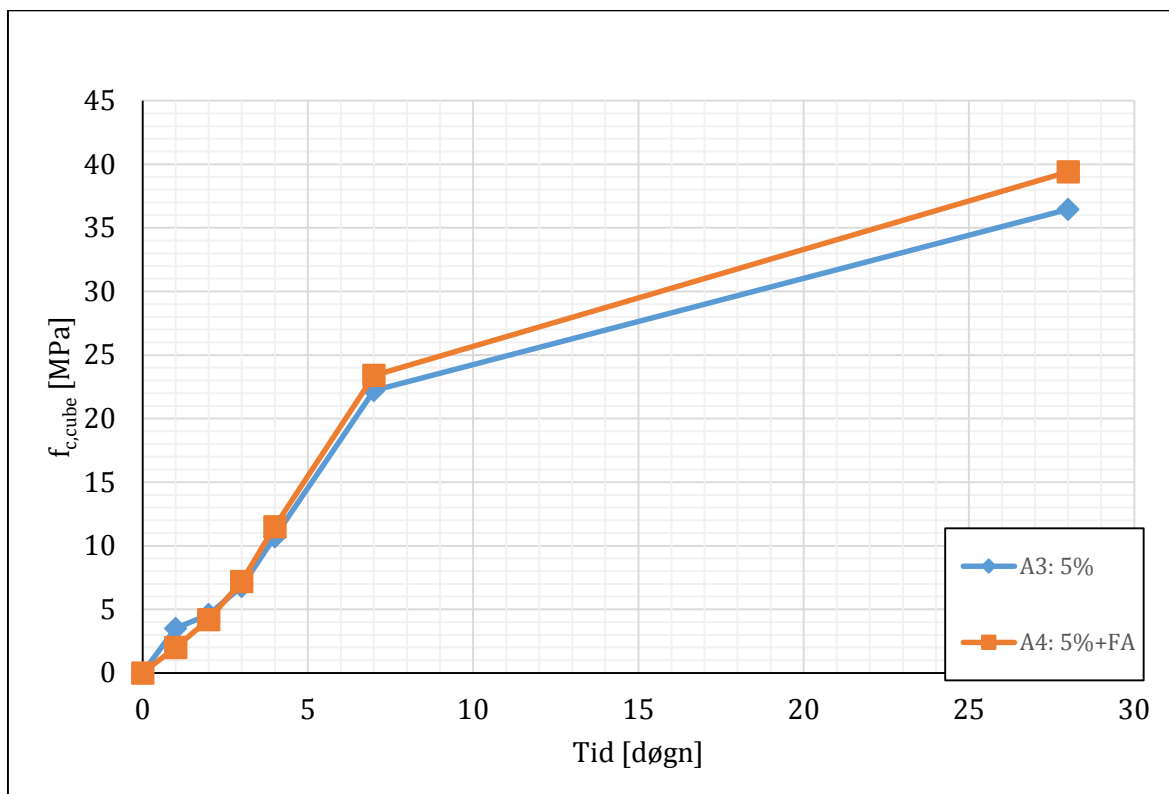
A6: 8% NaNO_3 20% FA

Serie B (lagret i $-10 \text{ }^\circ\text{C}$):

B1: 8% NaNO_3 0% FA

B2: 8% NaNO_3 20% FA

3.5.1 Prøveserie 1: 28 døgn -5 °C



Figur 25
 Trykkfasthet etter 28 døgn i -5 °C for 5% NaNO₃ med og uten FA.

Resultat for 28 døgn i 20 °C vannbad:

5% NaNO₃ + 20% FA: 50,3 MPa

0% NaNO₃ + 20% FA: 63,2 MPa

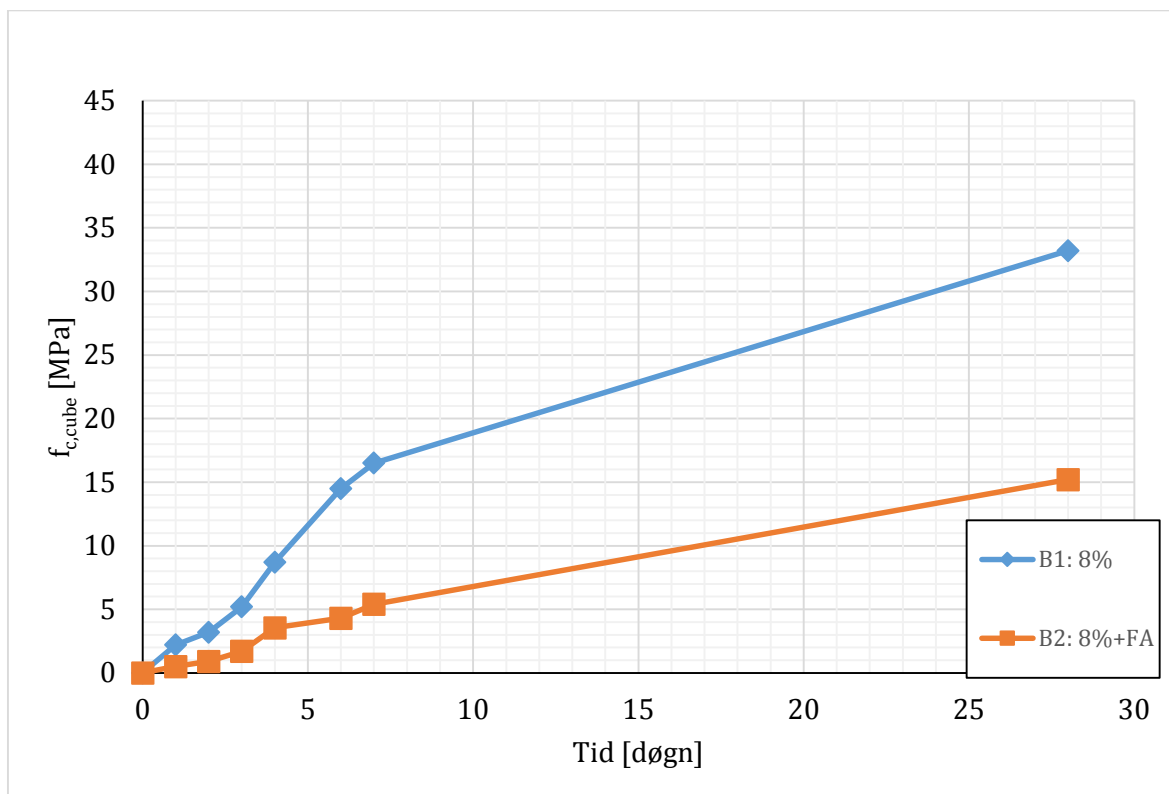
3.5.1.1 Kommentarer

Når prøven ble lagret i vannbad på 20 °C, ble fastheten med 5% NaNO₃ redusert med ca. 20 prosent i forhold til en tilsvarende resept uten NaNO₃.

Fasthetsutviklingen viser at hydratiseringsprosessen fortsetter ved -5 °C. Dette bekrefter at vannet ikke har fryst til is. Med begge reseptene oppnås det en tidligfasthet på 5 MPa etter ca. tre døgn. Betongen er dermed motstandsdyktig mot frostsprengning etter dette tidspunktet.

Pozzolanreaksjoner har vært antatt å kreve en temperatur på over 5 °C for å kunne starte, og NaNO₃ har antatt å ha en mer ugunstig effekt på flygeaskesementer enn på rene portlandsementer. Men i dette forsøket har flygeasken ingen ugunstig effekt på trykkfastheten. Her gjenspeiler flygeasken den vanlige effekten som er en litt lavere tidligfasthet med en høyere slutfasthet.

3.5.2 Prøveserie 2: 28 døgn -10 °C



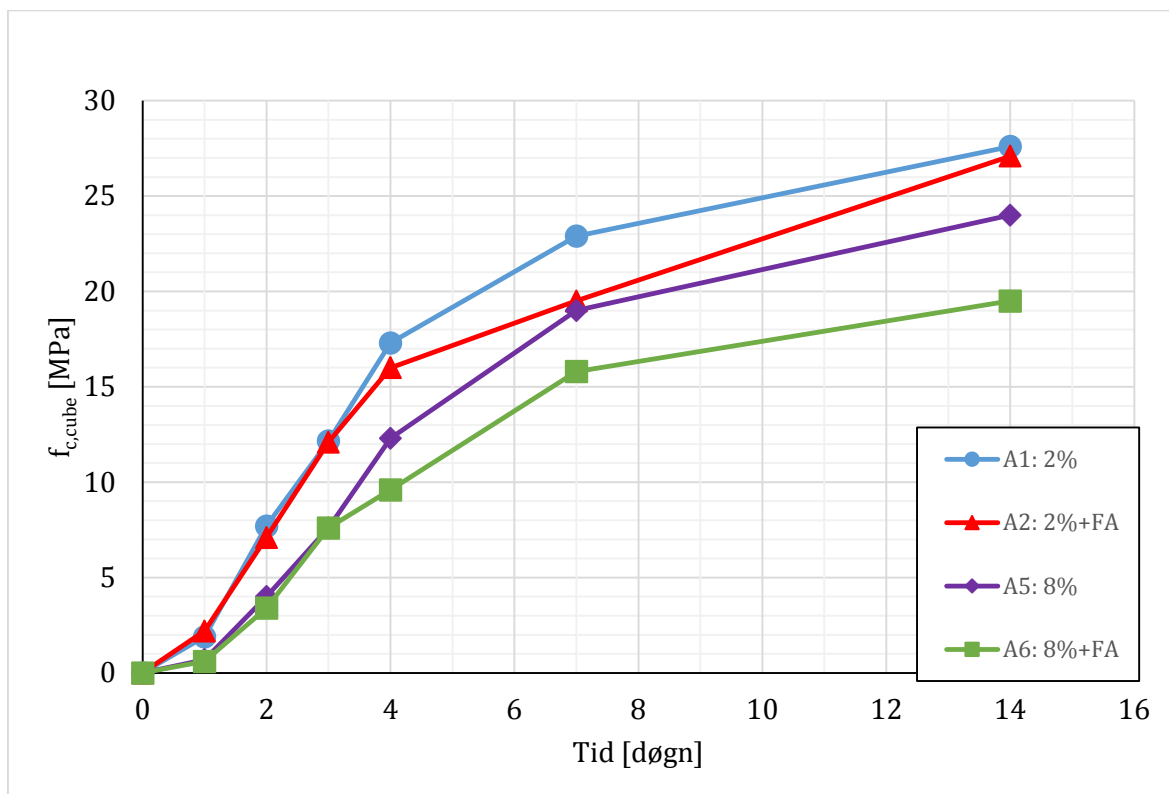
Figur 26
 Trykkfasthet etter 28 døgn i -10 °C for 8% NaNO₃ med og uten FA.

Kommentarer

For disse seriene ser man at flygeaske har en klar ugunstig effekt på trykkfastheten. Både tidligfasthet og 28-døgns sluttfasthet blir betydelig redusert med bruk av flygeaske. Dette kan være pga. den økte doseringen NaNO₃, lavere temperatur, eller en kombinasjon av disse to faktorene. Der ser ikke ut til at vannet har fryst, men at produksjonen av bindemiddel har blitt betydelig forstyrret av flygeasken i kombinasjon med NaNO₃ og lav temperatur.

Resept B1 uten flygeaske gir derimot en akseptabel fasthetsutvikling, og får kun en reduksjon av 28-døgns sluttfasthet på ca. 10 prosent i forhold til resept A3 ved -5 °C. En tidligfasthet på 5 MPa blir nådd etter ca. 3 døgn uten flygeaske.

3.5.3 Prøveserie 3: 14 døgn -5 °C



Figur 27
 Trykkfasthet etter 14 døgn i -5 °C for 2% og 8% NaNO₃, med og uten FA.

Kommentarer

Reseptene A1, A2, A4, og A5 ble trykket etter 14 døgn istedenfor 28 døgn, de vises derfor på egen figur.

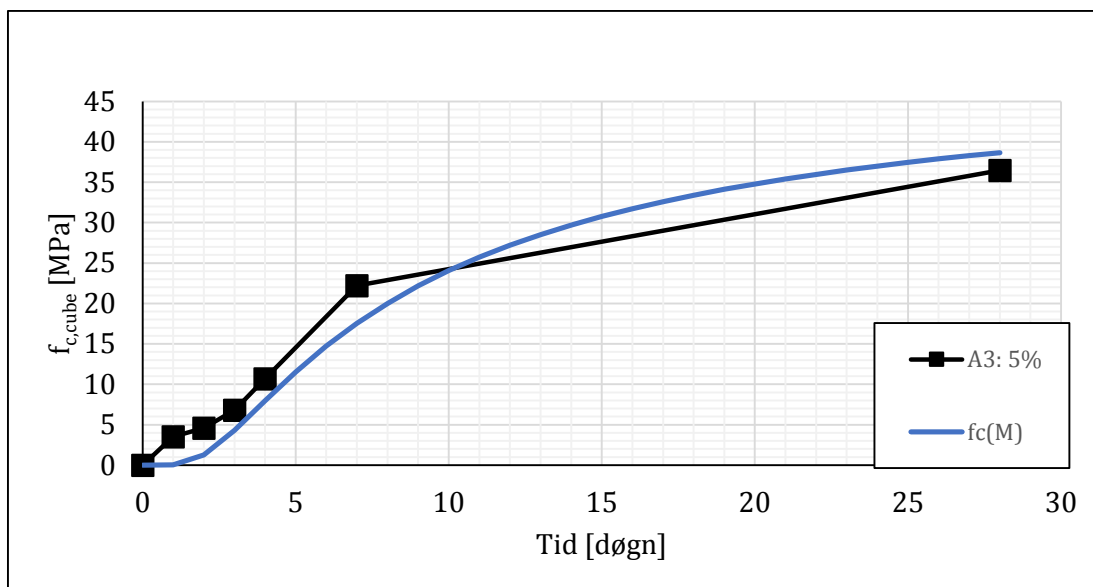
Figur 27 viser at økt dosering av NaNO₃ gir en klar reduksjon av fasthetsutviklingen. Det kan her anses at sluttfastheten kommer til å bli redusert ved økt dosering av NaNO₃. 5 MPa oppnås etter ca. 1-3 døgn for alle reseptene.

Selv men en lav dosering på 2% NaNO₃, så hindres vannet i å fryse ved -5 °C.

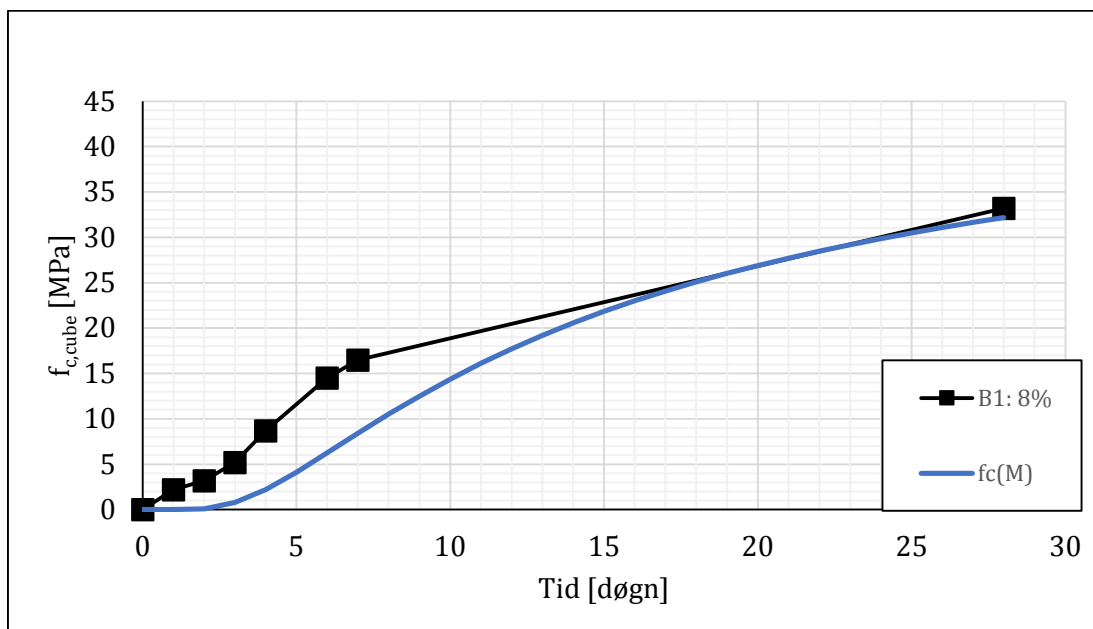
Fasthetsutviklingen ser ikke ut til å reduseres betraktelig fra 2% til 5% NaNO₃ dosering. Man må opp i 8% NaNO₃ for å se en klar ugunstig effekt på trykkfastheten, og da spesielt i kombinasjon med flygeaske.

3.6 SIMULERING AV FASTHET

Det er mulig å simulere betongens fasthet med Formel (15). Siden parameterne for fugebetongen er ukjent, har referanseverdiene for Aalborg Rapid blitt benyttet ($Q_{\infty} = 357$ W/kg, $\tau_e = 16$ timer, $\alpha = 1,03$). Dette gjør resultatene mer upresise enn om parametere basert på forsøksdata hadde blitt benyttet. Men resultatene kan muligens fungere som en indikasjon på fastheten.

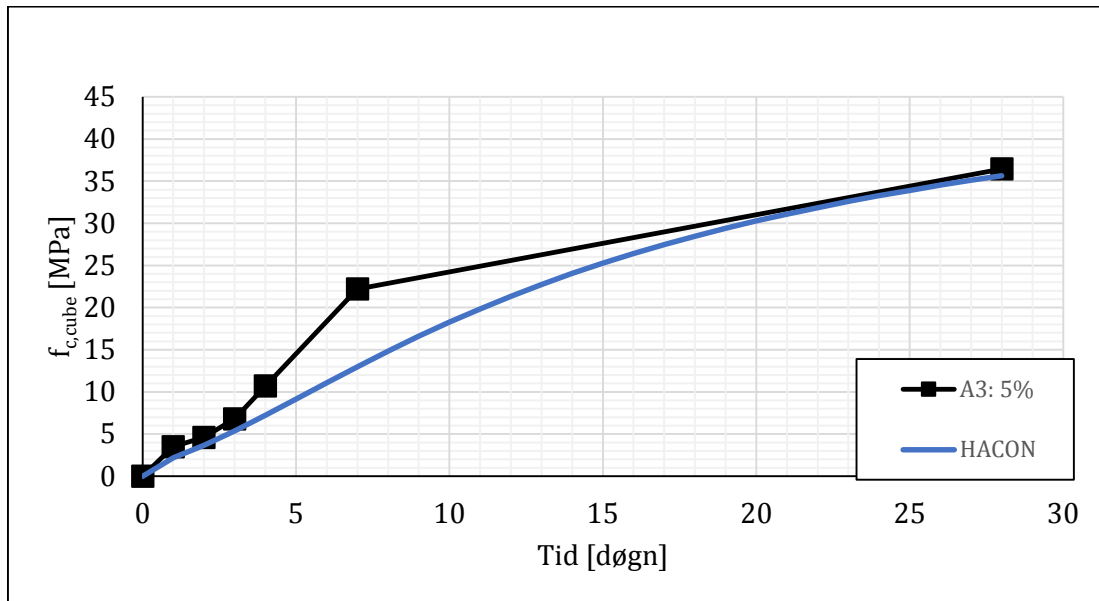


Figur 28
 Beregnet trykkfasthet $f_c(M)$ ved konstant -5 °C, sammenlignet med målt verdi for 5% NaNO_3 .



Figur 29
 Beregnet trykkfasthet $f_c(M)$ ved konstant -10 °C, sammenlignet med målt verdi for 8% NaNO_3 .

I Hett 97 blir ikke fastheten simulert for lave temperaturer. Tilsvarende skjer i HACON når temperaturen blir nærmer seg $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, men i HACON var det mulig å simulere fasthetsutviklingen ved $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figur 30
 Simulert trykkfasthet i HACON for $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, sammenlignet med målt verdi for 5% NaNO_3 .

Kommentar

Beregnet fasthet er her regnet med en konstant temperatur. I virkeligheten vil terningen kunne generere litt varme til å holde seg noen grader over lufttemperaturen, spesielt de første dagene. Dette kan være årsaken til at målt trykkfasthet i starten er mye høyere enn den simulerte. Det blir her heller ikke tatt hensyn til effekten av pozzolaner eller akselererende/retarderende effekt fra tilsetningsstoffer, noe som gjør resultatene unøyaktige.

3.7 DISKUSJON

Tidligere utførte prøver [25] har vist at flygeaske har en klar negativ effekt på fastheten i kombinasjon med NaNO_3 . Figur 26 viser at fastheten ved $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ blir dramatisk redusert ved bruk av flygeaske, etter 7 døgn er fastheten redusert med over 70 prosent i forhold til resepten uten flygeaske. Grunnen til dette kan være at (1) store doser av NaNO_3 forstyrrer pozzolanreaksjonen, (2) pozzolanreaksjonen stopper ved lave temperaturer, eller en kombinasjon av disse to. Figur 25 viser at det er en tendens til at doseringen av NaNO_3 vil forstyrre pozzolanreaksjonen i sementen med flygeasken, og at det derfor er (1) som bidrar mest til den observerte fasthetsreduksjonen.

5% NaNO_3 ved $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ var en større dosering en det som strengt tatt var nødvendig, da 2% dosering viste omtrent samme fasthetsutvikling ved samme temperatur. Men siden effekten av 5% dosering ikke hadde en klar negativ effekt, kan en overdoseringen benyttes som en temperaturbuffer mot frost i betongen.

Den uklare effekten av NaNO_3 kombinert med den lav temperatur gjør det vanskelig å forutsi betongens trykkfasthet med bruk av simuleringer. Det finnes ingen nøyaktige parametere for fugebetong med tilsatt NaNO_3 . Det er derfor ikke mulig å simulere fastheten med god nok nøyaktighet ved minusgrader når det benyttes NaNO_3 i betongen.

3.8 KONKLUSJONER AV LABORATORIEPRØVER.

Resept A3, og A4 gir dokumentert god tidlig- og slutfasthet ved -5 °C.

Resept B1 gir dokumentert god tidlig- og slutfasthet ved -10 °C.

Fasthet på 5 MPa ble oppnådd etter ca. 3 døgn for de nevnte reseptene.

Basert på anbefalte doseringer fra tilsetningsstoffleverandørene, vil doseringen av NaNO₃ tilsvare ca. 5 °C temperaturbuffer mot frost for de nevnte reseptene.

Serie B2 ga dårlig fasthetsutvikling pga. tilsatt flygeaske. Flygeaske må derfor ikke benyttes ved dosering av 8% NaNO₃ eller høyere. Det ble derimot ikke observert noen ugunstige effekter med flygeaske ved 5% NaNO₃. Følgende resepter har dermed fått dokumentert sin fasthetsutvikling ved gitt temperatur T:

Tabell 12
Dokumenterte resepter.

Resept	NaNO₃ [%]	FA [%]	T [°C]
A3	5%	0%	-5
A4	5%	20%	-5
B1	8%	0%	-10

4 TEMPERATURLOGGING PÅ BYGGEPLASS

4.1 INNLEDNING

Temperaturloggingen ble utført i januar-februar måned på en byggeplass i Hasle, Oslo. Lufttemperaturen varierte mellom 0 og -10 °C i denne perioden. Bygget var et planlagt 8. etasjers kontorbygg med betongfylte stålsøyler, bjelker av stål, og etasjeskillere av prefabrikkerte hulldekker. Hulldekkene vil i hovedsak være av typen HD265, men typene HD320 og HD500 ble også benyttet. Avstivningen av bygget utføres med hulldekker, stålkryss, og stabiliserende sjakter av prefabrikkert betong.



Figur 31
Montasjeplass i Hasle, Oslo.

Hensikten med temperaturmålingene er å dokumentere fugebetongens temperatur. Og at denne ikke går under verdien som er fastsatt for den valgte resepten.

Det er ønskelig å finne hvor raskt fugebetongen kan synke i temperatur på følgende steder: Skjærfuge, midten av knutepunkt, og randen av knutepunkt.

Knutepunkt er kritisk for byggets stabilitet, så det er ønskelig å kartlegge hvilken effekt et større støpevolum lam ha på temperaturen i fugebetongen. Blant annet om det er en mulighet for at fugebetongen kan generere nok varme til å holde seg over 0 °C.

Siden det er antatt at hulldekket har mye å si for fugens temperatur, er det ønskelig å kartlegge sammenhengen mellom temperaturen i hulldekket og luften. Dvs. hvor stor er forsinkelsen mellom de to temperaturene. Det er også ønskelig å se om det er hensiktsmessig å benytte isolasjonsmatter på fugene, uten ekstra oppvarming.

4.2 UTSTYR



Figur 32
Testo 176-T4 temperaturlogger
med 4 stk. kanaler.

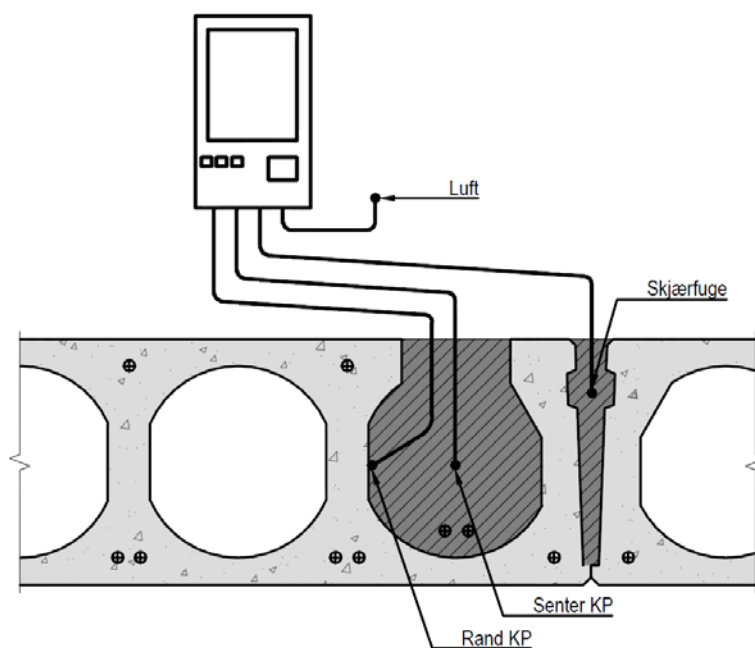
Under målingene ble det benyttet to loggeinstrumenter med fire termoelementer per instrument: Testo 176-T4 (Figur 32) og 177-T4. Temperaturloggerne var programmert til å lese av termoelementene en gang i timen, og instrumentene ble plassert utendørs ca. 1 uke av gangen. De eksterne termoelementene var av typen T (Cu-CuNi) med et måleområde ned til -200 °C.

Driftstemperaturene for selve måleapparatene var -20 °C og 0 °C for henholdsvis 176-T4 og 177-T4. Medfølgende programvare ble brukt til å eksportere loggdataene til regneark for videre behandling. Målingene ble utført i skjærfuger og fugekanaler til hulldekker av typen HD320. Fugebetongen ble levert med betongbil og pumpet opp til hulldekkene. Temperaturen på fugebetongen skulle være 20 °C ved levering.

4.3 MÅLEPUNKTER

4.3.1 Måling 1: Skjærfuge og knutepunkt i HD kanal

- To følere ble festet i kanalbøylene før fugebetongen ble pumpet inn.
- En føler ble plassert i skjærfugen etter pumping.
- En føler ble plassert i fri luft.



Figur 33
Måling 1: Målepunkter i skjærfuge, knutepunkt, og luft.



Figur 35
Plassering av termoelementene på bøylene i HD kanal.



Figur 34
Pumping av fugebetong inn i HD kanal.

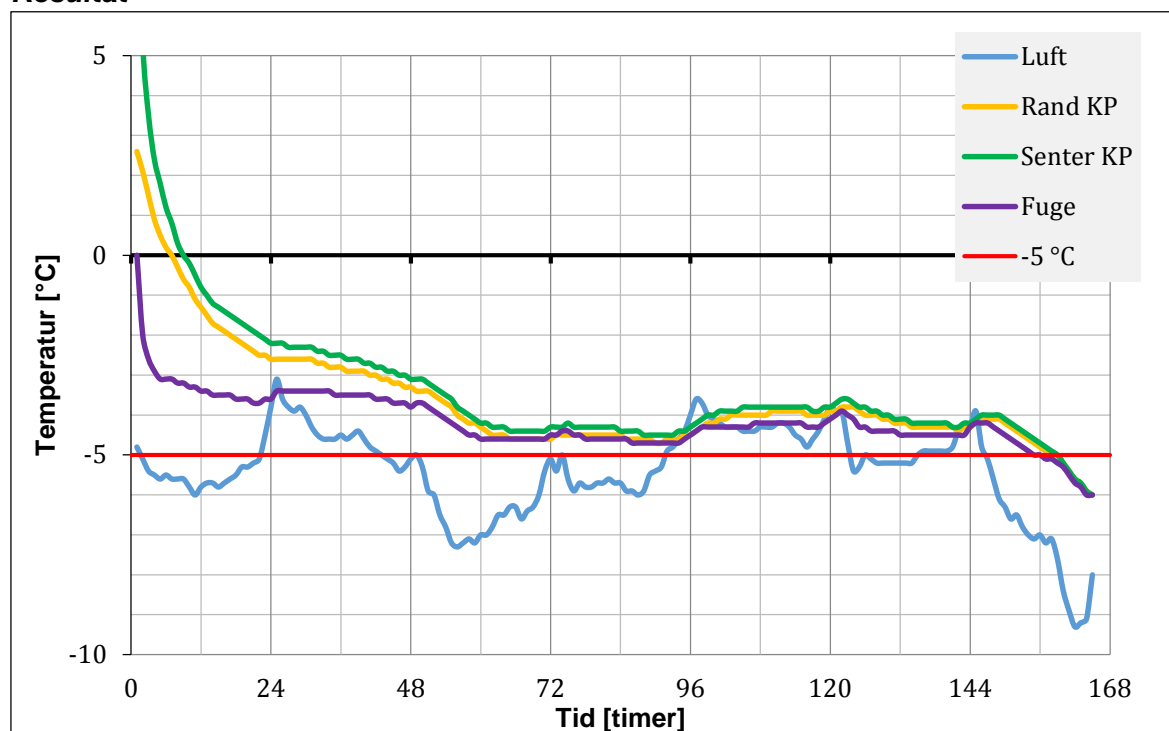
Hensikt

- Kartlegge hvor raskt temperaturen faller i skjærfuge og knutepunkt (utstøpt kanal).
- Kartlegge sammenhengen mellom temperaturen i fugebetongen og luften.
- Finne ut om knutepunkt har mulighet til å generere nok varme til å holde seg i plussgrader.

- Dokumentere at temperaturen i betongen ikke går under verdien fastsatt i resepten.

Det ble benyttet fugebetong med 5% NaNO₃ og 20% FA, som tilsvarer resept A4 (se Figur 25 i kapittel 3.5.1). Det må derfor dokumenteres at betongen ikke går under - 5 °C, det er kritisk å holde seg over denne temperaturen fram til en fasthet på 5 MPa er nådd.

Resultat

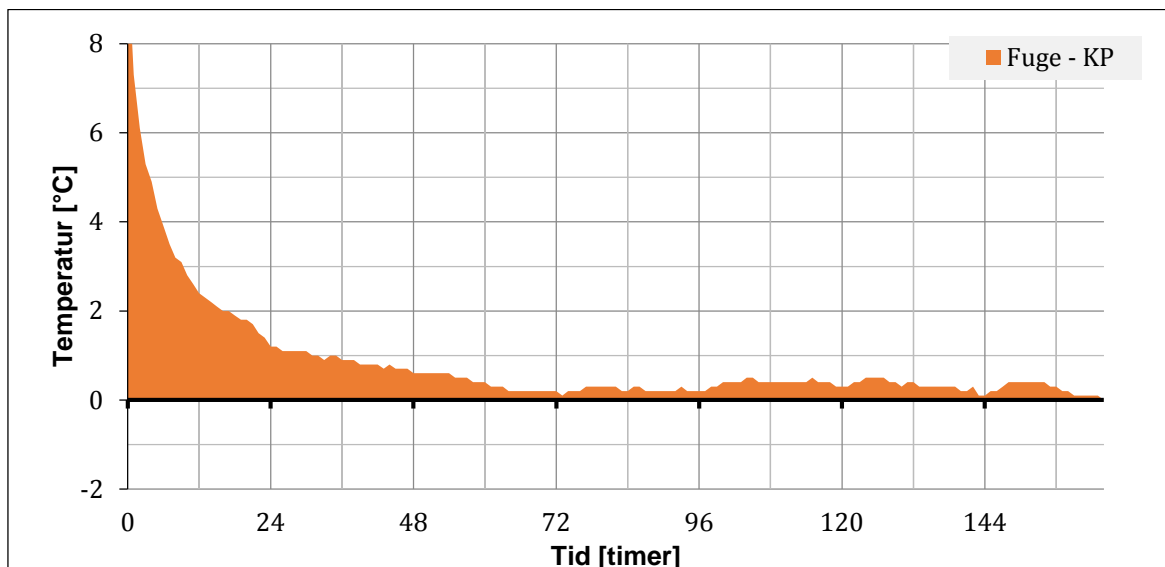


Figur 36
 Måling 1: Skjærfuge og knutepunkt i HD kanal.

Kommentarer

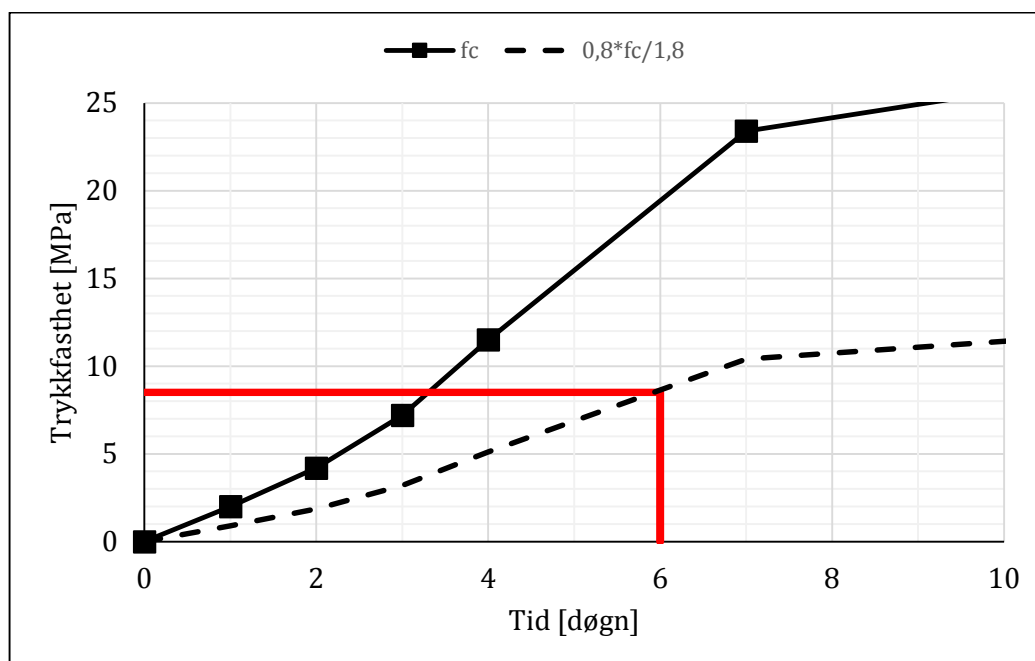
Målingen viser at skjærfugen går i minusgrader på under en time. Knutepunktet brukte lengere tid pga. større støpevolum, randen i KP når 0 °C etter ca. 6 timer og senter i KP når 0 °C etter ca. 9 timer. Etter 3 døgn har temperaturen på alle punktene i fugebetongen konvergere (se Figur 37). Fra Figur 36 ser man at det er en temperaturforsinkelse på ca. 20 timer mellom luft og fuger. Men dette vil også være avhengig av andre faktorer som hulldekkets dimensjoner, vindhastighet på byggeplass, og snø på hulldekkene.

Det ser dermed ut til at varmetapet fra fugebetongen til omgivelsene er for store til at det kan genereres nok egenvarme til å holde seg over 0 °C.



Figur 37
 Temperaturforskjell mellom fuge og knutepunkt.

Fugetemperaturen holder seg 1-2 °C over lufttemperaturen under stabile temperaturforhold. Etter seks og et halvt døgn går lufttemperaturen ned til -6 °C og deretter -9 °C, noe som gjør at fugetemperaturen endelig går under -5 °C. Men på dette tidspunktet har betongen utviklet nok fasthet iht. Figur 38, og vil ha en trykkfasthet på over 5 MPa.



Figur 38
 Fasthetsutviklingen for resept A4 de 10 første dagene ved -5 °C.

Fra Figur 38 som er basert på fasthetskurven i Figur 25, kan man se at terningtrykkfastheten for fugebetongen ligger på rundt 19 MPa etter 6 døgn. Omgjort til sylindertykkfasthet og med en partialfaktor på 1,8 vil dette fortsatt være over 5 MPa.

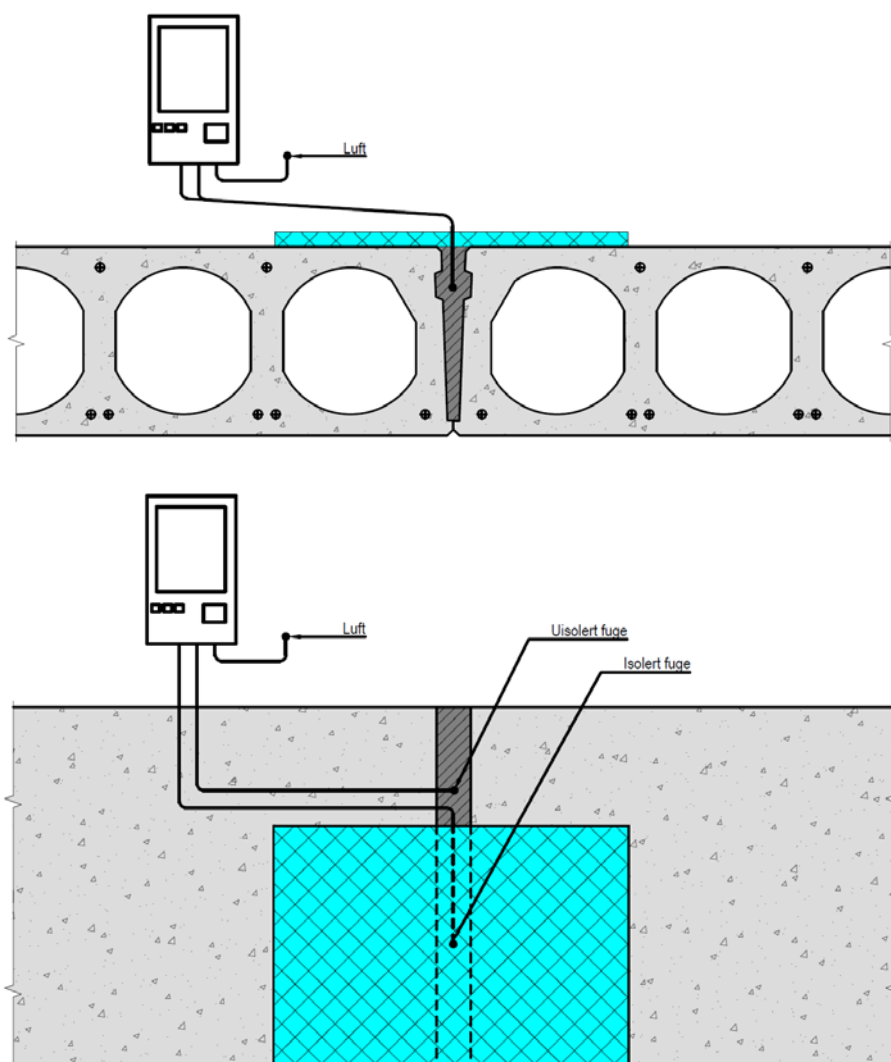
4.3.2 Måling 2: Isolert og uisolert skjærfuge

- En føler ble plassert i uisolert fuge.
- En føler ble plassert i isolert fuge.
- En føler ble plassert i fri luft.



Uisolert fuge Isolert fuge

Figur 39
Plassering av isolasjonsmatte.



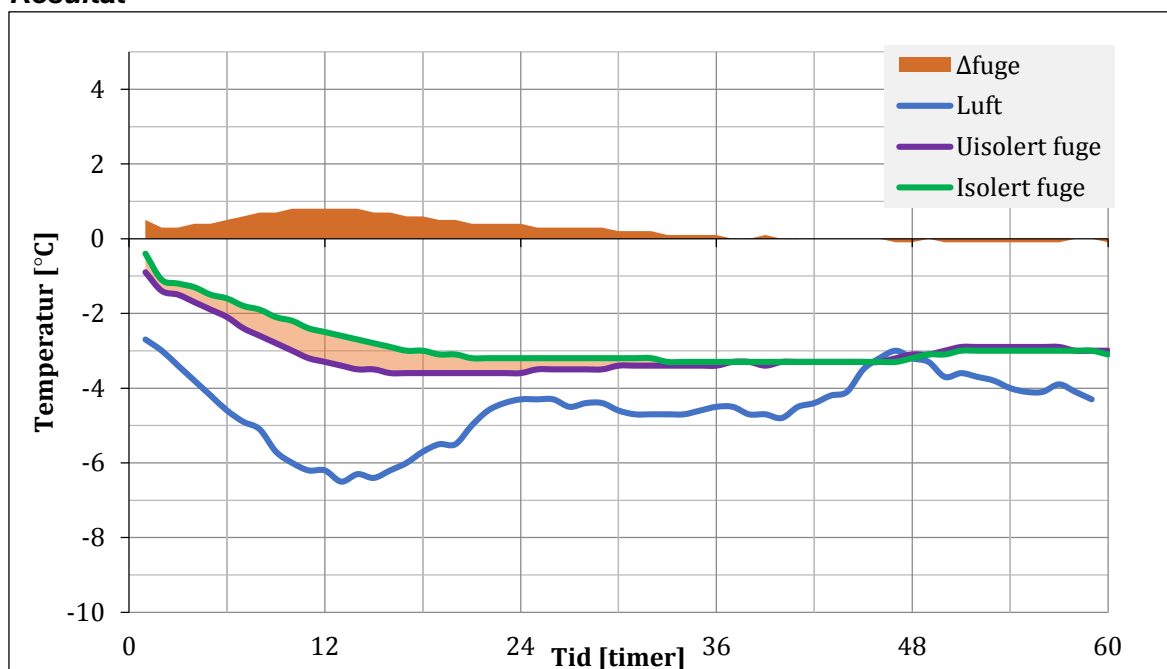
Figur 40
Måling 2: Målepunkter for isolert og uisolert fuge.

4.3.2.1 Hensikt

- Finne ut om isolasjonsmatte kan ha en gunstig effekt på skjærfugen uten ekstra oppvarming.

Fra en annen temperaturmåling [30] ble fugene dekket til og varmet opp i en kort periode. Det ble observert at det kanskje kunne ha en gunstig effekt å dekke til fugene selv om hulldekkene ikke ble oppvarmet. Men siden denne målingen ble utført på oppvarmede hulldekker var det mye usikkerhet rundt dette, så det ble her utført en måling på tildekket skjærfuge uten noen form for oppvarming.

Resultat



Figur 41
 Måling 2: Isolert og uisolert skjærfuge.

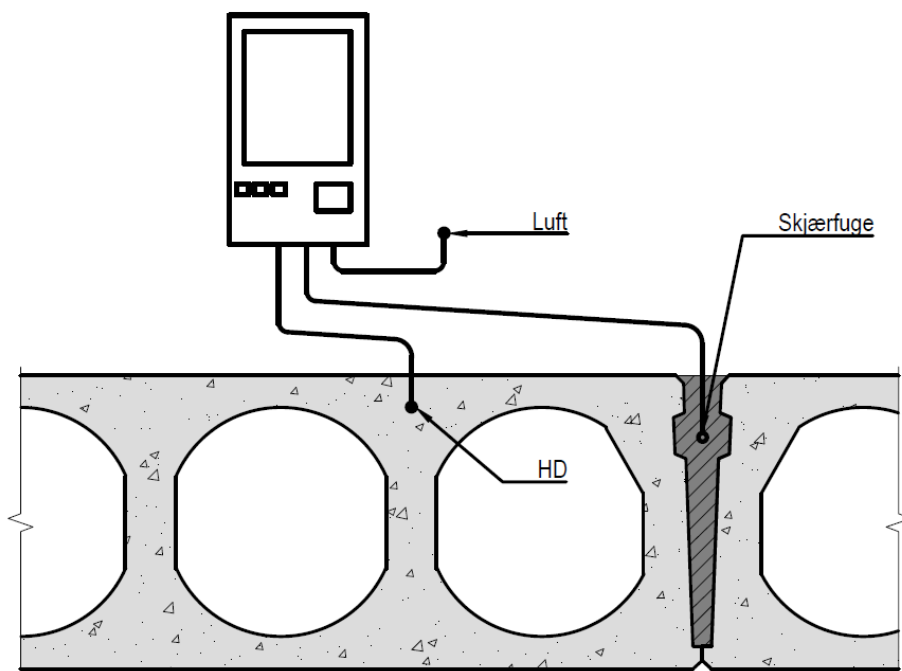
Kommentarer

I denne målingen er det forskjellen mellom den isolerte og uisolerte målepunktet i skjærfugene som er interessant. Δ fuge er da definert som isolert fuge minus uisolert fuge.

Etter 12 timer kommer Δ fuge opp i ca. 0,8 °C forskjell, men allerede fra første sekund er det en forskjell på 0,5 °C. Denne forskjellen kommer av unøyaktigheter ved plassering av termoelementene. Plasseres termoelementene i forskjellige høyder, eller for nær randen, vil temperaturene bli forskjellige. Og etter ca. ett og et halvt døgn har temperaturforskjellene blitt helt utjevnet. Det ser derfor ikke ut som at isolasjonsmatten hadde noen gunstig effekt.

4.3.3 Måling 3: Hulldekke og skjærfuge.

- En føler ble plassert 30 mm ned i hulldekket, borehullet ble så tettet med fugebetong.
- En føler ble plassert i skjærfuge.
- En føler ble plassert i fri luft.



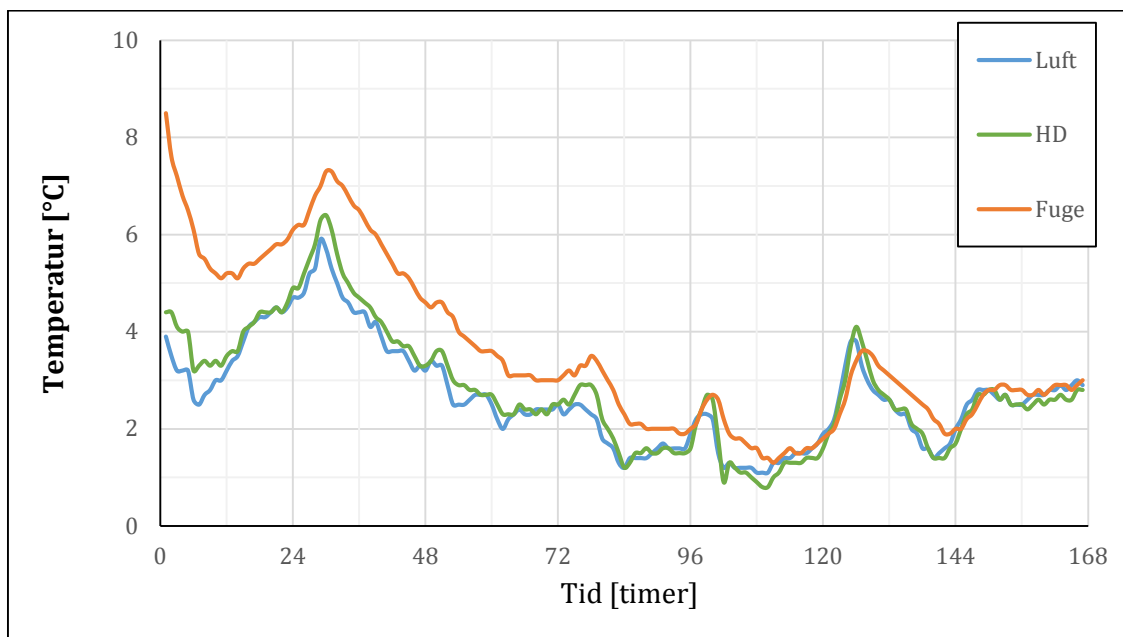
Figur 42
Måling 3: Målepunkter for hulldekke og skjærfuge.

Hensikt

- Finne sammenhengen mellom temperaturen i hulldekket og skjærfugen.

Fra Måling 1 ble det etablert at fugene etter noen dager vil følge lufttemperaturen med en viss forsinkelse. Denne forsinkelsen kommer mest sannsynligvis fra hulldekkets varmekapasitet, og det er derfor ønsket å finne forholdet mellom temperaturen i hulldekket og fugebetongen.

Resultat



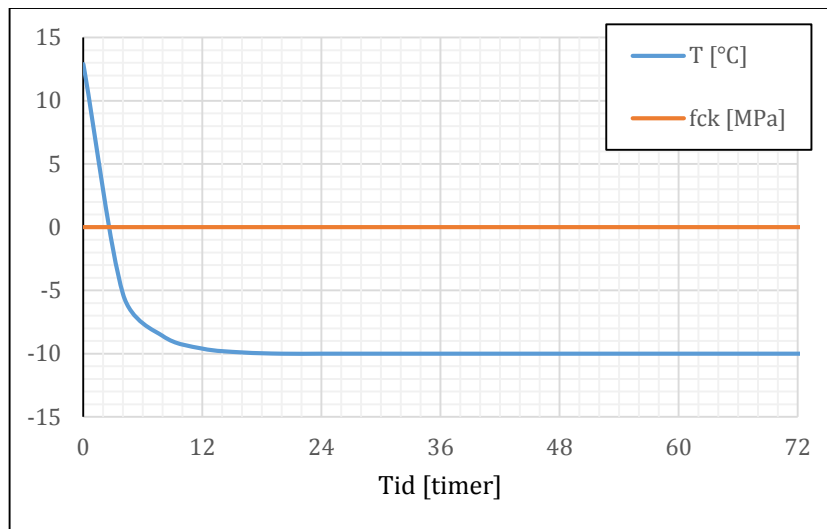
Figur 43
 Måling 3: Hulldekke og skjærfuge

Kommentarer

Det var forventet at temperaturen i hulldekket skulle ligge et sted mellom temperaturen i skjærfugen og luften. Temperaturen i hulldekket lå derimot så vidt over lufttemperaturen uten noen vesentlig forsinkelse. Fugen bruker her en lengere tid på å konvergere mot lufttemperaturen. Dette er mest sannsynligvis pga. at lufttemperaturen var relativt høy under denne målingen. Fugen klarte derfor å produsere mer varme over en lengere periode i forhold til tidligere målinger.

4.4 SIMULERING AV FUGETEMPERATUR

I Hett 97 ble det valgt en skallmur med støpetykkelse 30 mm til å representere en fuge mellom to hulldekker. Siden Hett 97 er et endimensjonalt simuleringsprogram, så er det mest anvendelig for konstruksjoner med lange støpeavstander i to retninger (da disse retningene vil få en stor varmemotstand at man kan se bort fra dem). I denne simuleringen blir derfor fugen "uendelig høy" noe som ikke er tilfellet i virkeligheten. Men siden det er varmestrømmen ut mot hulldekkene som dominerer kan denne typen simulering antas å være ok under vinterforhold. Det er ingen mulighet til å automatisk legge inn lufttemperaturer basert på loggdata, så det ble valgt en konstant lufttemperatur på -10 °C. Figur 44 viser at skjærfugen synker raskt i temperatur under simuleringen, og det tar ca. 2 timer før fugen går i minusgrader.

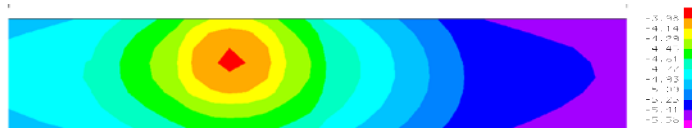


Figur 44
 Simulering av temperatur og fasthet i skjærfuge med Hett 97.

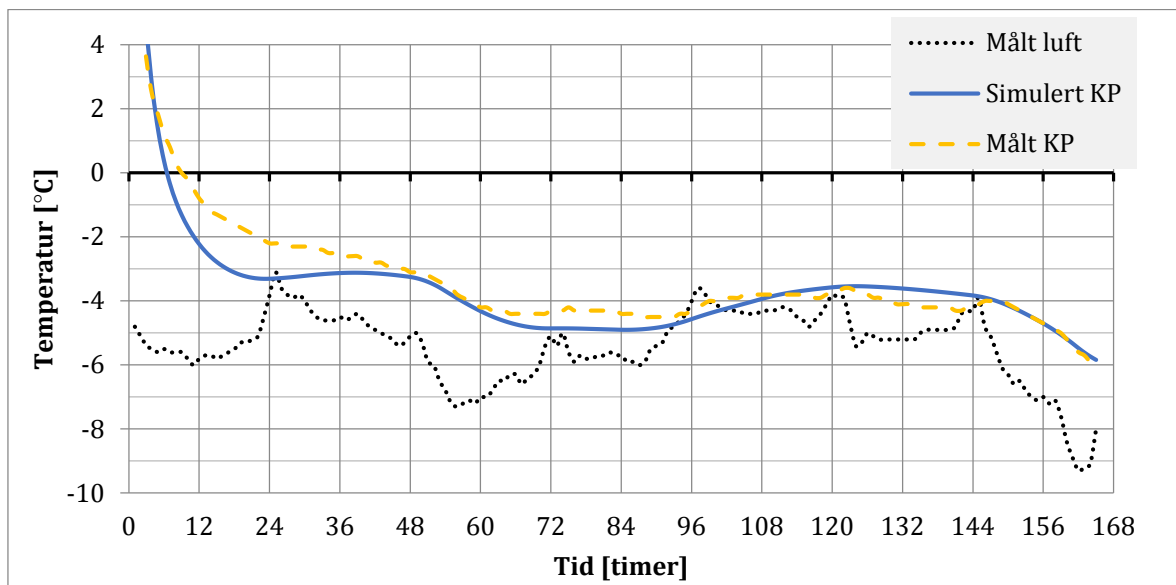
En fugekanal vil ha en større varmestrøm i to dimensjoner, så for kanalen må det benyttes en FE (finite element)-analyse. HACON er et simuleringsprogram som kan modellere i to dimensjoner, men det kreves da betydelig mye mer input fra bruker.



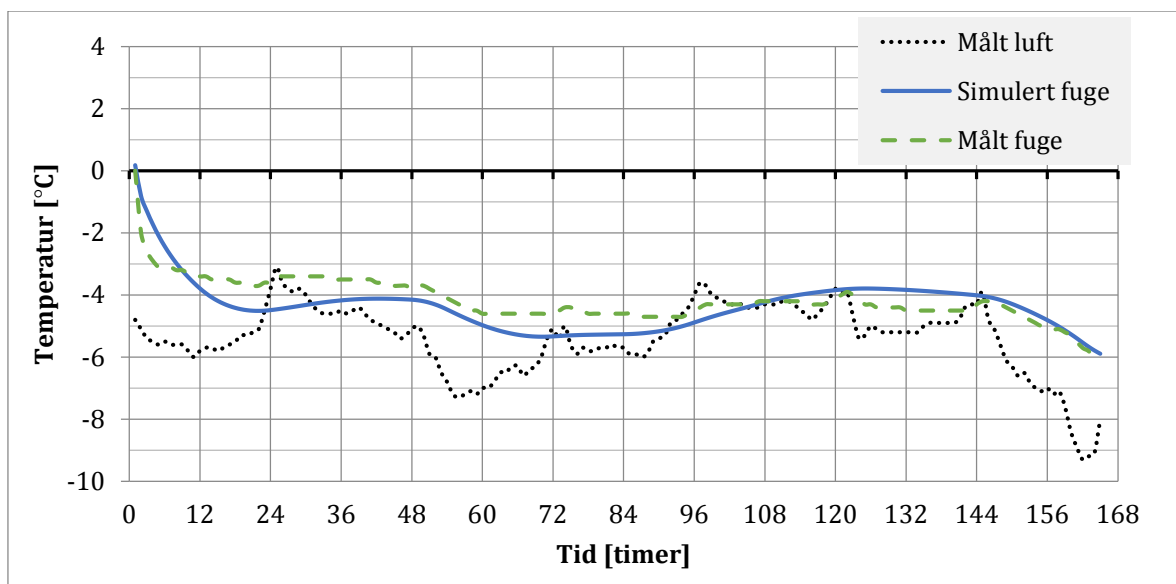
Figur 45
 Enkel modell av støpt skjærfuge og kanal i HACON.



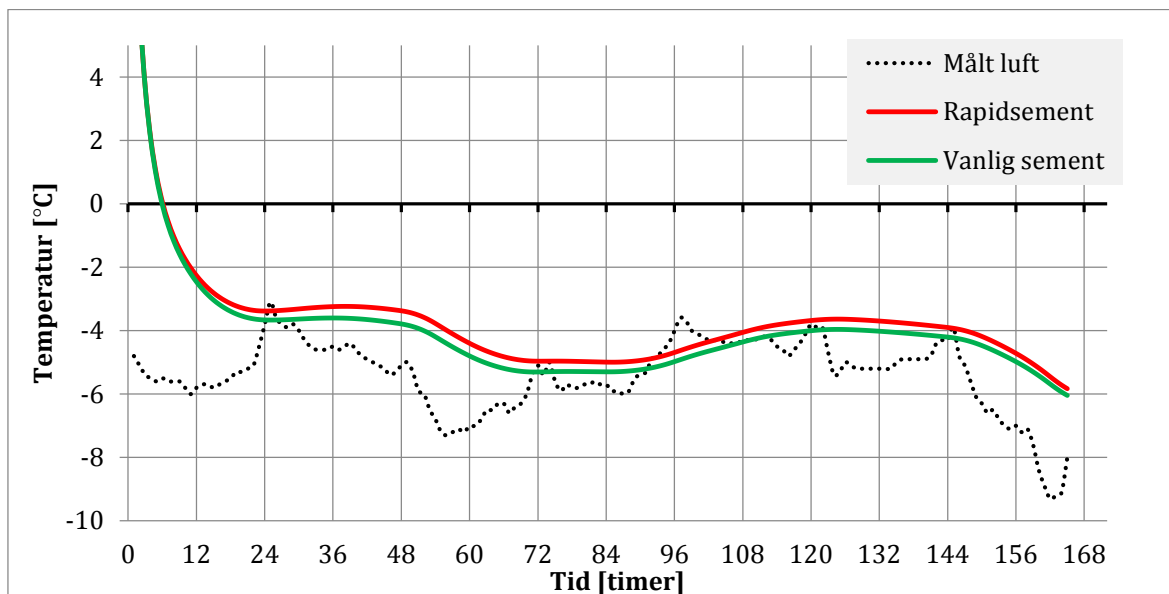
Figur 46
 Temperaturen i fugebetongen finnes med en FE-analyse i HACON.



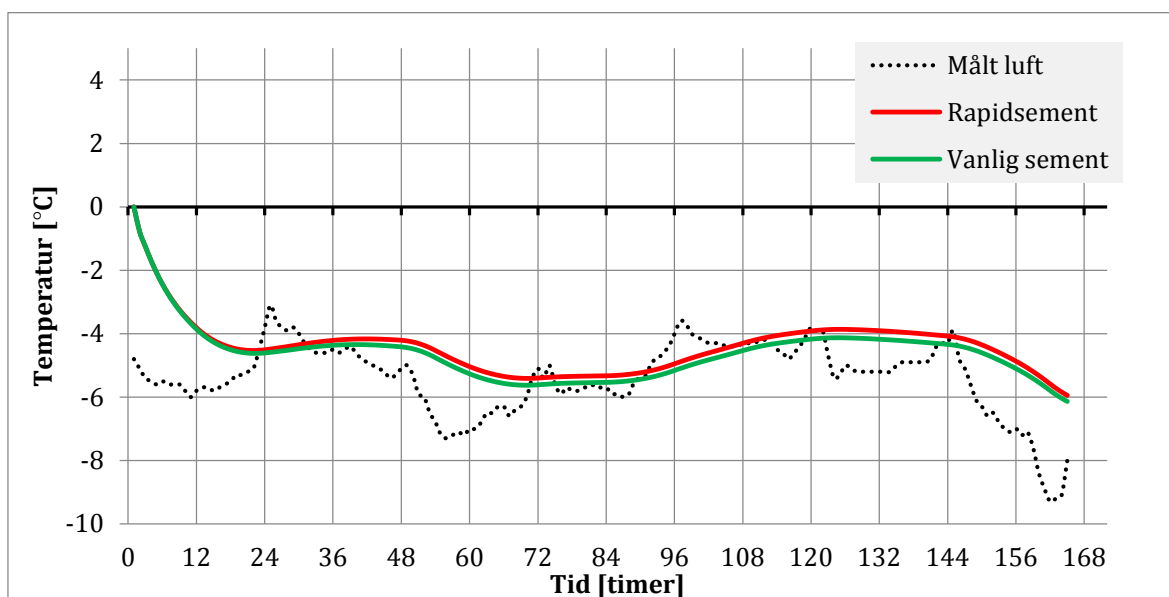
Figur 47
Simulert temperatur for fuget kanal (KP) i HACON, sammenlignet med målt verdi.



Figur 48
Simulert temperatur for skjærfuge i HACON, sammenlignet med målt verdi.



Figur 49
Simulert temperatur i fuget kanal med vanlig portlandsement og rapidsement.



Figur 50
Simulert temperatur i skjærfuge med vanlig portlandsement og rapidsement.

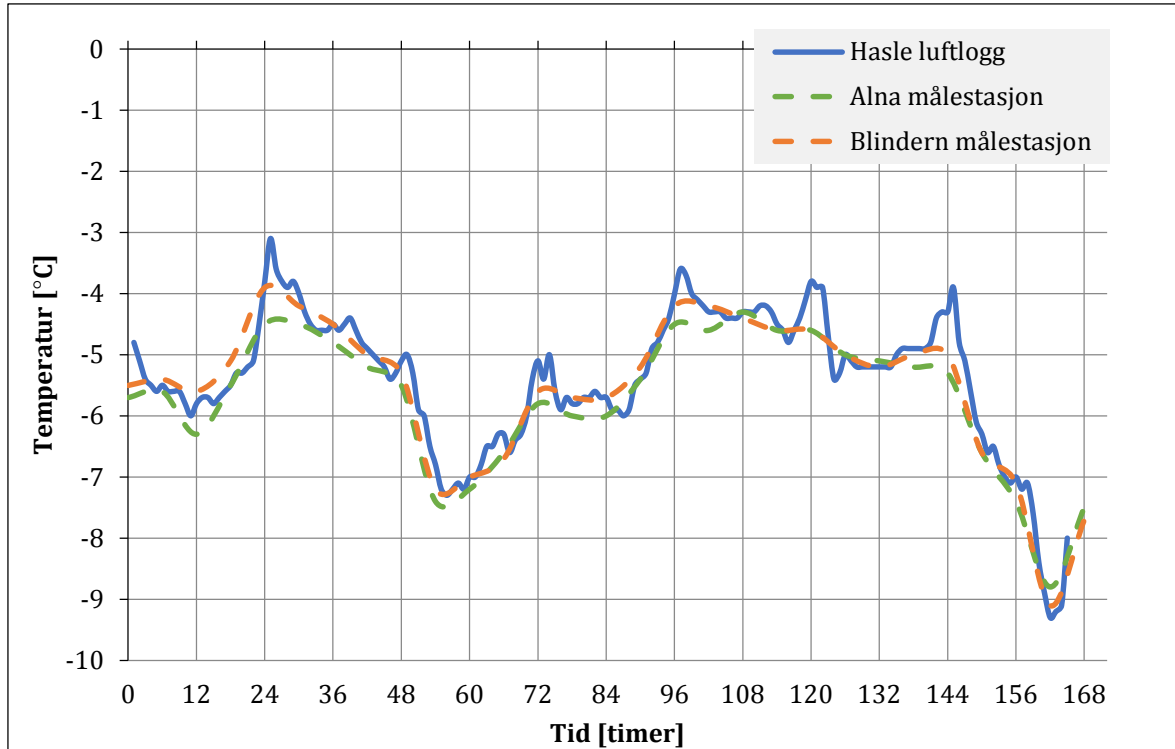
Kommentarer

I HACON var det mulig å legge inn lufttemperaturen fra loggen, noe som gjør at modellen kan sammenlignes med målte verdier (denne muligheten hadde ikke Hett 97). I HACON lå det også inne begrensninger som gjorde at geometrien måtte bli svært forenklet.

Figur 47 og Figur 48 viser at simulerte og målte temperaturer stemmer med de målte verdiene med ± 2 °C. Figur 49 og Figur 50 viser at rapidsement ikke klarer å øke temperaturen i fugebetongen med en betydelig verdi.

4.5 DISKUSJON

Byggeplassen på Hasle lå i nærheten av to værstasjoner. Alna målestasjon lå ca. 3 km øst, og Blindern målestasjon lå ca. 5 km vest. Ved å benytte disse måledataene (fritt tilgjengelig på eklima.met.no) kan man plote sammenhengen mellom værdata fra målestasjon og målingene gjort på byggeplass.



Figur 51
 Værdata fra målestasjoner og lufttemperatur målt på byggeplass.

Figur 51 viser her at begge målestasjonene treffer ganske likt med lufttemperaturen på byggeplass. Dette gir da en mulighet for å kunne dokumentere lufttemperaturen ved bruk av fritt tilgjengelig værdata fra Meteorologisk institutt. Men det er da viktig at det først etableres en klar sammenheng mellom byggeplassens lufttemperatur og en målestasjon i nærheten (slik som i Figur 51). Fra Måling 1 ble det etablert at fugene ikke går under lufttemperaturen dersom lufttemperaturen holder seg stabil. Fra værdataene kan man da dokumentert fugenes minste temperatur. Men man må også ta hensyn til lufttemperaturen fram til 20 timer før støpet starter. Dette er fordi hulldekkene fortsatt kan være nedkjølte dersom lufttemperaturen plutselig skulle stige.

Det ble foreslått å benytte en partialfaktor på fasthetskurven i Figur 38. Dette er ment som en analogi til materialfaktorene som benyttes til karakteristiske materialfastheter. Men fasthetskurven er ikke en karakteristisk fasthet, og kan i prinsippet kun benyttes som en orienterende verdi. Man kan muligens kompensere for dette ved å øke sikkerhetsfaktoren ytterligere. Det ble anbefalt en partialfaktor på 1,8 som tilsvarer materialfaktor som vanligvis benyttes under montasjearbeider.

Det var mulig å simulere temperaturen i fugebetongen med en nøyaktighet på ± 2 °C ved bruk av FE-analyse. Unøyaktigheten kommer i hovedsak av forenklet geometri i modellen kombinert med upresise parametere for fugebetongen. FE-analysen krever mye input og kan

være tungvint å modellere. Det er også ingen grunn til å simulere fugetemperaturen dersom man ikke har mulighet til å beregne fastheten.

4.6 KONKLUSJON AV TEMPERATURLOGGING

Fugene faller svært fort i temperatur, og vil gå under 0 °C i løpet av få timer avhengig av støpevolum.

Temperaturene i skjærfugene ligger 1-2 °C over lufttemperaturen under stabile forhold. Det er derfor mulig å bruke lufttemperaturen som dokumentasjon til fugetemperatur.

Knutepunktene har en litt høyere temperatur de første 3 døgn. Etter 3 døgn vil alle målepunktene i fugebetongen konvergere. Det ble observert en temperaturforsinkelse på 20 timer mellom luft og fuger. Det må derfor tas hensyn til at hulldekkene fortsatt kan være nedkjølte selv om lufttemperaturen plutselig øker. Isolasjonsmatter har ingen effekt på skjærfugene uten at hulldekkene blir varmet opp. Simuleringene bekreftet også at bruk av rapidsement ikke vil gi en stor nok varmeproduksjon til å øke temperaturen med en betydelig verdi.

5 VEILEDNING TIL VINTERFUGING

5.1 PRODUKSJON

Betongresepten

M40 som hovedregel. Lavt masseforhold for å kompensere for reduksjon av fasthet ved bruk av frysepunktnedsettende tilsetningsstoffer og ved lave temperaturer. Dette gir også tette og bestandige fuger som ikke tilfører ekstra byggfukt.

Naturlig gradert sand med $D_{max} = 8$ mm som tilslag. Dette sikrer stor nok åpning i bunn av skjærfugen og mellom hulldekkene og eventuell armering.

Akseleratorer kan benyttes for en raskere tidligfasthet, men ikke for å øke temperaturen i fugene om vinteren.

Frysepunktnedsettende midler benyttes for å senke frysepunktet. Disse må doseres i relativt høye konsentrasjoner, og kan ha ugunstige effekter på fastheten i kombinasjon med andre tilsetningsstoffer og pozzolaner. Det må derfor lages faste resepter som trykkprøves og får sin fasthetsutvikling dokumentert.

Reseptene lagres i en bestemt temperatur under trykkingen, for eksempel:

-5 °C ved 5% NaNO_3

-10 °C ved 8% NaNO_3

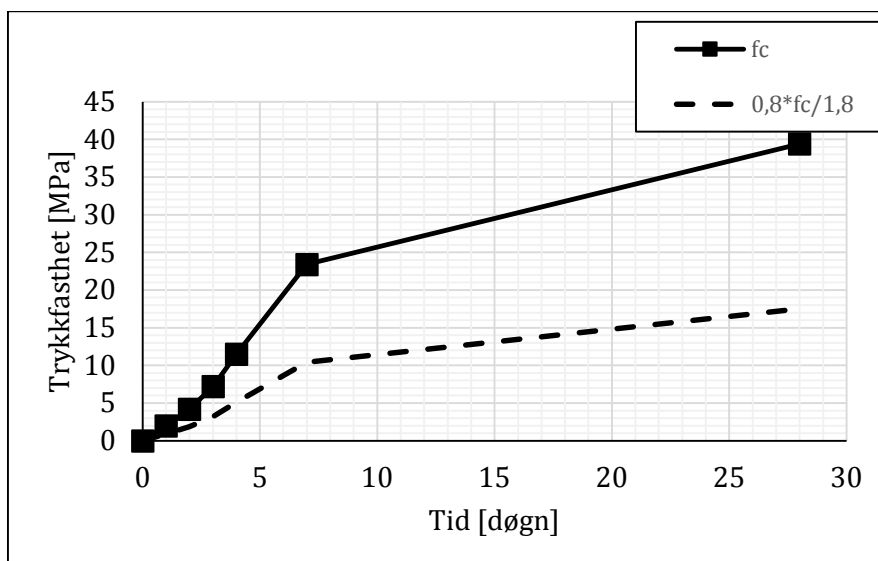
Dokumentasjon av fasthetsutvikling

Dokumentasjonen skal bestå av en fasthetskurve som er basert på den temperaturen som resepten er beregnet for.

Fasthetskurven skal bestå av minst 6 trykkprøver fra fryseskap tatt etter 1, 2, 3, 7, 28, og 28+28 døgn (28+28 = 28 døgn i fryseskap og 28 døgn i vannbad 20 °C).

Prøvelegemene skal ha identisk resept med levert fugebetong, ved endring av resepten må nye trykkprøver gjennomføres.

Fasthetskurven bør ha en kurve som viser sylindertykkfastheten med en gitt partialfaktor (vanlig brukt partialfaktor for montasjearbeider er 1,8).



Figur 52

Eksempel på fasthetskurve for 28 døgn ved -5 °C, inkl. fasthet med partialfaktor.

5.2 FUGESTØP

Nødvendig fasthet

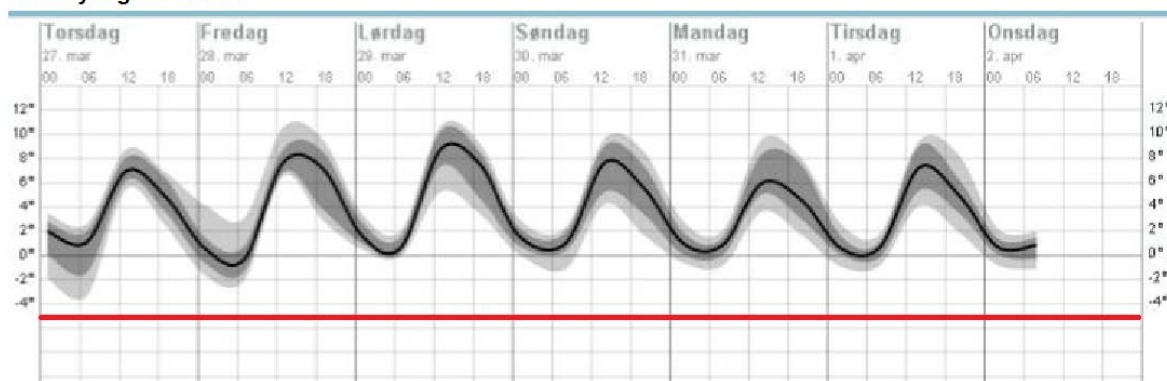
Nødvendig fasthet skal være gitt av konstruktør. Dette gjelder sluttfastheten og fasthet før videre montasje, fjerning av forskaling osv.

Fastheten kan gis som verdi, for eksempel "7 MPa før videre montasje", eller som en sluttfasthet, for eksempel "B35M40".

Valg av resept

Valg av resept kan gjøres etter værprognose. Det må da tas hensyn til den laveste temperaturen som kan forekomme gjennom hele døgnet og ikke døgngjennomsnittet. Sannsynlighetsvarsel er den beste måten å se hva den laveste temperaturen kan bli. Men for varslar langt fram i tid blir variasjonen på temperaturen større, så man bør alltid benytte den siste tilgjengelige temperaturprognosen.

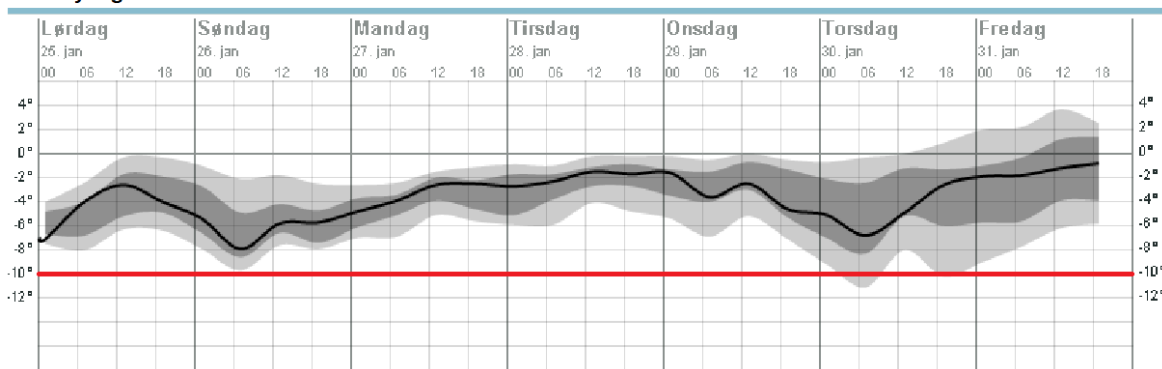
Sannsynlighetsvarsel



Figur 53

Sannsynlighetsvarsel for byggeplass hvor det bør velges en fugebetong som tåler -5°C .

Sannsynlighetsvarsel



Figur 54

Sannsynlighetsvarsel for byggeplass hvor det bør velges en fugebetong som tåler -10°C .

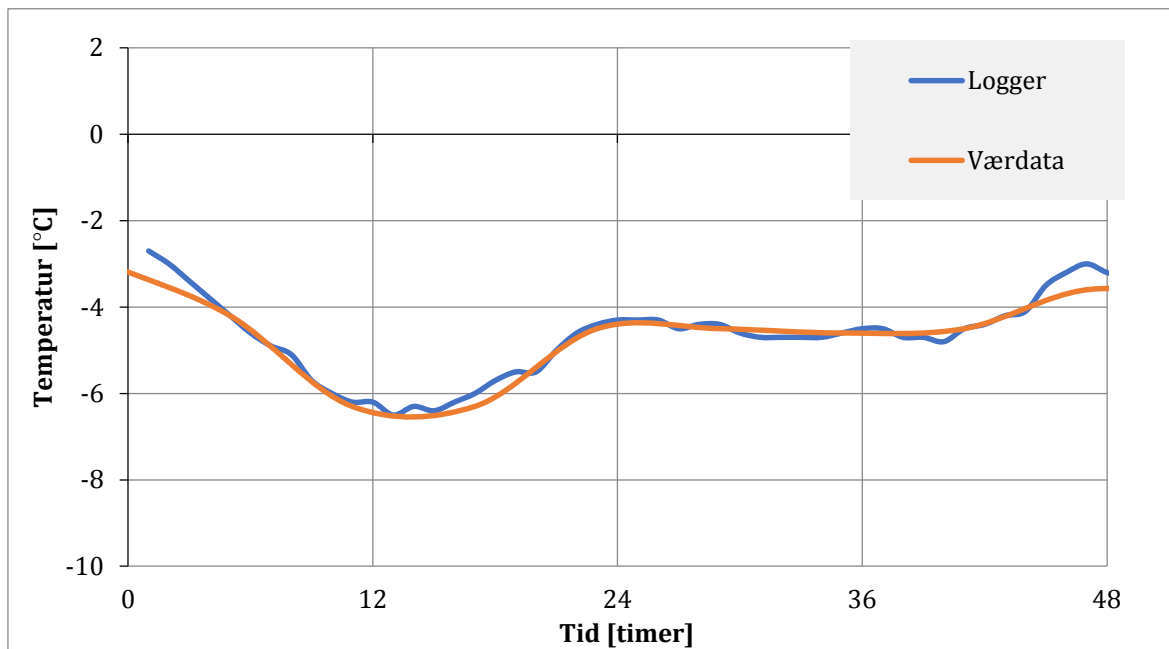
Fugene vil ligge ca. 2°C over lufttemperaturen i stabilt vær, dette bør da benyttes som en sikkerhetsmargin mot feil i værprognosen.

Temperaturforsinkelse i hulldekker

Når lufttemperaturen stiger raskt, kan hulldekkene fortsatt være nedkjølte. Siden det er hulldekkene som i hovedsak påvirker temperaturen i fugene, bør det påregnes 20 timers forsinkelse mellom temperaturen i luft og hulldekke.

Dokumentasjon av temperatur i fuger

Logging av lufttemperaturen kan benyttes som dokumentasjon til fugetemperaturen dersom den ikke har steget dramatisk de siste 20 timene. Til dette kan man benytte automatiske loggere eller en værstasjon i nærheten av byggeplassen (tilgjengelig på eklima.met.no). Ved bruk av værstasjon må man påse at temperaturen på målestasjonen stemmer med lufttemperaturen på byggeplassen.



Figur 55

En temperaturlogg fra byggeplass bekrefter her en god sammenheng med værdata.

6 DISKUSJON

Prøving i lab

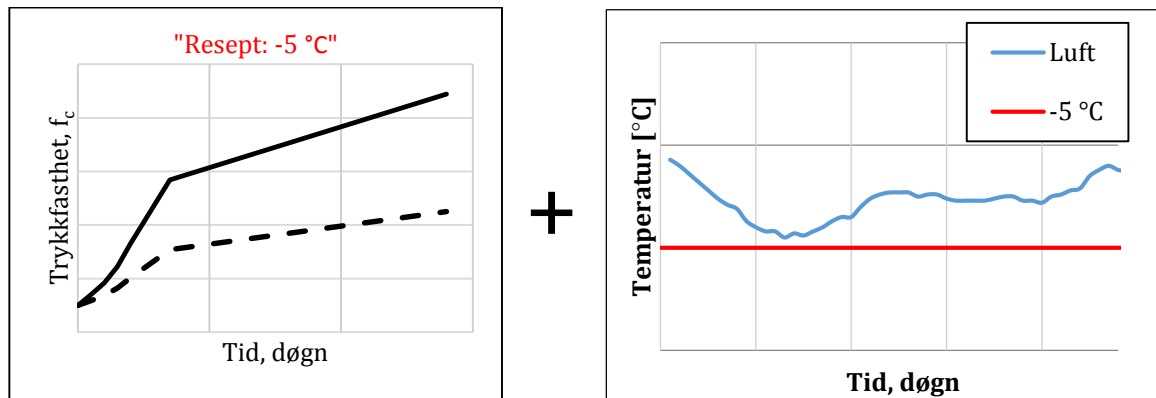
I reseptene ble det benyttet en høyere dosering av NaNO_3 enn de anbefalte verdiene fra tilsetningsstoffleverandøren. Dette resulterte i en litt langsommere fasthetsutvikling, men man oppnår da en større temperaturbuffer mot frost i fugebetongen. Basert på anbefalingene fra leverandørene av lignende tilsetningsstoffer, er denne temperaturbufferen estimert til over 5 °C. Temperaturen i fugen kan derfor gå under den reseptbaserte temperaturen uten at fugebetongen fryser til is. Fasthetsutviklingen kan vektes opp mot temperaturbufferen, men det er helt klart mest kritisk å hindre at fugebetongen fryser før den har nådd 5 MPa trykkfasthet.

Det ble ikke brukt akselererende tilsetningsstoffer i denne oppgaven. Det er mulig at man kan få en høyere 28-døgns fasthet med akselererende stoffer, men dette må testes med egne fasthetskurer. For det er en stor usikkerhet på hvordan akseleratorer vil reagere med de høye doseringene av NaNO_3 .

Temperaturlogging og fasthetskurer

Ved bruk av fasthetskurer fra prøving i laboratorium, kan man få en orienterende verdi på fugebetongens fasthetsutvikling. Dette krever at fugebetongens resept i fasthetskuren er identisk med resepten i fugestøpet. Videre krever det at fugebetongen ikke går under den temperaturen som fasthetskuren er basert på. Dette kan dokumenteres med å plassere termoelementer i fugebetongen under støping. Men temperaturlogging på montasjeplass kan være tungvint og er utsatt for mange feilkilder. Under loggingen i denne oppgaven ble instrumentene ofte flyttet på under montasjearbeidet, og loggingen ble derfor noen ganger avbrutt. Instrumentene og termoelementene var også sterkt utsatt for kondens, og temperaturloggene ble enkelte ganger korrupte. Logging av lufttemperatur på byggeplass vil derfor være å foretrekke, da dette er en mye enklere oppgave. Siden temperaturen i fugebetongen holder seg 1-2 °C over lufttemperaturen, kan lufttemperaturen benyttes som dokumentasjon på minste mulige temperatur i fuger. Det må også tas hensyn til at hulldekkene kan være nedkjølt fra før, og at det kan ta ca. 20 timer for at hulldekkene tar igjen lufttemperaturen. Denne tiden vil være avhengig av blant annet hulldekkets varmekapasitet, vindhastighet på byggeplassen, og eventuell snø på montasjeplassen.

Dersom fugens temperatur blir lavere enn det resepten er basert på, vil fasthetsutviklingen gå langsommere enn det fasthetskuren tilsier. Og i verste fall kan fugebetongen fryse til is før den har oppnådd en fasthet på 5 MPa. Valg av resept bør derfor gjøres ved bruk av værprognoser, hvor man baserer seg på den laveste temperaturen som kan forekomme på byggeplassen. Til dette bør det benyttes "sannsynlighetsvarsel" som viser en detaljert temperaturprognose time-for-time. Men selv med en høyere temperatur i fugen enn det resepten er basert på, vil det fortsatt være en viss usikkerhet rundt den faktiske fastheten i fugen. Siden fasthetskurene er basert på trykkprøver, bør kurven kun anses som orienterende. Dette kan kompenseres for ved å benytte en høy "partialfaktor" til fasthetskuren. Fasthetskuren kan da brukes til å finne "dimensjonerende" fasthet i fugen.



Figur 56

Fasthetskurve + Temperaturlogg = Dokumentert fasthetsutvikling i fuge.

Simulering

Fugebetongens herdeprosess kunne ikke simuleres med god nok nøyaktighet. Grunnen til dette er at beregningsprogrammene antok at herdeprosessen stoppet ved minusgrader (selv om dette ikke er tilfellet med bruk av NaNO_3 i fugebetongen), og at det mangler presise parametere for fugebetongen med tilsatt NaNO_3 . Fugebetongens temperatur kan simuleres med bedre nøyaktighet ($\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$), men beregningsprogrammene er i hovedsak basert på mer massive konstruksjoner. Temperaturen i fugekanalene krever en todimensjonal FE-analyse siden varmestrømmen vil gå i flere retninger. En FE-analyse krever mye input og kan være vanskelig å sette opp. Det er derfor upraktisk å sette opp en så avansert simulering for hvert enkelt fugestøp. For skjærfugen vil en enkel endimensjonal simulering være mulig fordi skjærfugen er så tynn at varmestrømmen vil være dominerende i en retning (mot hulldekkene). Dersom et endimensjonalt simuleringsprogram hadde kunnet beregnet herdeprosessen ved lave temperaturer, og man hadde nøyaktige parametere for fugebetongen, kunne det vært mulig å simulere fastheten i skjærfugen ved bruk av temperaturlogg for luft. Og siden skjærfugen får en lavere temperatur enn kanalene, kan den simulerte fastheten i skjærfugen ha fungert som en "dimensjonerende" fasthet. Videre kunne det også vært mulig å benytte værprognoser for å anta fasthetsutviklingen fram i tid, men da med en mindre nøyaktighet. Men siden det foreløpig ikke er mulig å simulere fugefastheten, så er det heller ingen vits å simulere fugetemperaturen.

7 KONKLUSJON

Fugebetong

Ved tilsetning av NaNO_3 i fugebetongen ble vannet hindret i å fryse, og hydratiseringsprosessen kunne fortsette ved minusgrader. NaNO_3 hadde en ugunstig effekt på trykkfastheten, der økt dosering ga en større reduksjon av fasthet. Ved 5% NaNO_3 og lagring i vannbad på 20 °C, ble 28-døgns fasthet redusert med 20% i forhold til en tilsvarende resept uten NaNO_3 . Fasthetsreduksjonen ble kompensert for ved bruk av SP-stoff og lavt masseforhold. Ved 5% NaNO_3 og lagring i -5 °C, ble 28-døgns terningtrykkfasthet registrert til 39 MPa. Ved 8% NaNO_3 og -10 °C og ble fastheten registrert til 33 MPa. Ved tilsetning av 20% flygeaske fikk resepten med 8% NaNO_3 betydelig redusert fasthet pga. kombinasjonen av høyt NaNO_3 innhold og lav temperatur. Flygeaske må derfor ikke benyttes ved en dosering på 8% NaNO_3 eller høyere. Flygeaske hadde derimot en gunstig effekt på sluttfastheten med 5% NaNO_3 .

Det ble trykt terninger etter 1, 2, 3, 4, og 7 døgn, og basert på disse fasthetene ble det lagd fasthetskurer. Enkelte resepter viste en god fasthetsutvikling, der 5 MPa ble nådd etter ca. 3 døgn. Dersom man ønsker en raskere fasthetsutvikling kan det være mulig å benytte akselererende tilsetningsstoffer i fugebetongen, men det må gjennomføres nye prøver i laboratorium da kombinasjonen av akselerator og høyt innhold av NaNO_3 kan ha en ugunstig effekt på fastheten.

Temperatur i fugebetong

Temperaturloggene fra byggeplass viste at skjærfugene gikk i minusgrader på under en time, mens kanalfugene brukte mellom 6 til 9 timer. Loggene viste også at bruk av isolasjonsmatter på skjærfuger ikke hadde noen merkbar effekt på temperaturen. Med bruk av simuleringsprogram ble effekten av rapidsement beregnet til ca. 0,5 °C i forhold til normal portlandsement i en kanalfuge, i en skjærfugen blir beregnet effekt enda mindre. Grunnen til dette er at varmetransporten til de nærliggende hulldekkene er stor. Bruk av finmalt sement og akseleratorer vil derfor ikke ha en merkbar effekt på temperaturen til fugebetongen, og kan kun benyttes til å øke fasthetsutviklingen.

Temperaturen i fugene holdt seg 1-2 °C over lufttemperaturen, det er derfor mulig å bruke temperaturlogg av luften som dokumentasjon til fugetemperaturen. Historiske temperaturdata fra nærliggende målestasjoner kan også benyttes som dokumentasjon, men det må da fastsettes en sammenheng mellom lufttemperaturen på byggeplass og målestasjon.

Fasthet i fugebetong

Det er på nåværende tidspunkt ikke mulig å simulere fastheten ved lave temperaturer, og med tilsatt NaNO_3 i betongen. Man kan derfor benytte seg av fasthetskurer fra trykkprøving i laboratorium. Fasthetskurvene gir en god indikasjon på oppnådd fasthet i fugen, og er gyldig så lenge temperaturen i fugen på byggeplass ikke går under den verdien som fasthetskurven er basert på.

Det er fortsatt en usikkerhet i fasthetskurven da den er basert på svært få prøver, og fastheten vil variere over flere prøveserier. Fasthetskurven kan derfor bare anses som orienterende, og kan ikke benyttes direkte uten at det kompenseres for usikkerheten. I denne oppgaven ble det foreslått å benytte en partialfaktor på 1,8. Den reduserte fastheten kan da tegnes inn på fasthetskurven som en egen stiplede linje. Det blir denne stiplede linjen man benytter seg av når man skal anslå fugens fasthet.

8 VIDERE ARBEID

Videre prøving bør bestå av å kartlegge fasthetsutviklingen ved lavere doseringer av NaNO_3 ved $-10\text{ }^\circ\text{C}$ (for eksempel 5% NaNO_3). En lavere dosering vil være gunstig for fasthetsutviklingen så lenge fugebetongen ikke fryser, og det kan også åpne muligheten for å bruke flygeaske ved $-10\text{ }^\circ\text{C}$ når doseringen av NaNO_3 er lavere.

Frysepunktet for de forskjellige reseptene bør også kartlegges. Dette er fordi man bør vite hvor stor temperaturbuffer man har i forhold til resepttemperatur og det faktiske frysepunktet. Frysepunktet kan finnes med forsøk i laboratorium ved å logge temperaturen i fugebetongen.

Nøyaktige materialparametere for fugebetong med tilsatt NaNO_3 kan finnes i laboratorieforsøk med herdekasse eller kalorimeter. Dette kan gjøres for å se på muligheten for å simulere fasthetsutvikling i fugene.

Ved å utføre flere trykkprøver kan man finne variasjonen til fastheten i de forskjellige reseptene. Det kan da være mulig å finne en karakteristisk fasthetskurve for hver resept, noe som vil gi en større sikkerhet på verdiene til fasthetskurven.

9 FIGURLISTE

Figur 1 Fugebetong pumpes inn mellom nedkjølte hulldekker.	6
Figur 2 Tverrsnitt av nedkjølte hulldekker med fuge.	6
Figur 3 Enkel illustrasjon av en horisontal skive sammensatt av mindre skiver.	7
Figur 4 Utvikling av trykkfasthet for betong over tid relativt til total potensial.	10
Figur 5 Måling av utbredning [9].	11
Figur 6 Måling av slump [10].	11
Figur 7 Forholdet mellom v/c-tallet og trykkfasthet.	13
Figur 8 Krav til kornstørrelse i skjærfuge [18].	17
Figur 9 Effekten av akselererende tilsetningsstoff [19].	19
Figur 10 Frysepunkt nedsettende effekt på vann [22].	22
Figur 11 Frysepunkter for betonger med ulike frysepunkt nedsettende tilsetningsstoffer [23].	22
Figur 12 Estimert frysepunkt i betongblanding med NaNO_3 i forhold til vann.	24
Figur 13 Estimert frysepunkt og anbefalte doseringer fra leverandører.	25
Figur 14 Kanal og skjærfuge i hulldekke.	26
Figur 15 Eksempel på utførelse av skjærfuge og kanalforbindelse fra hulldekke til vegg.	27
Figur 16 Hastighetsfunksjonen for to ulike betongtyper.	30
Figur 17 Eksempel på en betongs modenhetsutvikling ved ulike konstante herdetemperaturer.	31
Figur 18 Eksempel på varmeutvikling med trendlinje tilpasset forsøksdata.	32
Figur 19 Konvertering fra dansk-norsk til svenske parametere med minste kvadraters metode.	33
Figur 20 Trykkprøving av terning.	35
Figur 21 Tørrblanding av delmaterialer.	36
Figur 22 Ferdigblandet fugebetong.	36
Figur 23 Prøveformene fylles med fersk fugebetong.	37
Figur 24 Trykkprøving av terning.	37
Figur 25 Trykkfasthet etter 28 døgn i $-5\text{ }^\circ\text{C}$ for 5% NaNO_3 med og uten FA.	38
Figur 26 Trykkfasthet etter 28 døgn i $-10\text{ }^\circ\text{C}$ for 8% NaNO_3 med og uten FA.	39
Figur 27 Trykkfasthet etter 14 døgn i $-5\text{ }^\circ\text{C}$ for 2% og 8% NaNO_3 , med og uten FA.	40
Figur 28 Beregnet trykkfasthet $f_c(M)$ ved konstant $-5\text{ }^\circ\text{C}$, sammenlignet med målt verdi for 5% NaNO_3	41
Figur 29 Beregnet trykkfasthet $f_c(M)$ ved konstant $-10\text{ }^\circ\text{C}$, sammenlignet med målt verdi for 8% NaNO_3	41
Figur 30 Simulert trykkfasthet i HACON for $-5\text{ }^\circ\text{C}$, sammenlignet med målt verdi for 5% NaNO_3	42
Figur 31 Montasjeplass i Hasle, Oslo.	44
Figur 32 Testo 176-T4 temperaturlogger med 4 stk. kanaler.	44
Figur 33 Måling 1: Målepunkter i skjærfuge, knutepunkt, og luft.	45
Figur 35 Plassering av termoelementene på bøyelene i HD kanal.	45
Figur 34 Pumping av fugebetong inn i HD kanal.	45
Figur 36 Måling 1: Skjærfuge og knutepunkt i HD kanal.	46
Figur 37 Temperaturforskjell mellom fuge og knutepunkt.	47
Figur 38 Fasthetsutviklingen for resept A4 de 10 første dagene ved $-5\text{ }^\circ\text{C}$	47
Figur 39 Plassering av isolasjonsmatte.	48
Figur 40 Måling 2: Målepunkter for isolert og uisolert fuge.	48
Figur 41 Måling 2: Isolert og uisolert skjærfuge.	49
Figur 42 Måling 3: Målepunkter for hulldekke og skjærfuge.	50
Figur 43 Måling 3: Hulldekke og skjærfuge.	51
Figur 44 Simulering av temperatur og fasthet i skjærfuge med Hett 97.	52
Figur 45 Enkel modell av støpt skjærfuge og kanal i HACON.	52
Figur 46 Temperaturen i fugebetongen finnes med en FE-analyse i HACON.	52
Figur 47 Simulert temperatur for fuget kanal (KP) i HACON, sammenlignet med målt verdi.	53
Figur 48 Simulert temperatur for skjærfuge i HACON, sammenlignet med målt verdi.	53
Figur 49 Simulert temperatur i fuget kanal med vanlig portlandsement og rapidsement.	54
Figur 50 Simulert temperatur i skjærfuge med vanlig portlandsement og rapidsement.	54
Figur 51 Værdata fra målestasjoner og lufttemperatur målt på byggeplass.	55
Figur 52 Eksempel på fasthetskurve for 28 døgn ved $-5\text{ }^\circ\text{C}$, inkl. fasthet med partialfaktor.	57

Figur 53 Sannsynlighetsvarsel for byggeplass hvor det bør velges en fugebetong som tåler -5 °C. 58
Figur 54 Sannsynlighetsvarsel for byggeplass hvor det bør velges en fugebetong som tåler -10 °C..... 58
Figur 55 En temperaturlogg fra byggeplass bekrefter her en god sammenheng med værdata. 59
Figur 56 Fasthetskurve + Temperaturlogg = Dokumentert fasthetsutvikling i fuge..... 61

10TABELLISTE

<i>Tabell 1 Fasthetsklasser etter NS-EN 206-1 tab. NA.2 [2].....</i>	<i>9</i>
<i>Tabell 2 Metoder for måling av konsistens.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabell 3 De fire hovedmineralene i portlandsement [12, 13].....</i>	<i>14</i>
<i>Tabell 4 Typiske verdier for forskjellige sementtyper.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabell 5 Typisk kjemisk sammensetning av silikastøv [16].</i>	<i>16</i>
<i>Tabell 6 Eksempel på kjemisk sammensetning av flygeaske [17].</i>	<i>16</i>
<i>Tabell 7 Vannreduksjon for P og SP-stoffer [13:60].....</i>	<i>20</i>
<i>Tabell 8 Anbefalt dosering av tilsetningsstoff fra ulike leverandører av NaNO₃.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabell 9 Dosering av NaNO₃ og temperaturgrense.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabell 10 Konstantene for aktiveringsenergi for to betongtyper [29].</i>	<i>29</i>
<i>Tabell 11 Typiske materialparametere for fersk og herdet betong [6:18].</i>	<i>34</i>
<i>Tabell 12 Dokumenterte resepter.</i>	<i>43</i>

11 REFERANSER

- [1] SINTEF Byggeforsk, "Byggedetaljer 520.038 *Vinterstøping av betong*," 2014.
- [2] "Del 1: Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar," i *Betong*, NS-EN 206-1:2000+NA:2007, utg: Standard Norge.
- [3] S. I. Sørensen, *Betongkonstruksjoner: beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag, 2010.
- [4] "Del 1-1: *Allmenne regler og regler for bygninger*," i *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner*, NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008, utg: Standard Norge.
- [5] J. Hopp, S. Alexander, S. Fause, og L. Vinje, *Avstivning og kraftoverføring* vol. B. Oslo: Betongelementforeningen, 2012.
- [6] N. E. Forsén, L. Vinje, Ø. Vennesland, S. Alexander, og S. E. Torgersen, *Branntmotstand, bestandighet og tetting* vol. D. Oslo: Betongelementforeningen, 2007.
- [7] Norsk Betongforening. (2013). *Publikasjon nr 21*. Tilgjengelig: <http://www.tekna.no/ikbViewer/Content/870468/2013-03-25%20Pub21vedleggC.pdf>
- [8] SINTEF Byggeforsk, "Byggedetaljer 520.063 *Alkalireaksjoner i betong. Skademekanisme og regelverk ved nybygging*," 2007.
- [9] "Del 5: *Utbredingsmål*," i *Prøving av fersk betong*, NS-EN 12350-5:2009, utg: Standard Norge.
- [10] "Del 2: *Synkmål*," i *Prøving av fersk betong*, NS-EN 12350-2:2009, utg: Standard Norge.
- [11] SINTEF Byggeforsk, "Byggedetaljer 520.027 *Kvalitetskontroll av fersk betong*," 2006.
- [12] P. Gjerp, M. Opsahl, og S. Smeplass, *Grunnleggende betongteknologi*. Lillestrøm: Byggenæringens forlag, 2004.
- [13] B. Søpler, *Betongboka*. Oslo: Norcem, 2004.
- [14] "Del 1: *Bestemmelse av fasthet*," i *Sementprøving*, NS-EN 196-1, utg: Standard Norge.
- [15] R. Siddique og I. K. Mohammad, *Supplementary Cementing Materials*. New York: Springer, 2011.
- [16] Finnfjord. (2014). *Kjemiske egenskaper til silika produsert ved Finnfjord*. Tilgjengelig: <http://www.finnfjord.no/silika>
- [17] K. De Weerd, H. Justnes, K. O. Kjellsen, og E. Sellevold, "Fly ash–limestone ternary composite cements: synergetic effect at 28 days.," 2010.
- [18] "Hulldekker," NS-EN 1168:2005+A3:2011, utg: Standard Norge.
- [19] SINTEF Byggeforsk, "Byggedetaljer 572.207 *Tilsetningsstoffer for betong*," 2010.
- [20] C. J. Korhonen, "Antifreeze Admixtures for Cold Regions Concreting," U.S. Army Engineer Research and Development Center, 1990.

- [21] R. Myrdal, "Accelerating admixtures for concrete," SINTEF, 2007.
- [22] D. R. Lide, Red., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 2005.
- [23] C. J. Korhonen, "Expedient Low-Temperature Concrete Admixtures for the Army," U.S. Army Engineer Research and Development Center, 1999.
- [24] R. Rixom og N. Mailvaganam, *Chemical Admixtures for Concrete*. London: E & FN Spon, 1999.
- [25] D. Vollset, "The use of anti-freeze agents," Mapei, 2010.
- [26] T. R. Andersen, R. Knustad, L. Vinje, og S. Alexander, *Bygging med betongelementer* vol. A. Oslo: Betongelementforeningen, 2010.
- [27] H. Skau og S. Alexander, *Transport og montasje* vol. G. Oslo: Betongelementforeningen, 2009.
- [28] NORCEM. (2011). *Herdeteknologi*. Tilgjengelig:
http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/FECC97E1-A475-4324-8074-6A3D4A10C082/0/Herdningsteknologi_net.pdf
- [29] SINTEF Byggforsk, "Byggdetaljer 520.028 *Oppfølging av betongens herdeforløp på byggeplass*," 2011.
- [30] S. Røine, "Presentasjon: *Fugestøp test 1*," Spenncon, 2014.

VEDLEGG

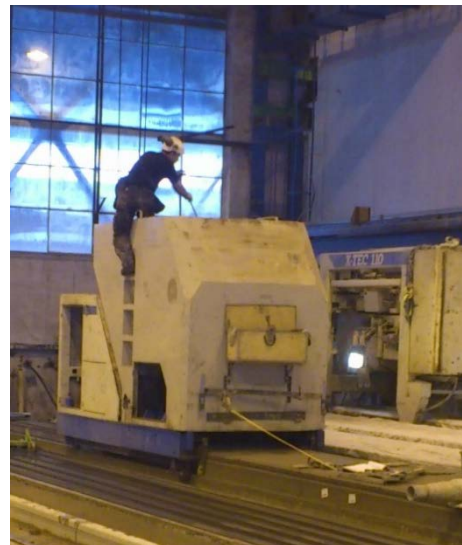
Vedlegg A: Betongelementer	s. 70
Vedlegg B: Kraftoverføring i fuge	s. 74
Vedlegg C: Temperaturlogger fra byggeplass	s. 81
Vedlegg D: Blandelogg	s. 89
Vedlegg E: Betongresepter	s. 90
Vedlegg F: Siktekurve	s. 93
Vedlegg G: Produktblader	s. 94
Vedlegg H: Trykkfasthet	s. 97
Vedlegg I: FEM-simulering	s. 100

VEDLEGG A: BETONGELEMENTER

Produksjon

Betongelementer produseres i egne produksjonsanlegg, og siden produksjonen foregår innendørs vil ikke produksjonen bli påvirket av vær og klima. Dette gir en bedre kontroll over betongens herdeforløp enn for plaststøpt betong.

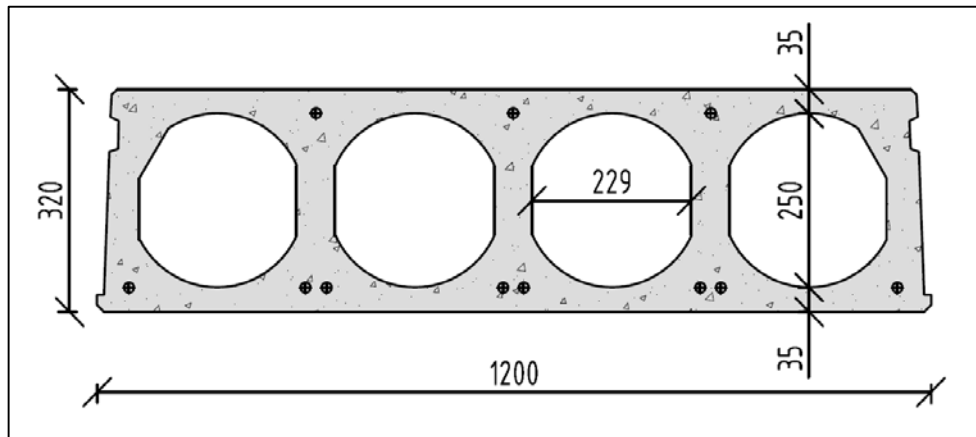
Produksjonsmetoden for betongelementene er avhengig av de ulike bruksområdene til elementene for eksempel tak, dekker, vegger, bjelker, eller søyler. For hvert bruksområde finnes det igjen ulike elementtyper. For dekker kan det for eksempel benyttes elementer som hulldekker, DT, ST, SDT, massive plater, eller forskalingsdekker. Elementprodusentene produserer det som blir etterspurt av kundene, og over tid har det utviklet seg standard størrelser for de ulike elementtypene. Men de eksakte dimensjonene vil være avhengig av produksjonsmetode og varierer derfor med de ulike elementprodusentene.



*Figur A-1
Produksjon av hulldekke.*

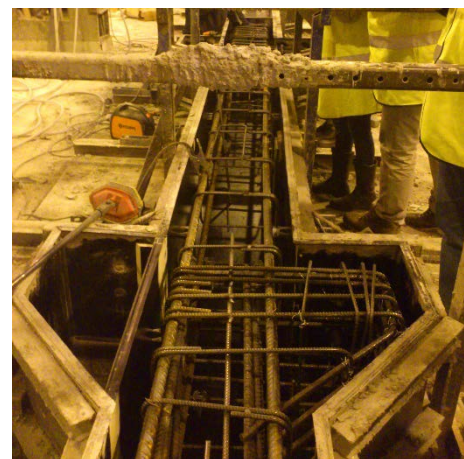
Hulldekker produseres med forspent armering og støpes enten ved ekstrudering eller glideforskaling. Produksjonsmetoden varierer fra produsent til produsent. Det vil derfor være ulikt utseende og størrelser på blant annet kanalene i hulldekker fra de ulike produsentene. Bredden på hulldekkene er standard 1200 mm, mens høyden kan variere fra 200 mm til 500 mm [26:103]. Standard størrelser, dvs. tverrsnittshøyder, er HD200, HD265, HD320, HD400, og HD500. Hulldekkets tillatte spennvidde vil være avhengig av blant annet belastning, tverrsnittshøyde, betongkvalitet, og spennarmering. I tillegg vil egenvekten variere litt fra forskjellige produsenter. Maks anbefalt spennvidde kan typisk være fra 10 m for HD200, til 19 m for HD500 [26:105], større spennvidder kan være mulig etter nøyere beregning og vurdering. Bruksområdene til hulldekker kan være mange, men de er mest brukt som tak og etasjeskillere i kontor- og offentlige bygg. Siden hulldekkene vanligvis er en viktig del av byggets statiske system, er håndteringen av hulldekkene viktig. Det er derfor ikke uvanlig at produsenten er ansvarlig for prosjektering, transport og montasje av hulldekkene. Dette er fordi produsenten har løsninger for blant annet opplegg og forbindelser, og forstår viktigheten av at det velges riktig løsning (både i planleggings- og montasjefasen) slik at konstruksjonsdetaljene og den statiske helheten ivaretas.

Ved å støpe hulldekkene på en stålbunn oppnås en jevn og glatt underkant, mens overkanten og sidene får en mer ru flate. Dette er en fordel da hulldekket får en bedre heft til fuge- og avrettingsmasser. Hulldekker har armering i form av spennkabler som ligger langs hulldekkets lengde i under- og overkant (se Figur A-2). Antall nødvendige spennkabler og spennkraften i disse bestemmes fra beregninger utført i bruddgrensetilstanden. Det er også vanlig å tilpasse spennkraften etter bruksgrensebelastningen for å ha kontroll på deformasjonen over hele hulldekkets brukstid. På grunn av kraften i spennkablene vil hulldekket vanligvis ha en viss oppbøyning før den får påført laster. Når hulldekket har blitt belastet over tid vil denne reduseres. Graden av eventuelle over- og underhøyder blir beregnet av hver enkelt produsent, og er basert på laster som er estimert påført hulldekket over hulldekkets levetid.



Figur A-2
 Typiske mål for HD320, kanalform og størrelse varierer med produsent.

Andre elementtyper produseres også i standard størrelser, men med variasjoner fra produsent til produsent. Ulike detaljer gir da variasjoner i egenvektene hos de forskjellige produsentene. Prefabrikkerte bjelker kan ha ulike former og størrelser på tverrsnittet, og være enten slakk- eller spennarmerte. Det kan også legges inn en overhøyde i form av en krumning i bjelkeformene. Prefabrikkerte søyler kan ha tverrsnitt som er runde, rektangulære, mangelkantede, u-formede osv. Rektangulære søyler kan støpes liggende (se Figur A-3) og kan derfor ha lange lengder uten å måtte skjøtes. Sirkulære søyler må støpes stående og må da skjøtes etter hver etasje. Alle søyler får midlertidige merker på formsidene fra formskjøter. Disse sidene må overflatebehandles dersom søylene skal være synlige (som de ofte er). Dette kan gjøres med blant annet maling, sandblåsing, eller syrevask. Konsoller kan leveres med søylene som brukes til å forbinde søylen til bjelker. Som man kan se på Figur A-3 så er det ikke komplisert å bygge inn to konsoller på hver side av en rektangulær søyle. Men dersom det ønskes en konsoll vinkelrett på den andre, så vil prisen på søylen øke betraktelig.



Figur A-3
 Liggende form til søyle med konsoll.

Transport

For avstander inntil 300 til 400 km fra produksjonsanlegget til byggeplass, er veitransport vanligvis den billigste transportmetoden [26:21]. Utover disse avstandene bør jernbane, eller eventuelt båt vurderes. Det er uansett veitransport som er den vanligste transportmetoden siden man da kan transportere betongelementene direkte til byggeplassen uten å måtte omlaste. Produksjonsanlegg vil også vanligvis ligge innenfor 300 km til byggeplass for de fleste stedene. Vogntog har begrensninger på vekt, høyde, lengde og bredde på norske veier. Disse begrensningene finner man i "Vegliste" som gis ut hvert år av Statens vegvesen. For "Vegliste 2014" er de generelle begrensningene for totalvekt 50 tonn, høyde 4 meter, bredde 2,55 meter, og lengde 19,50 meter. Noen veier kan ha strengere krav enn de som er oppgitt. Men det er også mulig overskride kravene dersom man søker dispensasjon fra Statens vegvesen. Under gitte betingelser kan man kjøre som "spesialtransport" med en tillatt lengde

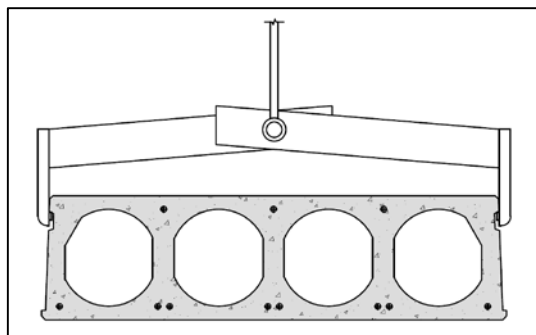
på 20 meter og bredde på 3,25 meter. Det er også en prøveperiode fram til 2017, hvor det på bestemte veier er tillatt med "modulvogntog" med lengde på inntil 25,25 meter.

For jernbane og båttransport må betongelementene lastes om før og etter transporten. For veitransport kan elementene transporteres til byggeplass, hvor de kan heises fra vogntoget direkte på plass i bygget. Men det kan være nødvendig å plassere de tyngste elementene lavest i lasten, slik at man får et tyngdepunkt og en stabil last. Noe som betyr at man ikke alltid kan lastes direkte på plass i bygget uten mellomlagre på byggeplass. Det er viktig at elementene lagres riktig under transport slik at de ikke skades. Elementene skal ikke ligge direkte oppå hverandre, men det skal brukes mellomlegg som fungerer som opplagringspunkt, plasseringen av mellomlegg skal være forhåndsbestemt og markert på alle betongelementer. Betongelementer må de sikres med stropppeutstyr, dette skal holde dem fast og hindre sideveis bevegelse under transport. Når betongelementer ankommer byggeplass, bør de kontrolleres og inspiseres av mottaker før de losses av. Det kan oppstå små og store skader under transporten, og det må vurderes hva konsekvensen av disse skadene kan ha. Man bør også forsikre seg om at elementene er av riktig type, og at de er riktig markert slik at de lettere kan plasseres i bygget i henhold til montasjeplan.

Montasje

Når betongelementene har ankommet byggeplass og blitt inspisert og kontrollert, kan mottaker kvittere for lasten og dermed overta ansvaret. Men lossingen kan også utføres av transportøren dersom dette har blitt avtalt. For betongelementer benyttes vanligvis mobilkraner. Disse kan ha løftekapasiteter opp mot 120 tonn (vanligvis benyttes kraner med løftekapasitet fra 25 til 90 tonn [26:22]). Alternativt kan byggeplasskran benyttes, men disse kranene har begrenset løftekapasitet og er derfor ikke alltid brukbare. Vekten av betongelementer vil variere med tverrsnitt og lengde. Hulldekker kan ha en egenvekt fra 3 kN/m til 7,5 kN/m, det vil si at en 20 meter lang HD500 kan veie ca. 15 tonn (er kanalene utstøpte vil egenvektene øke ytterligere).

Alle betongelementer skal kun løftes i forhåndsbestemte løftepunkter. Det skal kun benyttes godkjente løfteredskap som kobles mellom kran og betongelement. Betongelementer som hulldekker kan løftes med klyper (se Figur A-4), men dersom det finnes innstøpte løfteanordninger som for eksempel bøyler bør disse løftes med kroker. Ved bruk av stropper og kjettinger må man passe på at løftevinkelen (vinkel mot vertikal overflate) ikke blir for liten, da mindre vinkler gir større belastninger i stroppene. Det finnes egne løftetabeller som angir tillatte løftekapasiteter ved ulike løftevinkler. For lange elementer bør derfor løfteåk benyttes. Hvis løftet må avvike fra standard metode, skal dette være nøye planlagt og bør være godkjent av betongelementleverandøren. Alt løfteutstyr på byggeplass skal kontrolleres årlig av en egen kontrollerende virksomhet.



Figur A-4
 Løfting av hulldekke med klype.

Det mest gunstig å løfte betongelementene fra bil direkte på plass i bygget. Men hvis dette ikke er mulig, må betongelementene mellomlagres på byggeplassen. Mellomlagringen må foregå slik at betongelementene ikke blir skadet eller får deformasjoner. Betongelementene må lagres på jevn og stabil grunn. Høyden på stabelen er avhengig av elementenes form og størrelse. Det må aldri være fare for at stabelen kan velte, som kan føre til alvorlig personskade. Det skal ikke stables betongelementer direkte oppå hverandre, men det skal benyttes mellomlegg. Mellomleggene skal ligge ved forhåndsbestemte opplagringspunkter, og de må ligge direkte over hverandre slik at det unngås unødvendig skjær- og momentbelastning i betongelementene. Nederste element skal heller ikke ligge direkte på grunn, men være understøttet av underlag. Det er viktig at underlaget ligger nøyaktig i vater, slik at man unngår langvarige spenninger og deformasjoner i betongelementene på grunn av torsjonsvridninger. Forskjellige elementtyper har forskjellige krav til mellomlagring, noen ganger gir også konstruktøren spesielle krav ved spesialtilpassede elementer.

Det skal gjennomføres en risikoanalyse før montasje arbeidet starter. Man bør unngå unødvendig trafikk i nærheten av montasjeområdet, og området skal avspærres om nødvendig. Det må ikke utføres annen aktivitet på montasjeplassen eller i de underliggende etasjene på bygget. Alle montører skal benytte nødvendig personlig verneutstyr som hjelm, reflekser, vernesko, briller, og hansker. Siden byggets trappesjakt ofte ikke er ferdig under montasje arbeidet, kan adkomst til montasjeplass være med heis, lift, stillas, rampe eller stige. Noen entreprenører har forbud mot bruk av stige som adkomst på byggeplass, da bruk av stige er en av de vanligste årsaker til ulykker [27:84]. Dersom oppleggende må stemples, skal stemplingsplan være utarbeidet før montasjen starter.

Montasje av søyler krever at fundamenter er kontrollert med hensyn på posisjon, høyde, og gitte toleranser på innstøpingsgods. Fundamentene kan bestå av fotplater, hylsefundament, eller limt innfesting. Fundamentene skal være tydelig markert med aksemerker. Søylen reises med kran fra liggende stillstand. Hvis søylen er slanke bør det benyttes to kraner. Når søylen er heist til en stående stilling, blir den forsiktig senket ned på plass på bolter, jern, eller rør i fundamentet. Etter at søylen er festet må det kontrolleres at den står loddrett, eventuelle avvik må etterjusteres. Når søylen står i lodd og er festet, kan kranen kobles fra.

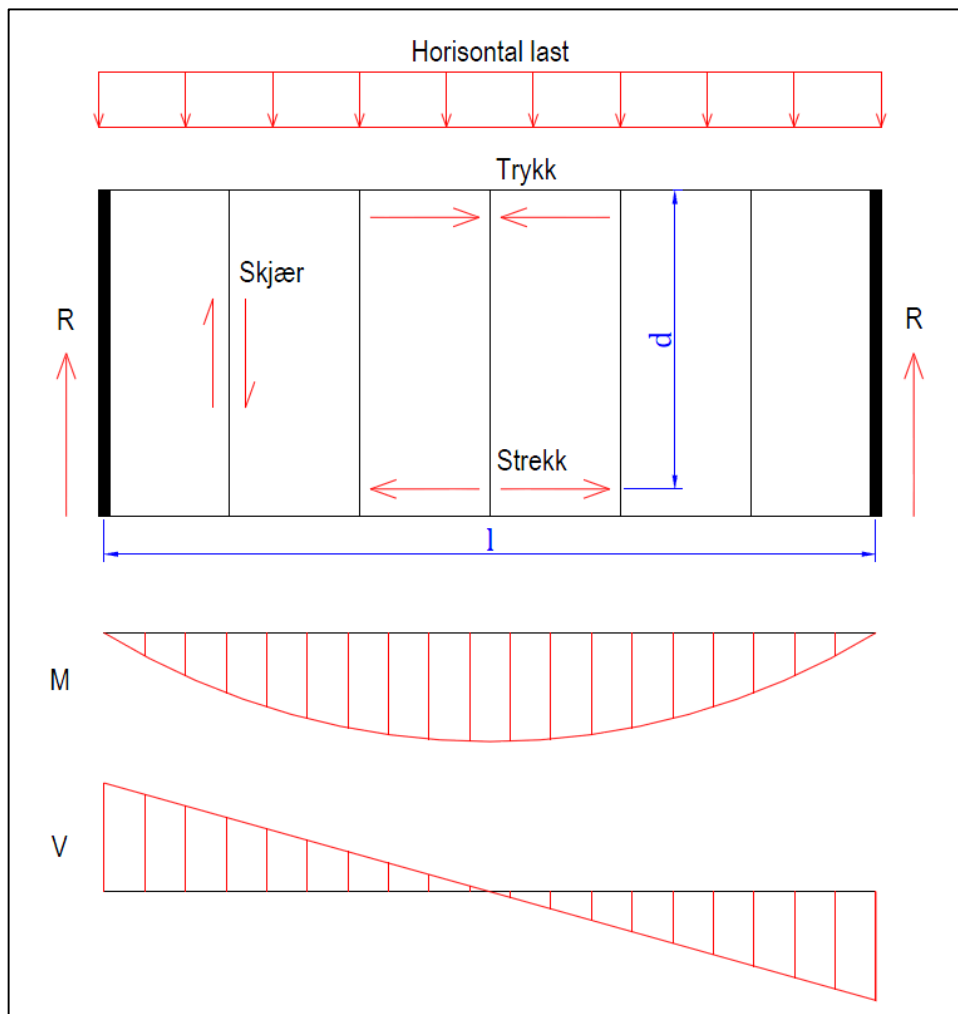
Montasje av bjelker krever at oppleggspunkter som konsoller o.l. er kontrollert med hensyn på høyde og posisjon. Bjelken løftes med kran og styres inn til sin forhåndsbestemte posisjon. Plasseringen må være innenfor gitte toleranser slik at det ikke oppstår unødvendige eksentrisiteter. Når bjelken er plassert riktig og festet til opplegget, kan kranen kobles fra. Veggelementer bør lagres på kant og skal løftes med innfestede løfteanordninger. Veggelementet styres inn og monteres på angitt plass, staging av vegger utføres hvis nødvendig. Når veggen er festet i opplegget og står rett, kan kranen kobles fra.

Montasje av hulldekker kan gjøres på stål- eller betongbjelker. Det kreves også at oppleggspunkter er kontrollert med hensyn på høyde og posisjon. Når hulldekkene løftes med klyper skal disse plasseres nær endene til hulldekket, men ikke i nærheten av eventuelle åpne kanaler. Vanligvis benyttes det to klyper per hulldekke. Avstanden mellom klypene blir tilpasset med en bom, og er avhengig av hulldekkets tverrsnitt og lengde. Dersom hulldekkene er korte, skal det være innstøpt løftebøyler e.l. som bør benyttes. De første hulldekkene monteres ved bruk av lift, stillas e.l. og kan benyttes som plattform for videre montasje. Avstanden til fugene må være innenfor gitte toleranser, større avvik kan justeres med retteklype. Etter montasje av hulldekker er det viktig å inspisere drenshull slik at man slipper fuktproblemer i bygget på et senere tidspunkt, for støpte kanaler må det borres nye drenshull.

VEDLEGG B: KRAFTOVERFØRING I FUGE

Lastfordeling i horisontal skive av hulldekke

I Norge er hulldekker er den vanligste horisontale skiven som benyttes. Med unntak ved store påkjenninger, så benyttes det vanligvis ikke påstøp på hulldekkene. Armeringen ligger som oftest langs skjærfugene og på tvers av hulldekkene ved endene. Hulldekkene kan derfor ikke ta strekkrefter på tvers av skjærfugene, som for eksempel vindsug fra gavlveggene. Som oftest blir skiver av hulldekker betraktet som en betongbjelke når spennvidden l er to ganger større enn den effektive høyden d . Når $l \leq d$ betraktes betongkonstruksjonen som en skive. Når spennvidden ligger mellom d og $2d$ så får man en mellomting mellom skive og bjelke [5:120].

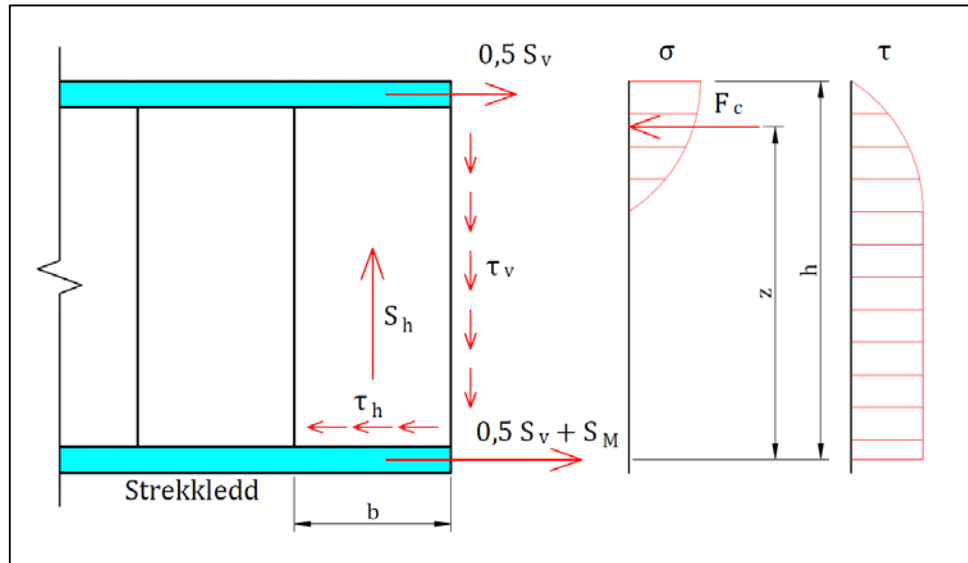


Figur B-1
 Skive av hulldekker fritt opplagt på vertikale veggskiver.

Horisontal belastning kan bestå av:

- Vind (vindtrykk på losiden, vindsug på losiden og på gavlveggene).
- Skjevlast (helning og eksentrisiteter i konstruksjonen).
- Jordtrykk (konstruksjonsdeler under bakken).
- Kranlast (Oppbremsing og slingring av last).
- Ulykkeslaster (påkjørrelse med kjøretøy, utilsiktet støt og eksplosjoner).
- Jordskjelv

Skiven kan regnes som en bjelke hvis skiven er høy (stiv) og lavt utnyttet [5:112]. Man kan da finne snittkreftene ved bruk av bjelketeori.



Figur B-2
 Snittkrefter i hulldekkeelementer med bjelketeori.

Momentet fordeler seg som to kraftpar med en indre momentarm z :

- Momentstrekket S_M tas opp i armering på tvers i enden av hulldekket.
- Trykkresultanten F_c fra momenttrykket σ tas opp i hulldekket.

I skiver av hulldekker får man en mye lengere momenttrykksone med mindre trykkspenning enn for en vanlig betongbjelke. Dette gir en kortere indre momentarm z som vil variere mellom $z = 0,5 \cdot l$ og $z = 0,7 \cdot l$ avhengig av skivens opplagerbetingelser [5:121]. Bli hulldekkeskiven betraktet som en bjelke blir trykkspenningene økt og trykksoneens lengde redusert, og den indre momentarmen kan da økes til $z \approx 0,85 \cdot d$. Momentstrekket som skal tas opp i strekkleddet blir derfor gitt som:

$$S_M = \frac{M}{z} \quad (\text{B-1})$$

Skjærspenningen regnes som lik rundt hele elementet, noe som kan føre til en viss overdimensjonering. Men da fugene må ta opp vindkrefter fra forskjellige sider kan dette være naturlig å gjøre.

$$\tau_v = \tau_h = \frac{V}{z \times t} \quad (\text{B-2})$$

Med en gitt elementbredde kan skjærkraften ved endefugen gis som følgende kraft:

$$V_h = \frac{V}{z} \times b \quad (\text{B-3})$$

Skjærkraften må overføres til skjærfugene gjennom trykk- og strekksone (to soner). Disse endefugene må være strekkarmert for å kunne ta opp følgende kraft:

$$S_v = \frac{V}{\mu \times n} \quad (\text{B-4})$$

Det må også armeres på tvers i strekksonen for å kunne ta opp skjærfriksjonen fra V_h . Dette gjøres vanligvis ved at det plasseres en bøyle i sliss ved hulldekkets ende (se Figur 15).

$$S_h = \frac{V}{\mu \times z} \times b = \frac{V_h}{\mu} \quad (\text{B-5})$$

Materialfaktorer

Materialfaktorer brukes for å ta hensyn til variasjon i materialelegenskaper, geometriske avvik, og usikkerhet i beregningsmodellen [4].

NS-EN 1992-1-1 (EC2); tab. NA.2.1N angir materialfaktorene for bruddgrensetilstanden som:

- $\gamma_c = 1,50$ (betong)
- $\gamma_s = 1,15$ (armering)

Men for disse materialfaktorene kreves det at utførelsen av betongkonstruksjonen er i henhold til standardens krav og kontrollopplegg. Som nevnt så vil det ikke alltid være praktisk å varme opp betongelementer ved fugestøping av store arealer, noe som er et krav under vinterforhold. Vanlig praksis er derfor å øke materialfaktoren for betong med 20 prosent for fugestøp på byggeplass [22:15].

- $\gamma_c = 1,80$

Kapasitet i fuger

EC2 pkt. 6.2.5 angir dimensjonerende skjærkraftkapasitet i fuge med følgende formel (antatt armeringens vinkel mot fugen $\alpha = 90^\circ$):

$$V_{Rdi} [\text{MPa}] = c \times f_{ctd} + \mu \times \rho \times f_{yd} + \mu \times \sigma_n \leq 0,5 \times v \times f_{cd} \quad (\text{B-6})$$

I fugene vil skjærkapasiteten være summen av betongens heftbidrag pluss friksjonskraft av tverrarmring pluss friksjonskraft av eventuell ekstern trykkraft.: Bidragene kan angis som [5:179]:

$$\text{heftbidrag [kN]} = c \times f_{ctd} \times A_i \quad (\text{B-7})$$

Der c er fugens ruhetstall.
 f_{ctd} er fugens dimensjonerende sylindrestrekkfasthet.
 A_i er fugens heftareal (fugens høyde ganger lengde).

$$\text{armering [kN]} = \mu \times f_{yd} \times A_s \quad (\text{B-8})$$

Der μ er fugens friksjonstall.
 f_{yd} er armeringens dimensjonerende flytegrense.
 A_s er armeringsarealet som krysser fugen.

$$\text{trykkraft [kN]} = \mu \times N_{Ed} \quad (\text{B-9})$$

Der N_{Ed} er utvendig normalkraft gjennom fugen.

Disse bidragene må også kontrolleres mot betongens trykkfasthet:

$$\text{bidrag} \leq \text{trykkfasthet [kN]} = 0,5 \times v \times f_{cd} \times A_f \quad (\text{B-10})$$

Der v er en fasthetsreduksjon som kommer av riss i skjærbelastet fuge.
 f_{cd} er fugens dimensjonerende sylindetrykkfasthet.

Dimensjonerende trykk- og strekkfasthet angis i EC2 pkt. 3.1.6:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (\text{B-11})$$

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \times \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad (\text{B-12})$$

Der α_{cc} og α_{ct} er faktorer som tar hensyn til tap av trykk- og strekkfasthet ved langtidsbelastning og ugunstige virkninger ved måten lasten påføres.
 Disse faktorene settes til 0,85 etter EC2 pkt. NA.3.1.2.
 f_{ck} er karakteristisk (kan underskrides med 5% sannsynlighet) sylindetrykkfasthet etter 28 døgn
 $f_{ctk,0,05}$ er karakteristisk (kan underskrides med 5% sannsynlighet) sylindrestrekkfasthet etter 28 døgn.

Faktoren v bestemmes i EC2 pkt. NA.6.2.2(6):

$$v = 0,6 \times \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (\text{B-13})$$

En ekstrudert/glideformet hulldekke vil etter EC2 pkt. 6.2.5(2) ha en glatt overflate i side- og overkantene dersom den ikke har eksponert tilslag, fortanning, eller blitt ytterligere behandlet med rive. Hulldekkets underside vil derimot være svært glatt når det støpes på stålbunn. For fugen får man derfor følgende verdier:

- $c = 0,20$
- $\mu = 0,60$

Horisontal skjærkapasitet

Det benyttes det vanligvis ikke armering på tvers mellom hulldekkene. Og ser man bort fra trykkraft vil bidraget settes til:

$$\tau = c \times f_{ctd} \quad (\text{B-14})$$

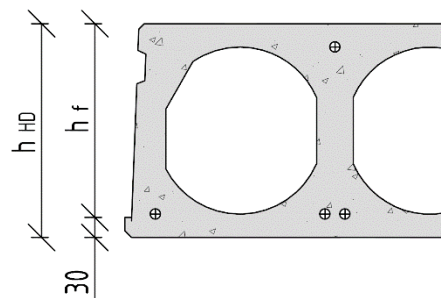
Ved å benytte $\gamma_c = 1,80$ for montasjearbeider og $c = 0,20$ for glatt fuge, kan man finne fram til maksimale skjærspenninger ved fugebetongens ulike fasthetsklasser:

Tabell B-1
Kapasitet mot trykkbrudd og maksimal skjærspenning langs fugen.

Klasse	f_{ck} [MPa]	$f_{ctk,0,05}$ [MPa]	f_{cd} [MPa]	f_{ctd} [MPa]	ν	$0,5 \nu f_{cd}$ [MPa]	τ [MPa]
B10	10	1,0	4,7	0,47	0,576	1,4	0,09
B20	20	1,5	9,4	0,71	0,552	2,6	0,14
B25	25	1,8	11,8	0,85	0,540	3,2	0,17
B30	30	2,0	14,2	0,94	0,528	3,7	0,19
B35	35	2,2	16,5	1,04	0,516	4,3	0,21
B45	45	2,7	21,3	1,28	0,492	5,2	0,26

Man kan her se at det ikke er trykkbrudd ($0,5 \nu f_{cd}$) som blir avgjørende for denne type fuger, med mindre den blir utsatt for ekstreme aksiallaster.

Ved å så benytte fugens høyde, kan man så finne fram til maksimal skiveskjær for de ulike HD typene. Fugehøyden h_f vil normalt være elementhøyden minus 30 mm (se Figur B-3). HD320 vil for eksempel ha $h_f = 290$ mm. Skiveskjærkapasitet som følge av heftbidrag kan derfor gis som:



Figur B-3
Hulldekkets fugehøyde (h_f).

$$V_{Rd,i} = c \times f_{ctd} \times h_f \quad (B-15)$$

Tabell B-2
Skiveskjærkapasitet langs glatt fuger.

Klasse	$V_{Rd,c}$ [kN/m]		
	HD265	HD320	HD500
B10	22,2	27,4	44,4
B20	33,3	41,1	66,6
B25	40,4	49,3	79,9
B30	44,4	54,8	88,8
B35	48,8	60,3	97,7
B45	59,9	74,0	119,9

EC2 pkt. 10.9.3(12) angir en maksimal midlere skjærspenning i fugens lengderetning som:

- $\tau_{max} = 0,10$ MPa for svært glatte overflater.
- $\tau_{max} = 0,15$ MPa for glatte og ru overflater.

Grunnen til at standarden angir en maksimal skjærspenning uavhengig av betongfastheten, er at fugen har små muligheter til å trekke seg sammen og det kan da oppstå riss i fugen. Dette har en stor innvirkning på heftbidraget fra betongen. Det maksimale skiveskjæret settes da til:

$$V_{Rd,i,max} = \tau_{max} \times h_f \quad (B-16)$$

Tabell B-3
Maksimal skiveskjærkapasitet langs glatt fuge.

$V_{Rd,c}$ [kN/m]		
HD265	HD320	HD500
35,3	43,4	70,5

Disse verdiene tilsvarer omtrent normalt heftbidrag for B20 betong, men det vil også være hensiktsmessig å ta med lavere fastheter i fugen.

Basert på Formel (B-15) og (B-16) og man derfor gi det maksimale skiveskjæret langs glatt fuge som:

$$V_{Rd,c} = c \times f_{ctd} \times h_f \leq 0,15 \text{ MPa} \times h_f \quad (\text{B-17})$$

Armeringen i endefugene kan begrenseskjærkapasiteten ytterligere. Dette vil være avhengig av armeringsmengden som igjen er begrenset av plassen i fugene. Nedenfor er det kun gitt et eksempel:

Eksempel på kapasitet i armering

Armering B500C: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

$$f_{yd} = \frac{500 \text{ MPa}}{1,15} = 435 \text{ MPa}$$

1Ø20 i sliss.

2Ø20 langs endefugene.

Hulldekkedimensjoner: $b = 1,2 \text{ m}$ $l = 12 \text{ m}$

Ruhet: $\mu = 0,6$ (glatt fuge).

Tillatt skjærstrøm i sliss:

$$S_h = \frac{F_{yd}}{b} = 0,435 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \times \frac{20^2 \times \pi}{4} \text{mm}^2 \times \frac{1}{1,2 \text{ m}} = 113,9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tillatt skjærstrøm iht. Formel (B-5):

$$V_h = \mu \times S_h = 0,6 \times 113,9 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 68,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tillatt skjærkraft langs endefuge:

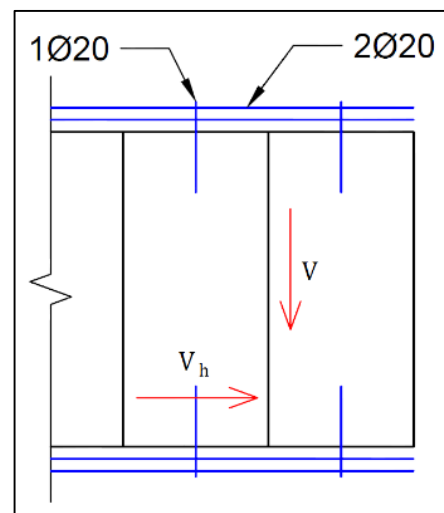
$$S_v = F_{yd} = 0,435 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \times 2 \times \frac{20^2 \times \pi}{4} \text{mm}^2 = 273,3 \text{ kN}$$

Indre momentarm:

$$z \approx 0,8 \times l = 0,8 \times 12 \text{ m} = 9,6 \text{ m}$$

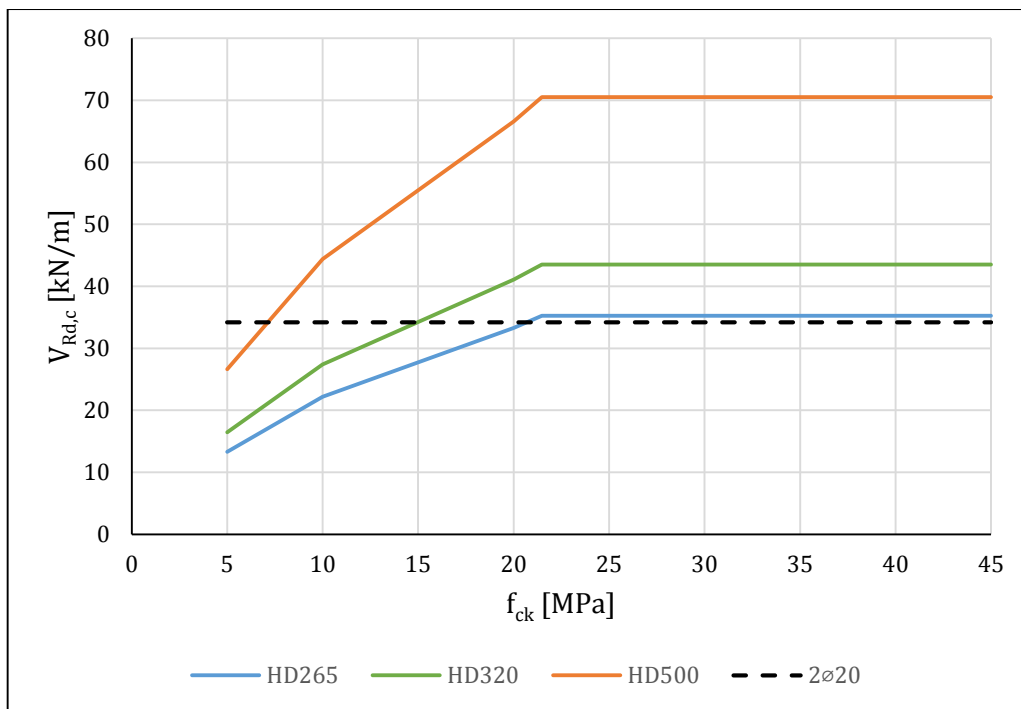
Tillatt skjærstrøm iht. Formel (B-4):

$$V = \frac{n \times \mu \times S_v}{z} = \frac{2 \times 0,6 \times 273,3 \text{ kN}}{9,6 \text{ m}} = 34,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



Figur B-4
Armering av endefuger.

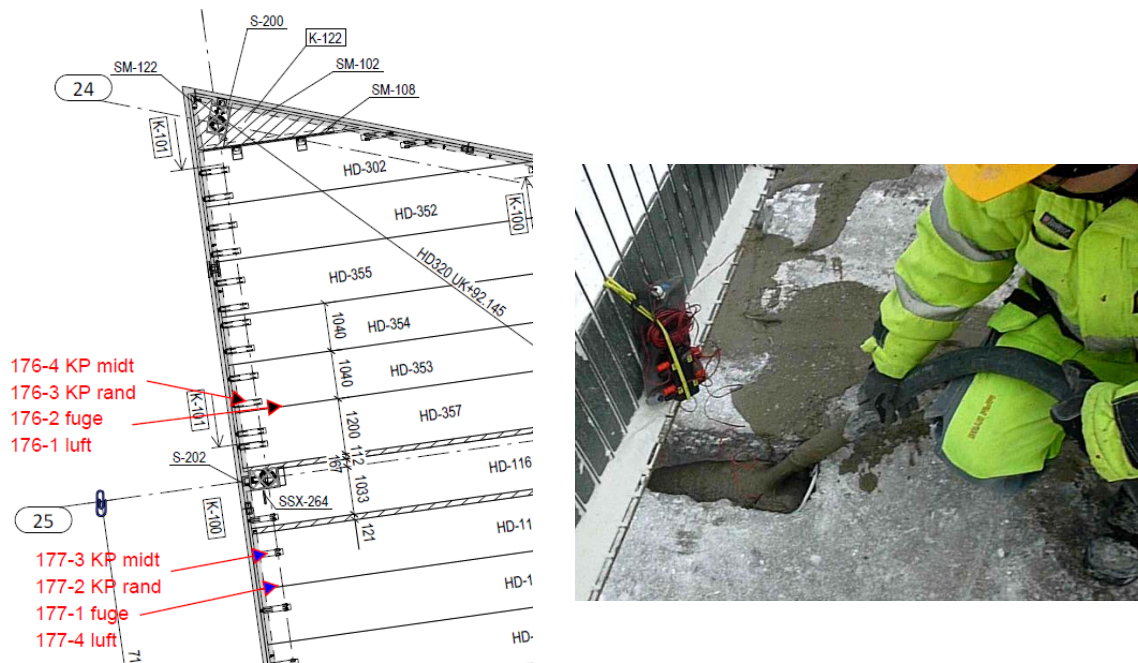
I dette forenklete eksemplet blir altså skjærkapasiteten langs endefuge begrensende når betongfastheten er høy. Betongfastheten blir begrensende for B20 og lavere ved HD265 og for B10 ved HD320. Fra dette kan man se at det er viktig at fugen får nok fasthet tidlig i utviklingen.



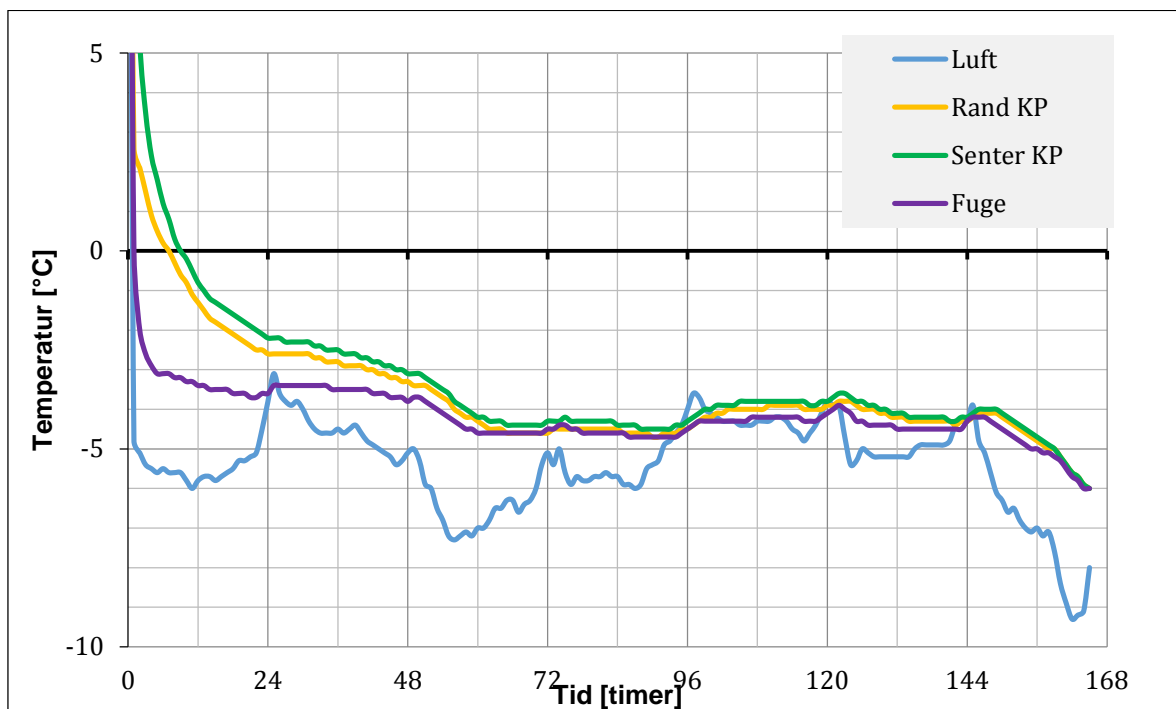
Figur B-5
 Maksimalt tillatt skjærstrøm for 1,2 x 12,0 m hulldekke og 2ø20 armering langs endefuge.

VEDLEGG C: TEMPERATURLOGGER FRA BYGGEPLASS

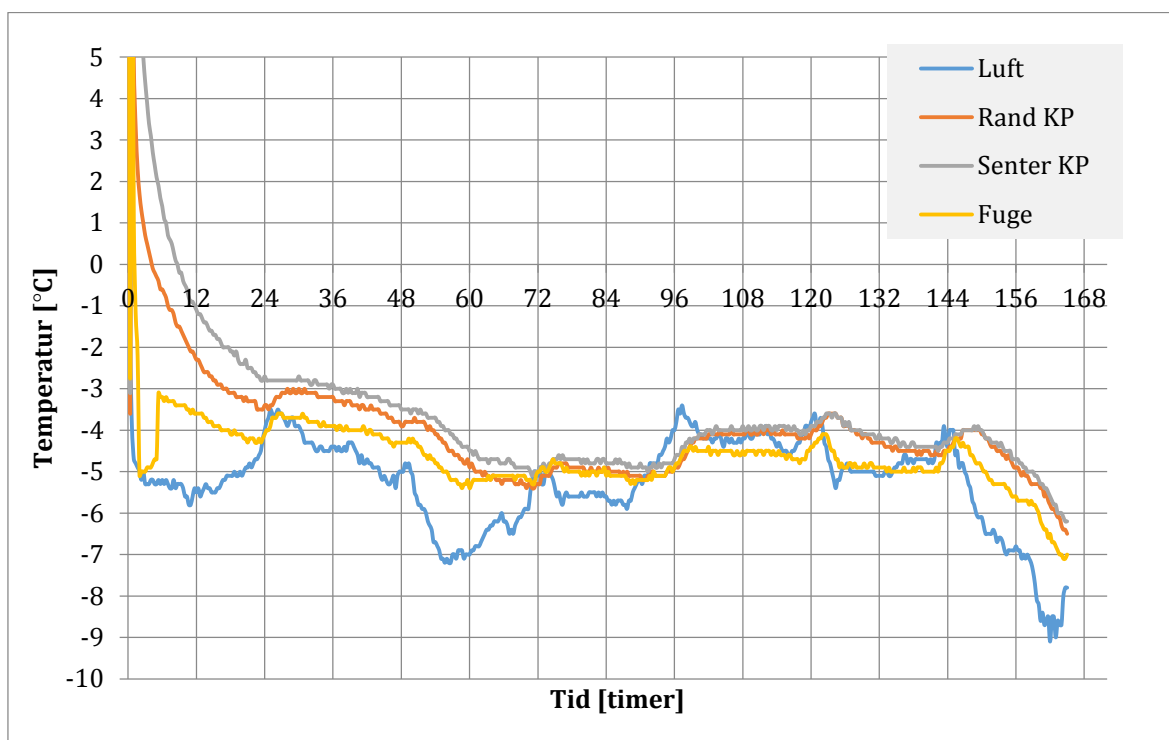
15.01.2014



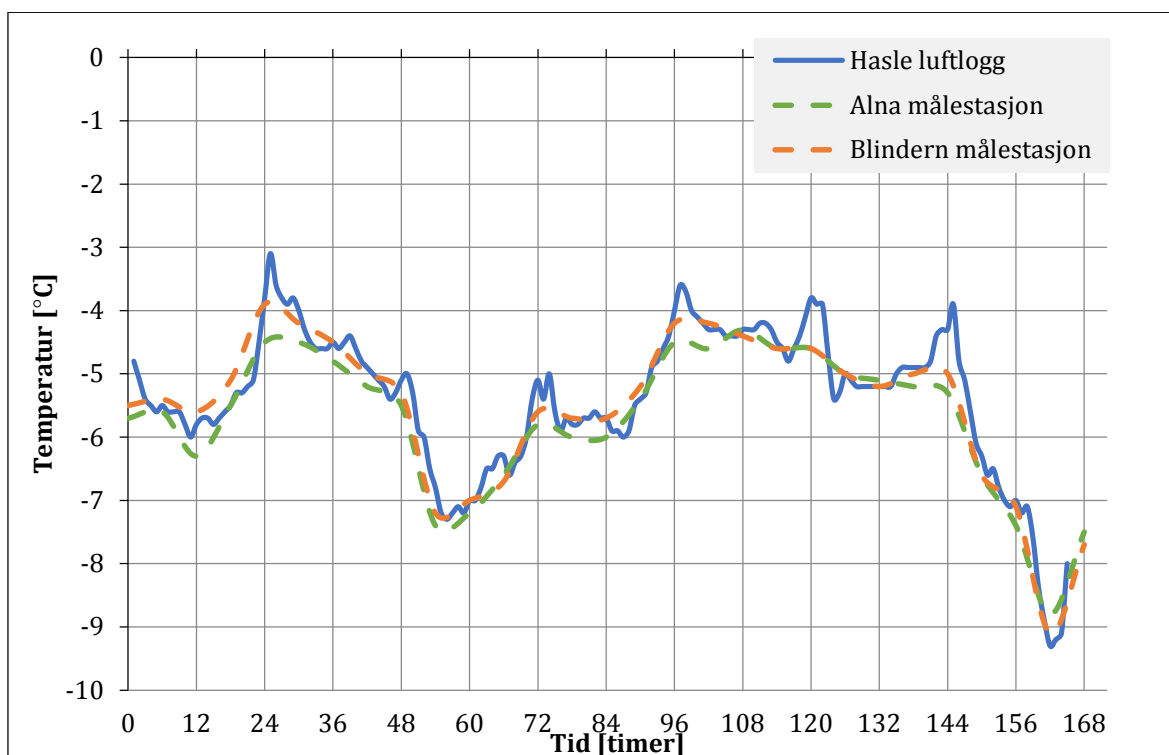
Figur C-1
Plassering av loggere på montasjeplass.



Figur C-2
176 temperaturgraf.

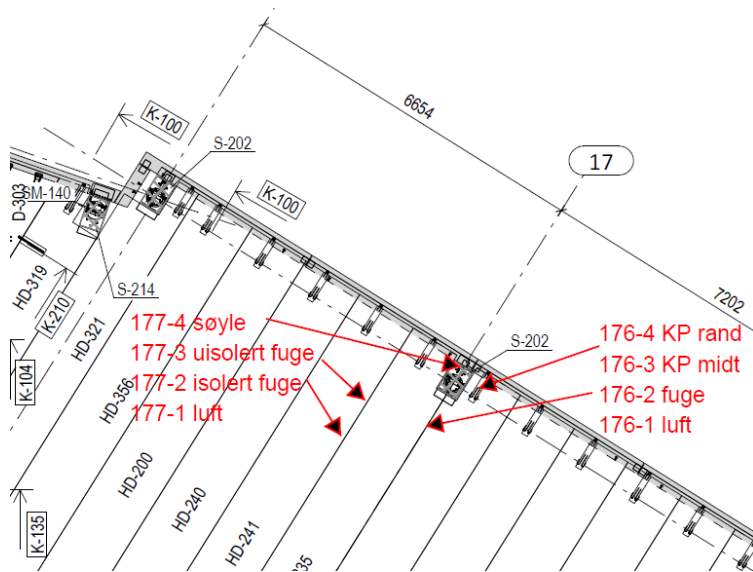


Figur C-3
177 temperaturgraf.

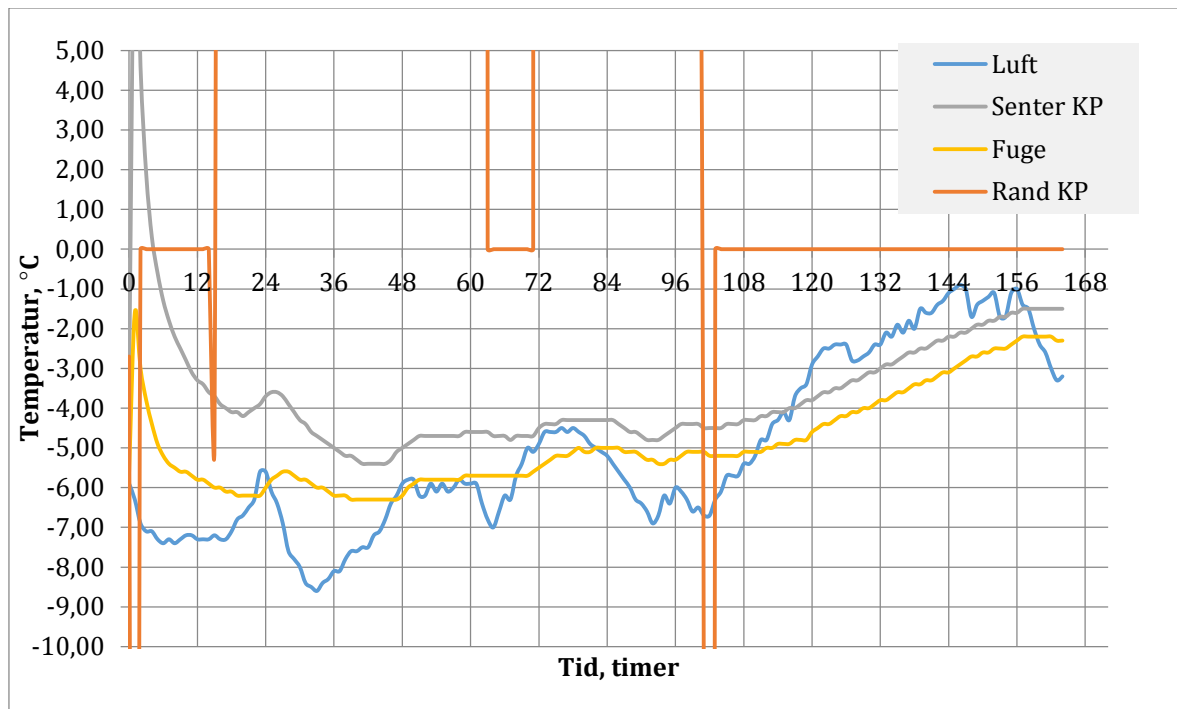


Figur C-4
176 luft og målestasjoner.

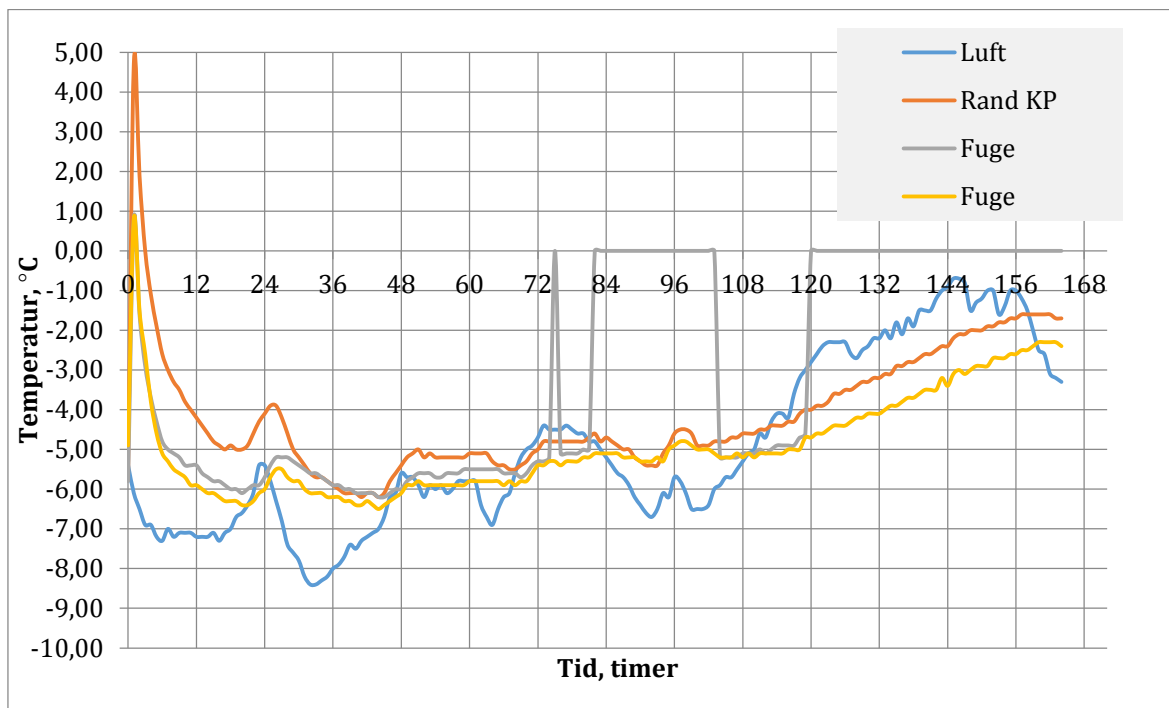
22.01.2014



Figur C-5
 Plassering av loggere på montasjeplass.



Figur C-6
 176 (kortslutning i termoelementet for Rand KP).

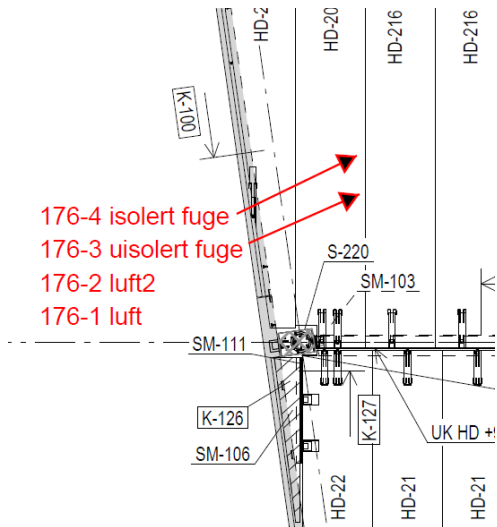


Figur C-7
 177 (kortslutning i termoelementet for fuge).

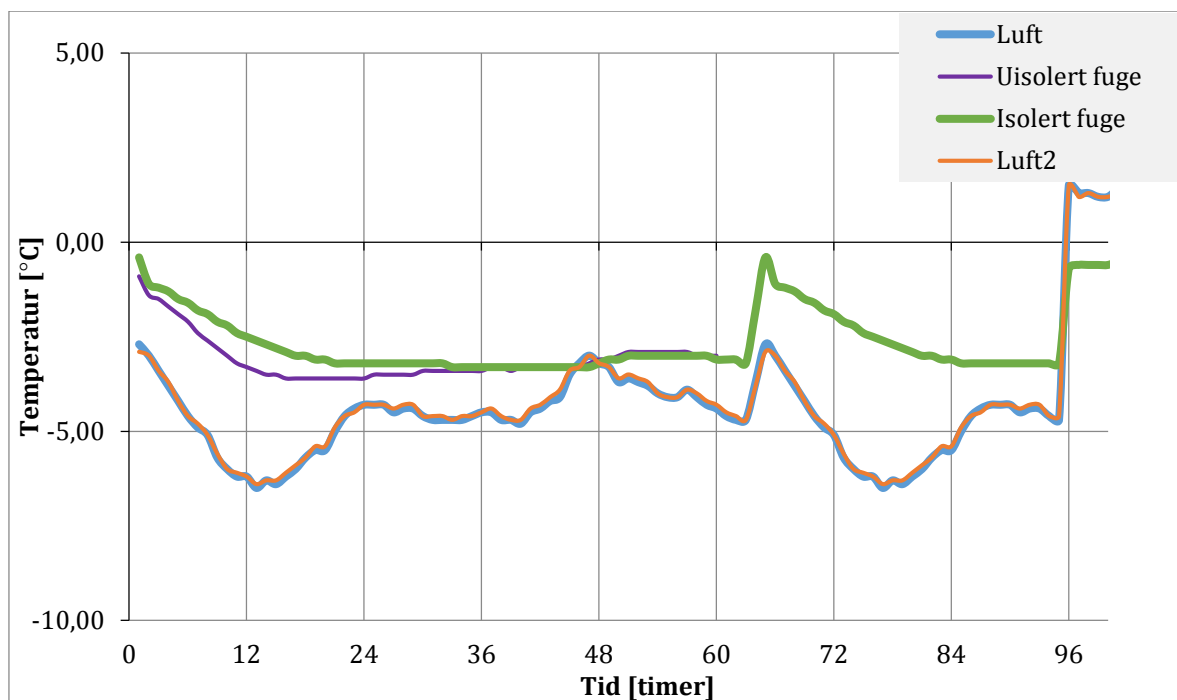
Kommentar:

Hensikten var å logge isolert og uisolert fuge. Men isolasjonsmatten ble fjernet under skraping av fugene et par timer etter fugestøpet. Isolasjonsmatten ble så plassert på feil fuge, så ingen fuger var isolerte under loggingen.

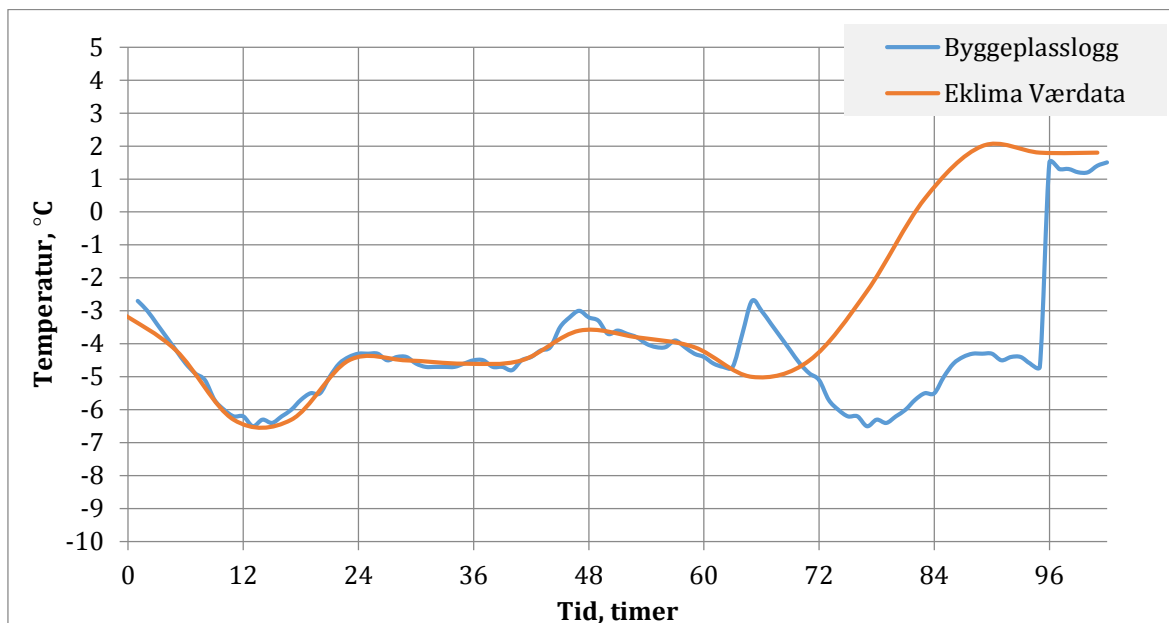
29.01.2014



Figur C-8
 Plassering av loggere på montasjeplass.



Figur C-9
 176 (instrumentet havarerte etter 4 døgn).

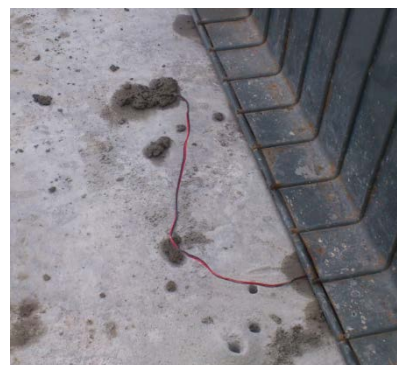
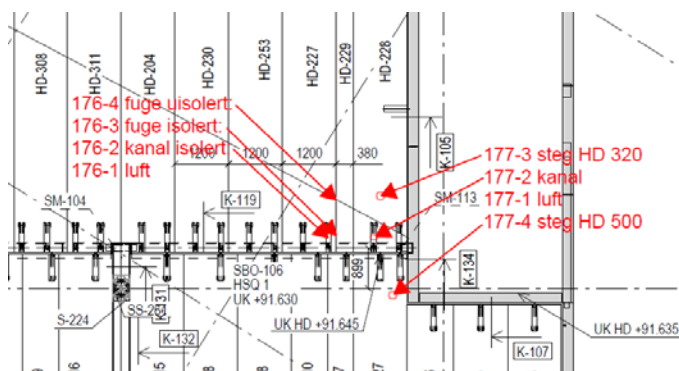


Figur C-10
176 luft og målestasjon.

Kommentar:

Apparatet lå ute i 7 døgn, men havarte etter 4 døgn. Sammenligningen med målestasjon viser at temperaturloggene ble korrupte og er ugyldige etter 60 timer.

10.02.2014



Figur C-11
Plassering av loggere på montasjeplass.

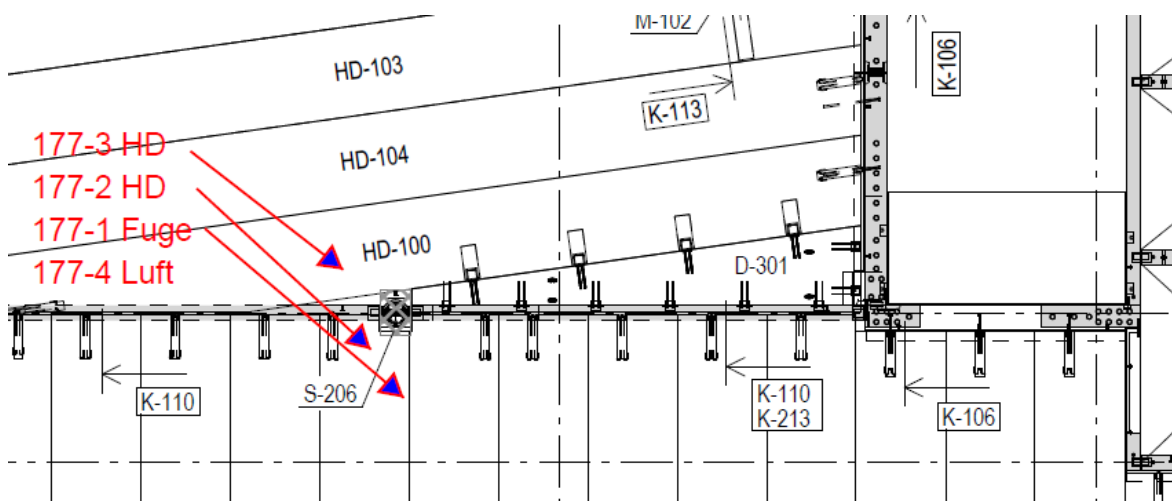
Kommentar:

Begge apparatene havarerte i løpet av loggingen og all temperaturdata ble tapt. T176 var full av kondensvann og måtte tørkes i flere døgn før den ville starte igjen.

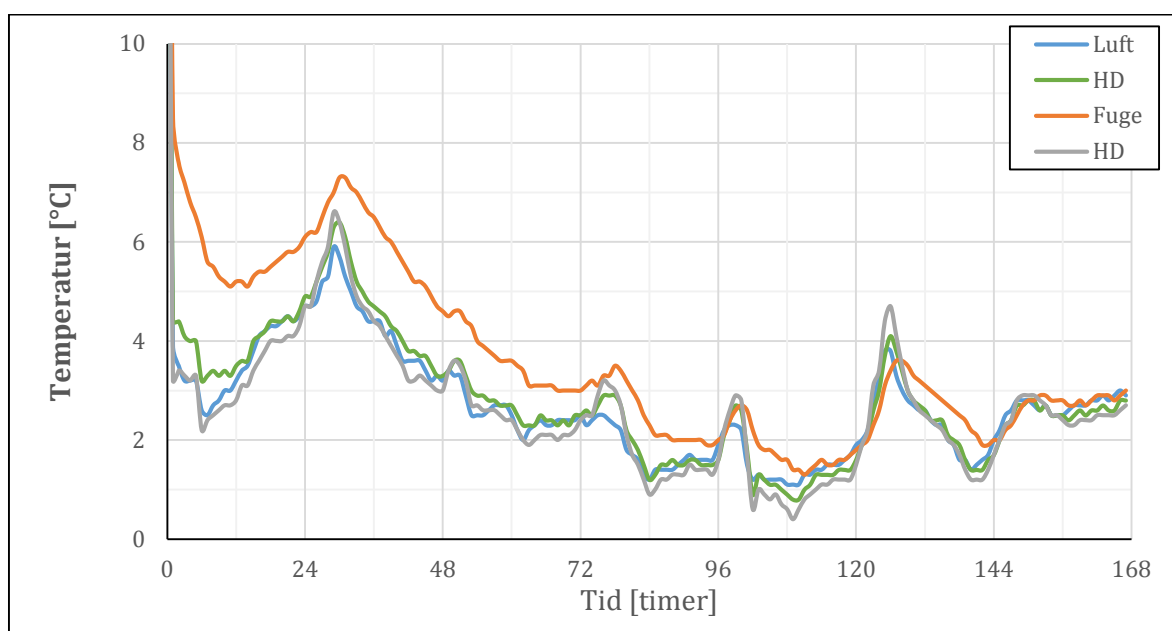


Figur C-12
Kondens på innsiden av 176 instrument.

26.02.2014



Figur C-13
Plassering av loggere på montasjeplass.



Figur C-14
177 temperaturgraf.

Kommentar:

Det ble boret i hulldekket og termoelementene ble plassert ca. 3 cm ned. Hullet ble så tettet med fugebetong.

VEDLEGG D: BLANDELOGG

Blanderapport

v. 1.14

side 1 d. 15.01.2014 kl. 17:45



Inspec.lot no.: 040003780092 Prod. id, SKAKO: 2014011520064 Antal satse: 2

Salgsordre	900010	Receipt	UV57A-B200	
Prod.ordre	102412719			
Debitorkonto	1001697			
Adresse	Contiga AS Haslevangen 16 0579 Oslo Ivar Strømdal 91171158			Ønsket temperatur 20 °C Ønsket konsistens 240 Blandemester guda Blander 001 Vognnr. 682
Fabrik	0101 Sjursøya2	Produceret (m³)	4,00	
Følgeseddel	484185	Blandedato	15.01.2014	
		Blandetidspunkt	11:34	

Sammensætning	Materialenavn	Fugt %	Densitet kg/m³	Tilsat(bør)	Blandet kg	1 m³(bør)	V.O.T.er
Pulver	Aalborg Portland CEM I 52,5 N		3.160	1.534	1.536	383	385
Pulver	Flyveaske k=1.0		2.300	404	405	101	101
Pulver	Silika støv k=2		2.200	80	82	20	21
Tilslag	0-8 Svelviksand	3,8	2.690	6.354	6.357	1.530	1.533
Additiver	Glenium SKY 615	80,0	1.050	15,52	15,58	3,88	3,90
Additiver	AntiFrost - Flytende	60,0	1.400	240,00	240,40	60,00	60,19
Additiver	Microair 100 (1:19)	99,4	1.000	6,14	6,18	1,53	1,55
Vand	Kaldt vann		1.000	271	272	126	68
Vand	Varmt vann		1.000	163	161	41	40
			Total fugt i tilslag				58
			Total kg	9.068	9.075	2.267	2.272
			Volumen (liter)	4.000	4.003	998	1.000

	Bør verdi	Målt / bereg.	
Temperatur	20		°C
Total vand	207	207,4	l/m³
Ækivalent cement målt/beregnet	525	527,0	kg/m³
Ækivalent V/C- forhold målt/beregnet	0,395	0,394	
Konsistens	240		mm
Blandetid målt/beregnet	60	61	sec
Målt luftinnhold på frisk betong	4,0		%
Wattmeter målt/beregnet			
Beregning af densitet	2267	2272	kg/m³

VEDLEGG E: BETONGRESEPTER

BETONGRESEPT: A1			Fugebetong 2% NaNO ₃				
Delmaterialer	k=	kg	vekt %		Densitet		Abs. Fukttinnhold
			pulver	liter	kg/l		
Pulver	Aalborg Rapid	1.00	460.8	96.0	145.8	3.16	
	SILIKA	2.00	19.2	4.0	8.7	2.20	
	FA	1.00	0	0.0	0.0	2.20	
		0.00	0		0.0	2.20	
			Sum pulver	100.0			
			% sement				
TSS	NatrNit 40%		24.00	5.21	17.14	1.40	60.0 %
	L1:9			0.00	0.00	1.00	99.1 %
	SP		3.00	0.65	2.86	1.05	80.0 %
			% restvolum				
Tilslag	0-8 Svelvik	<input type="text" value="Sand"/>	1670	100.0	625.1	2.67	3.3%
	8-16 Svelvik	<input type="text" value="<16m"/>	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
	8-16 Svelvik	<input type="text" value=">16m"/>	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
		<input type="text" value=">16m"/>	0	0.0	0.0	0.00	0.0%
			Sum tilslag	100.0			
LUFTINNHOOLD I FERSK BETONG			2.0		20.0		
v/(c*k+s*k+fa*k)			0.395				
VANN			197.2			1.00	
Tilsatt vann			180.4		180.4		
SUM			2357.6		1000		

BETONGRESEPT: A2			Fugebetong 2% NaNO ₃ + FA				
Delmaterialer	k=	kg	vekt %		Densitet		Fukttinnhold
			pulver	liter	kg/l		
Pulver	Aalborg Rapid	1.00	351.9	76.0	111.4	3.16	
	SILIKA	2.00	18.52	4.0	8.4	2.20	
	FA	1.00	92.6	20.0	42.1	2.20	
		0.00	0		0.0	2.20	
			Sum pulver	100.0			
			% sement				
TSS	NatrNit 40%		23.15	6.58	16.54	1.40	60.0 %
	L1:9			0.00	0.00	1.00	99.1 %
	SP G615		4.30	1.22	4.10	1.05	80.0 %
			% restvolum				
Tilslag	0-8 Svelvik	<input type="text" value="Sand"/>	1669	100.0	624.6	2.67	3.3%
	8-16 Svelvik	<input type="text" value="<16m"/>	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
	8-16 Svelvik	<input type="text" value=">16m"/>	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
		<input type="text" value=">16m"/>	0	0.0	0.0	0.00	0.0%
			Sum tilslag	100.0			
LUFTINNHOOLD I FERSK BETONG			2.0		20.0		
v/(c*k+s*k+fa*k)			0.395				
VANN			190.2			1.00	
Tilsatt vann			172.9		172.9		
SUM			2332.3		1000		

BETONGRESEPT: A3			Fugebetong 5% NaNO ₃				
Delmaterialer		k=	kg	vekt %		Densitet	
				pulver	liter	kg/l	Fuktinnhold
Pulver	Aalborg Rapid	1.00	460.8	96.0	145.8	3.16	
	SILIKA	2.00	19.2	4.0	8.7	2.20	
	FA	1.00	0	0.0	0.0	2.20	
		0.00	0		0.0	2.20	
Sum pulver:				100.0			
				% sement			
TSS	NatrNit 40%		60.00	13.02	42.86	1.40	60.0 %
	L1:9			0.00	0.00	1.00	99.1 %
	SP		3.00	0.65	2.86	1.05	80.0 %
				% restvolum			
Tilslag	0-8 Svelvik	<input type="text" value="Sand"/>	1659	100.0	621.0	2.67	4.5%
	8-16 Svelvik	<input type="text" value="<16m"/>	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
	8-16 Svelvik	<input type="text" value=">16m"/>	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
		<input type="text" value=">16m"/>	0	0.0	0.0	0.00	0.5%
Sum tilslag:				100.0			
LUFTINNHOOLD I FERSK BETONG			2.0		20.0		
v/(c*k+s*k+fa*k)			0.395				
VANN			197.2			1.00	
Tilsatt vann			158.8		158.8		
SUM			2361.0		1000		

BETONGRESEPT: A4			Fugebetong 5% NaNO ₃ + FA				
Delmaterialer		k=	kg	vekt %		Densitet: Abs.	
				pulver	liter	kg/l	Fuktinnhold
Pulver	Aalborg Rapid	1.00	351.9	76.0	111.4	3.16	
	SILIKA	2.00	18.52	4.0	8.4	2.20	
	FA	1.00	92.6	20.0	42.1	2.20	
		0.00	0		0.0	2.20	
Sum pulver:				100.0			
				% sement			
TSS	NatrNit 40%		57.88	16.45	41.34	1.40	60.0 %
	L1:9			0.00	0.00	1.00	99.1 %
	SP G615		4.30	1.22	4.10	1.05	80.0 %
				% restvolum			
Tilslag	0-8 Svelvik	<input type="text" value="Sand"/>	1658	100.0	620.7	2.67	4.5%
	8-16 Svelvik	<input type="text" value="<16m"/>	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
	8-16 Svelvik	<input type="text" value=">16m"/>	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
		<input type="text" value=">16m"/>	0	0.0	0.0	0.00	0.5%
Sum tilslag:				100.0			
LUFTINNHOOLD I FERSK BETONG			2.0		20.0		
v/(c*k+s*k+fa*k)			0.395				
VANN			190.2			1.00	
Tilsatt vann			152.0		152.0		
SUM			2335.6		1000		

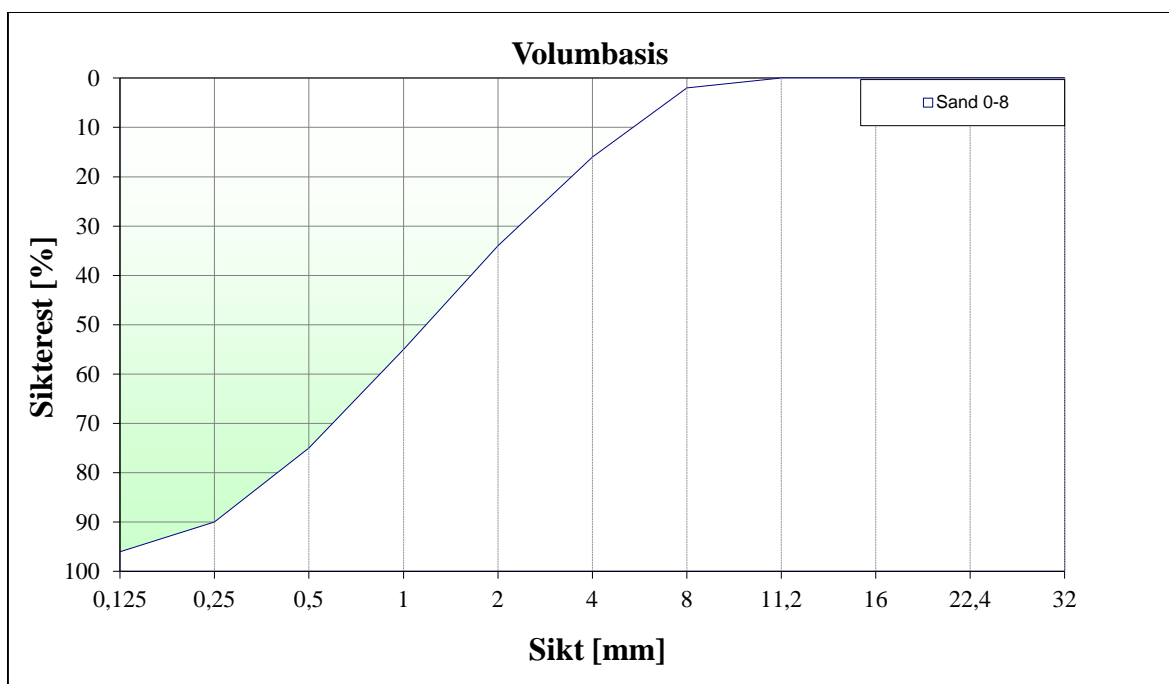
BETONGRESEPT: A5 & B1		Fugebetong 8% NaNO ₃					
Delmaterialer	k=	kg	vekt %		Densitet	Abs.	
			pulver	liter	kg/l	Fukttinnhold	
Pulver	Aalborg Rapid	1.00	460.8	96.0	145.8	3.16	
	SILIKA	2.00	19.2	4.0	8.7	2.20	
	FA	1.00	0	0.0	0.0	2.20	
		0.00	0		0.0	2.20	
Sum pulver			100.0				
			100.0				
TSS	NatrNit 40%		96.00	20.83	68.57	1.40	60.0 %
	L1:9			0.00	0.00	1.00	99.1 %
	SP		3.00	0.65	2.86	1.05	80.0 %
			100.0				
Tilslag	0-8 Svelvik	Sand	1648	100.0	616.8	2.67	4.5%
	8-16 Svelvik	<16m	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
	8-16 Svelvik	>16m	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
		>16m	0	0.0	0.0	0.00	0.5%
	Sum tilslag			100.0			
LUFTINNHOOLD I FERSK BETONG			2.0		20.0		
v/(c*k+s*k+fa*k)			0.395				
VANN			197.2			1.00	
Tilsatt vann			137.2		137.2		
SUM			2364.4		1000		

BETONGRESEPT: A6 & B2		Fugebetong 8% NaNO ₃ + FA					
Delmaterialer	k=	kg	vekt %		Densitet	Abs.	
			pulver	liter	kg/l	Fukttinnhold	
Pulver	Aalborg Rapid	1.00	351.9	76.0	111.4	3.16	
	SILIKA	2.00	18.52	4.0	8.4	2.20	
	FA	1.00	92.6	20.0	42.1	2.20	
		0.00	0		0.0	2.20	
Sum pulver			100.0				
			100.0				
TSS	NatrNit 40%		92.60	26.32	66.14	1.40	60.0 %
	L1:9			0.00	0.00	1.00	99.1 %
	SP G615		4.30	1.22	4.10	1.05	80.0 %
			100.0				
Tilslag	0-8 Svelvik	Sand	1648	100.0	616.7	2.67	4.5%
	8-16 Svelvik	<16m	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
	8-16 Svelvik	>16m	0	0.0	0.0	2.69	0.0%
		>16m	0	0.0	0.0	0.00	0.5%
	Sum tilslag			100.0			
LUFTINNHOOLD I FERSK BETONG			2.0		20.0		
v/(c*k+s*k+fa*k)			0.395				
VANN			190.2			1.00	
Tilsatt vann			131.2		131.2		
SUM			2338.9		1000		

VEDLEGG F: SIKTEKURVE

Tabell F-1
 Siktrest.

SAND	0-8 Svelvik
Densitet	2672
32	0
22.4	0
16	0
11.2	0
8	2
4	16
2	34
1	55
0.5	75
0.25	90
0.125	96
FM	3.20



Figur F-1
 Siktterve.

VEDLEGG G: PRODUKTBLADER



Typiske egenskapsverdier – September 2013

RAPID® cement / RAPID® AALBORG CEMENT®

1. halvår 2013

RAPID® cement er certificeret hos Bureau Veritas Certification med certifikat nr. 0615-CPR-9806 og cementbetegnelsen CEM I 52,5 N (LA). CE-mærket er angivet på den tilhørende deklarasjon.

Fysiske egenskaber

Trykstyrke (EN 196-1)		
1 døgn	MPa	24
2 døgn	MPa	36
7 døgn	MPa	53
28 døgn	MPa	67
Begyndende afbinding	min	137
Ekspansjon	mm	0,5
Finhed	m ² /kg	466
Refleksjon, (DIN 5033)	%	32
Absolut densitet	kg/m ³	3130
Bulkdensitet	kg/m ³	1100
Varmeudvikling Q ₀	kJ/kg	357
Alfa		1,03
Tau	timer	16

Bogue-sammensætning for klinker

C ₃ S	%	62
C ₂ S	%	13
C ₃ A	%	8
C ₄ AF	%	12

Sekundære komponenter og tillsætninger

SO ₃	%	3,2
MgO	%	1,0
Ækv. Na ₂ O	%	0,6
Cl ⁻	%	0,03
Glødetab	%	2,7
Uopløselig rest	%	0,7
Vandopløseligt Cr ⁶⁺	mg/kg	≤ 2





The Chemical Company

NATRIUMNITRAT, 40%

April 2009

FRYSEPUNKTNEDSETTENDE TILSETNINGSSTOFF TIL PRODUKSJON AV ALLE
TYPER BETONG OG MØRTLER.

Tekniske data:

Konsistens:	Væske.	pH-verdi:	8,5 ± 0,5.
Farge:	Fargløs.	Ekvivalent Na₂O:	< 20%.
Tørrestoff:	40%±2,5%.	Kloridinnhold:	< 0,01%.
Densitet:	1400 kg/m ³ ± 30.		

Produktbeskrivelse.

Natriumnitrat er et kloridfritt frysepunkt-
nedsettende tilsetningsstoff.
Natriumnitrat gir fasthetsutvikling ned til
-15° C uten oppvarming av betongen.
Tilsetningsstoffet er kloridfritt. Natriumnitrat
virker på den måten at betongens/
mørtelens vann ikke fryser.
Hydratiseringsprosessen kan fortsette fordi
fritt vann er tilgjengelig.

Bruksområder.

Natriumnitrat anvendes til produksjon av
alle typer betong og mørtler. Typiske
bruksområder er: mørtler til fuging av
betongelementer, samt jordfuktig betong til
setting av stein om vinteren.

Egenskaper og fordeler.

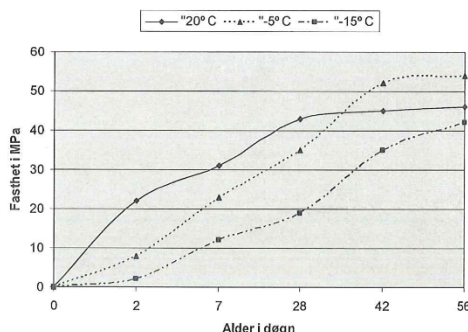
Natriumnitrat gir følgende fordeler:

- Arbeidet kan utføres ved lave
temperaturer uten tilførsel av varme.
- Sparer kostnader til oppvarming.
- Fasthetsutvikling ved minusgrader

Fasthetspotensiale.

Eksempelet viser en finsats med 400kg
sement som er tilsatt 12,5% Natriumnitrat,
40%. For å få frem fasthetspotensialet er
alle prøver lagret i +20°C etter 28 døgn.

BASF Construction Chemicals Norway
Granerud Industriområde, NO-2120 Sagstua
T +47 62 97 00 20
F +47 62 97 18 85
www.basf-cc.no



Dosering.

Alminnelig anbefalt doseringsmengde ligger
på 12,5% av sementmengden ned til
-10° C. Ved temperaturer ned til -15° C
benyttes 20% av sementmengden.

Bruksanvisning.

Natriumnitrat er klar til bruk og tilsettes
betongblandingen som en separat
komponent.
For å oppnå optimalt resultat, anbefales det
å tilsette sammen med blandevannet eller
når alle materialer er våte.
Unngå tilsetning av Natriumnitrat, 40% i
tørre materialer.

Adding Value to Concrete



MasterGlenium SKY 615

Tidligere: GLENIUM® SKY 615

Mai 2012

SUPERPLASTISERENDE TILSETNINGSSTOFF TIL PRODUKSJON AV ALLE TYPER BETONG.

Tekniske data			
Konsistens:	Viskøs væske	pH- verdi:	5,5 ± 1,5
Farge:	Lys brun	Ekvivalent Na ₂ O:	< 1,0 %
Tørrestoff:	19,6 % ± 1,0	Kloridinnhold:	< 0,01 %
Densitet:	1,05 ± 0,02 kg/l		

PRODUKT BESKRIVELSE

MasterGlenium SKY 615 er et superplastiserende tilsetningsstoff basert på polykarboxylater (PCE). MasterGlenium SKY 615 er primært utviklet til bruk ved produksjon av ferdigbetong. Den gir en forsinkelse i absorpsjonen på sementpartiklene og dispergerer dermed effektivt. Sammenlignet med andre PCE-produkter, er det mulig å oppnå høykvalitetsbetong med lang brukstid uten at herdeprosessen forsinkes.

Total Performance Control konseptet sikrer at betongprodusenter, entreprenører og byggherrer får en betong som er av samme høye kvalitet som opprinnelig spesifisert.

BRUKSOMRÅDER

MasterGlenium SKY 615 kan anvendes til produksjon av alle typer betong, men designet for de mest pulverrike betongene.

EGENSKAPER

- MasterGlenium SKY 615 gir følgende fordeler:
- Høy plastiserende effekt.
 - Gir betongen liten seighet.
 - Lang brukstid.
 - Lite konsistenstap over de første 90 minutter.
 - Rask størkning og herding.
 - Rask innblandingstid

DOSERING

Alminnelig anbefalt doseringsmengde av MasterGlenium SKY 615 ligger på 0,5 – 1,5 % av sementmengden. Best effekt ved dosering ≥ 0,65 % av sementvekten.

BRUKSANVISNING

MasterGlenium SKY 615 er klar til bruk og tilsettes betongblandingen som en separat komponent. For å oppnå optimalt resultat, anbefales det å tilsette MasterGlenium SKY 615 sammen med blandevannet eller når alle materialer er våte. Unngå tilsetning av MasterGlenium SKY 615 i tørre materialer.

KOMPATIBILITET

Kan benyttes sammen BASF AS sine tilsetningsstoffer etter henvisning fra BASF AS sitt personale. I tilfelle med optimering av spesielle krav kan anvendelse av følgende kompatible produkter anbefales:

- RheoMatrix 101 for fremstilling av betong med enda bedre stabilitet.
- Luftinnførende tilsetningsstoff Micro Air 100 eller Amex 11 for å forbedre fryse/tine motstand.
- X-SEED akselerator for høyere tidlig- fasthet.
- Pozzolith 433R for retardering av betongblandingen.

FORPAKNING

- Leveres i 1000 liters pallettank.
- Bulk.

LAGRING

Produktet skal oppbevares i tett lukket beholder ved temperaturer mellom +5 °C og +30 °C. Holdbarheten er 12 mnd. Omrøring anbefales.

SIKKERHETSTILTAK

Se eget hms datablad.



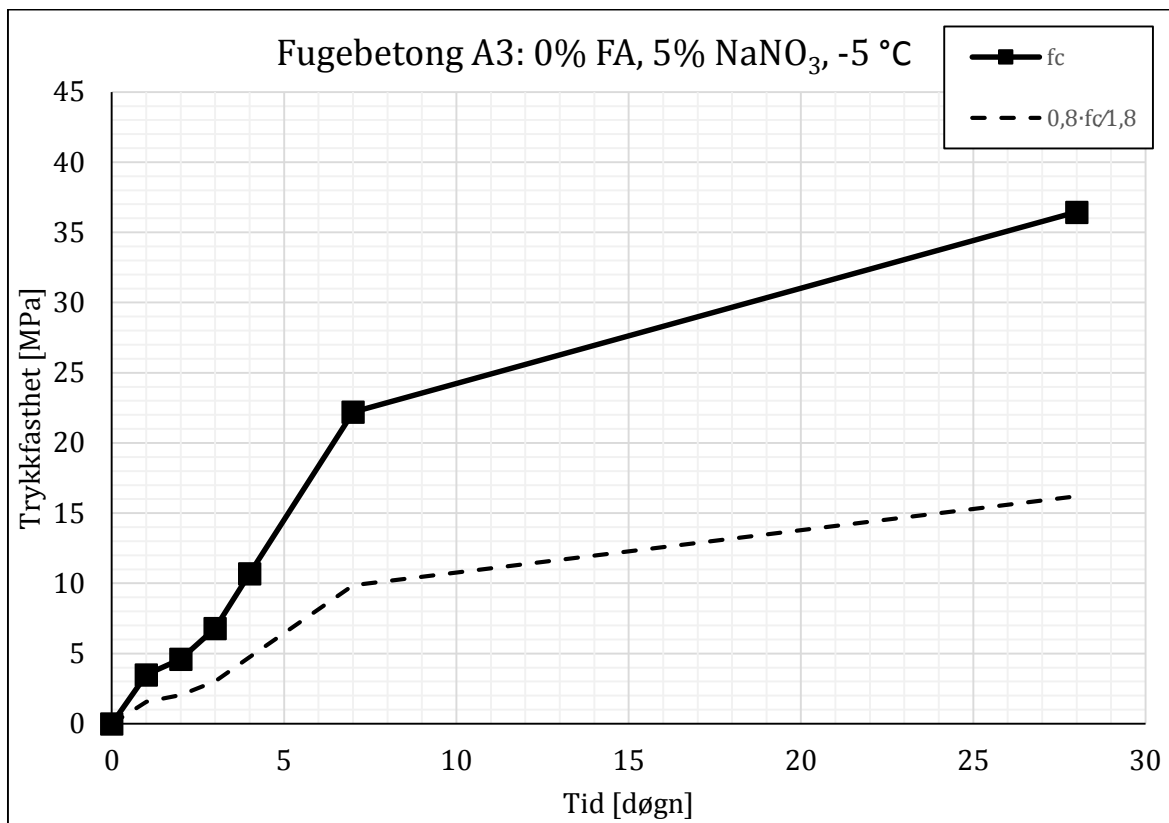
VEDLEGG H: TRYKKFASTHETER

2% NaNO₃		
Temperatur -5 °C		
A1	FA = 0%	
A2	FA = 20%	
Døgn	f _{c,cube} [MPa]	
	A1	A2
1	1.9	2.2
2	7.7	7.1
3	12.2	12.1
4	17.3	16.0
7	22.9	19.5
14	27.6	27.1
21	31.0	29.0

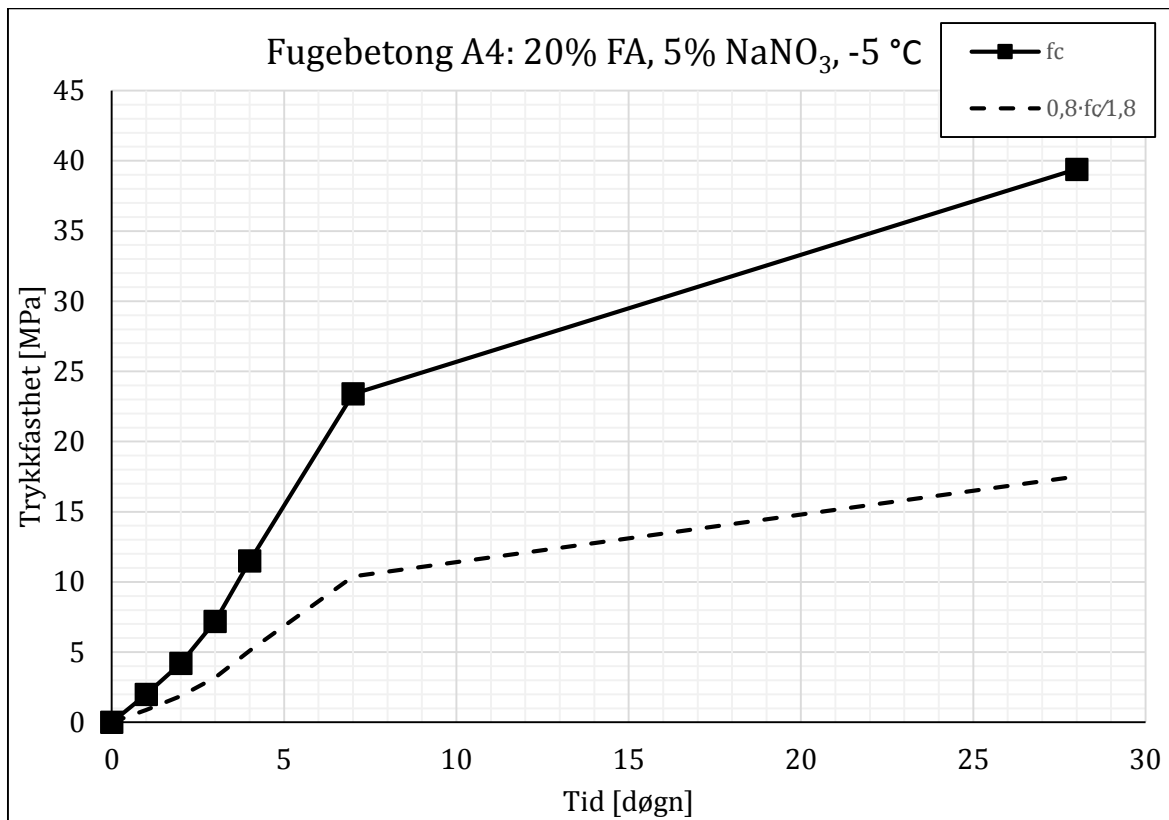
8% NaNO₃		
Temperatur -10 °C		
B1	FA = 0%	
B2	FA = 20%	
Døgn	f _{c,cube} [MPa]	
	A1	A2
1	2.2	0.5
2	3.2	0.9
3	5.2	1.7
4	8.7	3.6
6	14.5	4.3
7	16.5	5.4
28	33.2	15.2

5% NaNO₃		
Temperatur -5 °C		
A3	FA = 0%	
A4	FA = 20%	
Døgn	f _{c,cube} [MPa]	
	A1	A2
1	3.5	2.0
2	4.6	4.2
3	6.8	7.2
4	10.7	11.5
7	22.2	23.4
28	36.5	39.4

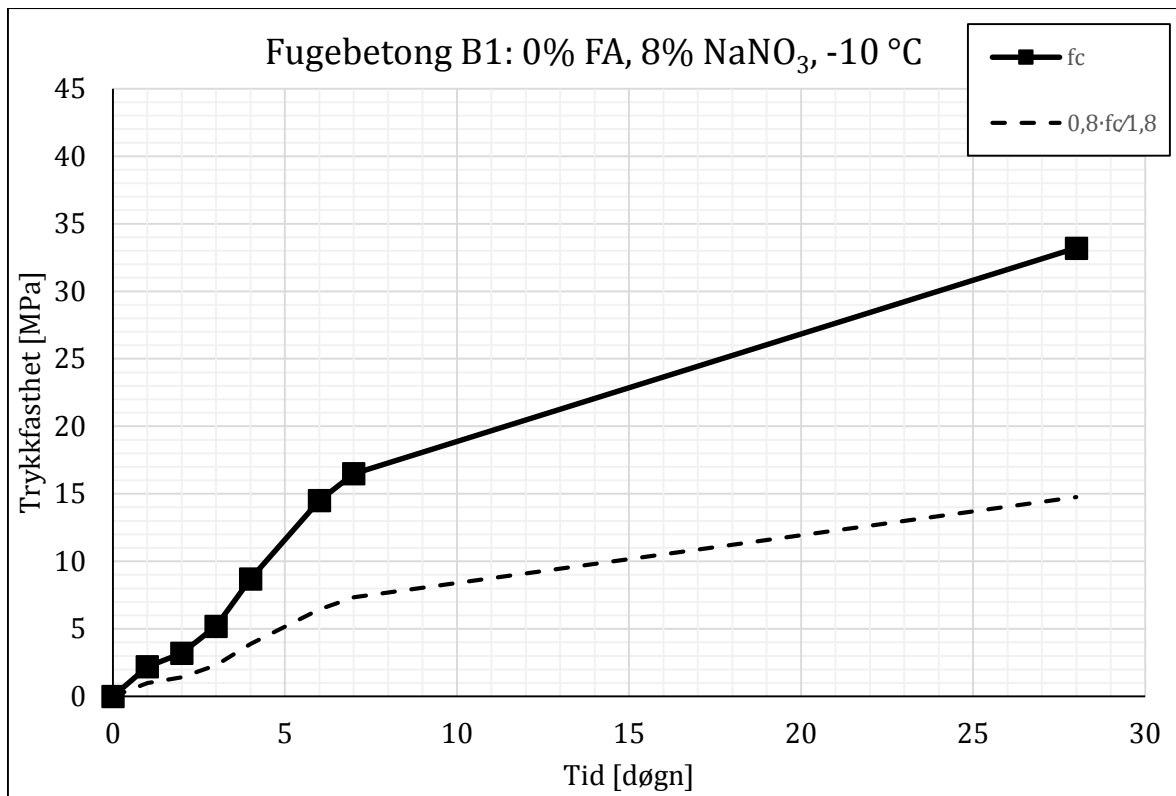
8% NaNO₃		
Temperatur -5 °C		
A5	FA = 0%	
A6	FA = 20%	
Døgn	f _{c,cube} [MPa]	
	A1	A2
1	0.7	0.6
2	4.0	3.4
3	7.6	7.6
4	12.3	9.6
7	19.0	15.8
14	24.0	19.5



Figur H-1
Fasthetskurve for fugebetong resept A3 med 5% NaNO₃.



Figur H-2
Fasthetskurve for fugebetong resept A4 med 5% NaNO₃ + 20% FA.



Figur H-3
Fasthetskurve for fugebetong resept B1 med 8% NaNO₃.

VEDLEGG I: FEM-SIMULERING AV TEMPERATUR

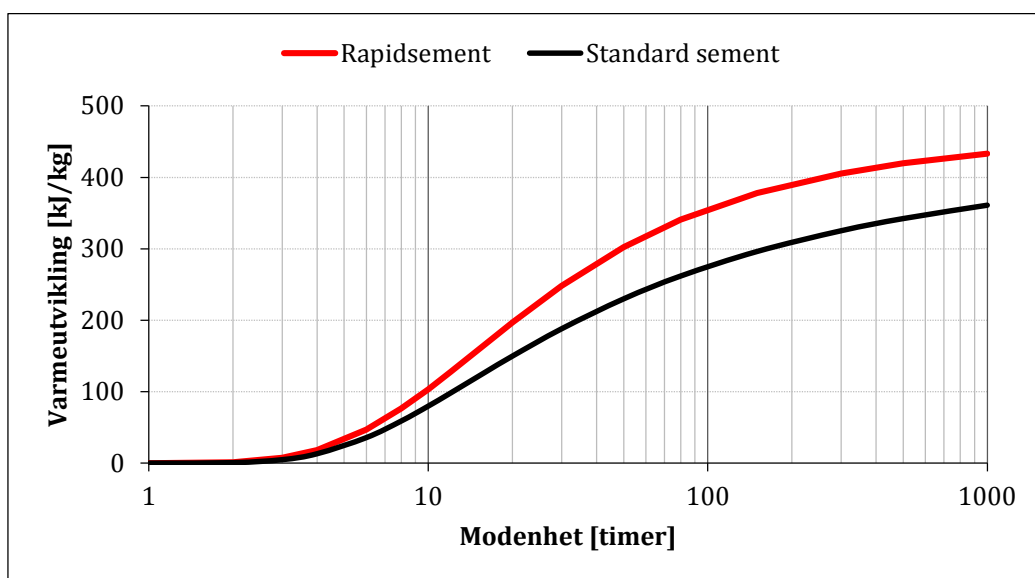
Vindhastighet: 0 m/s

Sementens starttemperatur: 15 °C

Tabell I-1

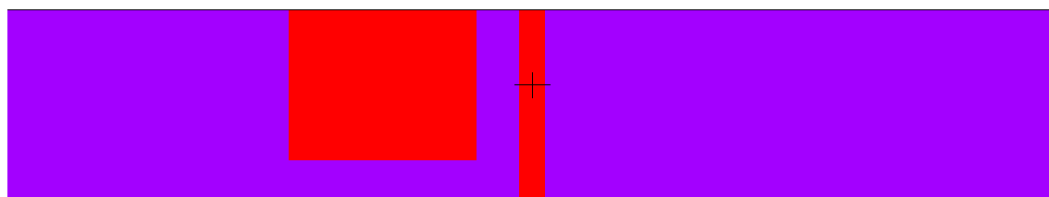
Referanseparametere for standard portlandsement og rapidsement.

Parameter	Standard sement	Rapidsement
W_c	500 kJ	500 kJ
λ_1	1,900	0,379
t_1	5,52 timer	47,40 timer
κ_1	1,070	0,862



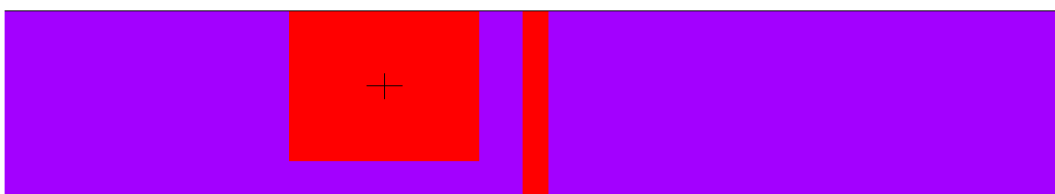
Figur I-1

Varmeutviklingskurve.



Figur I-2

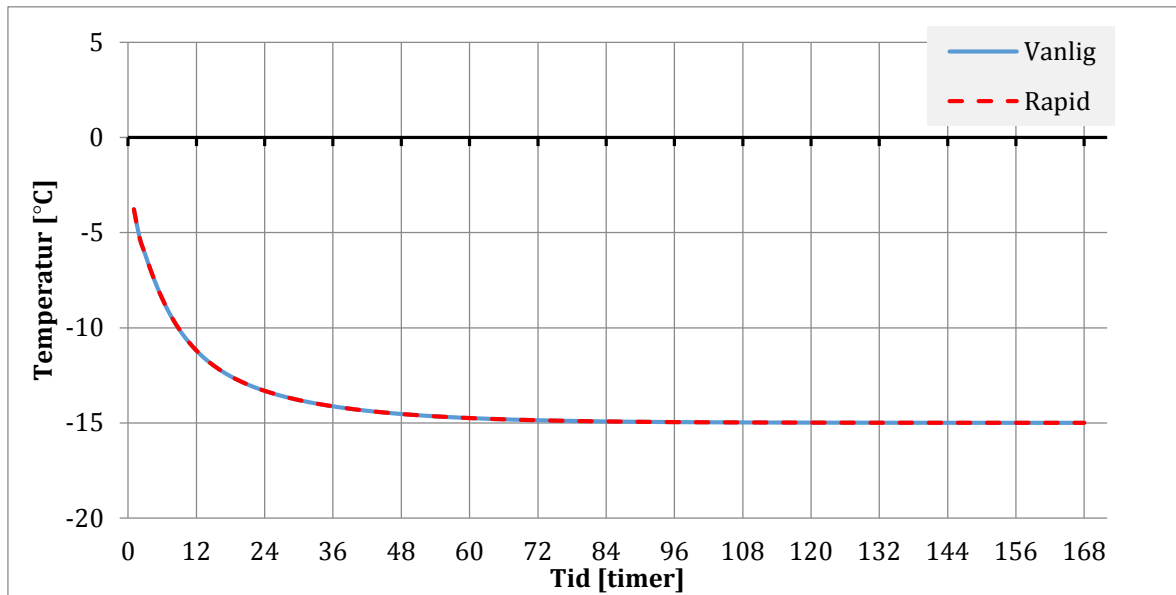
Målepunkt i skjærfuge.



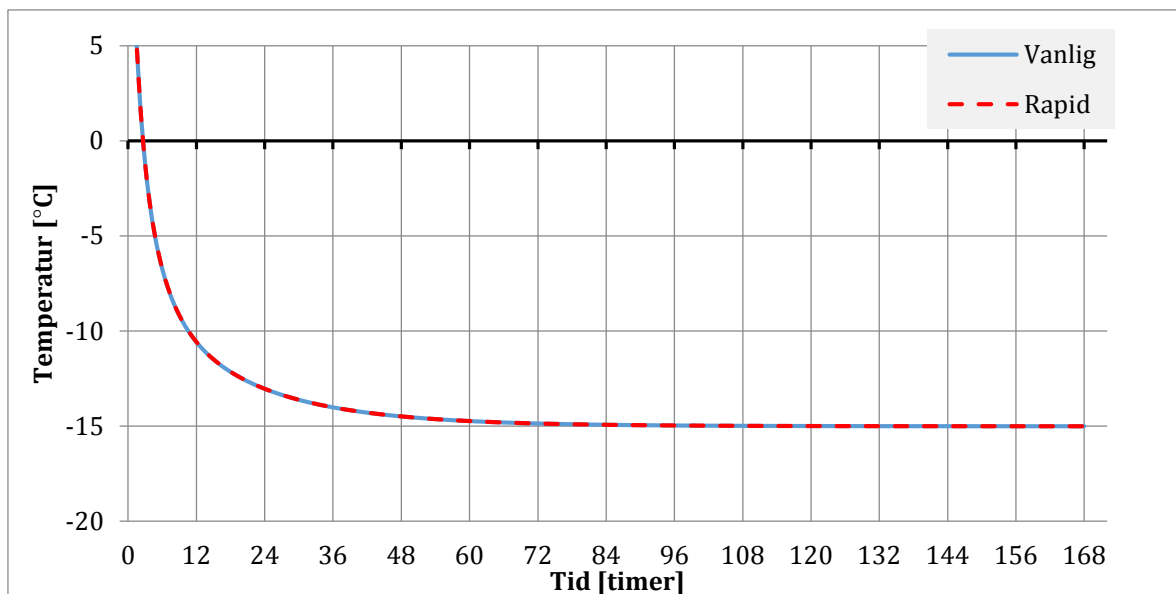
Figur I-3

Målepunkt i kanal.

Konstant lufttemperatur -15 °C.

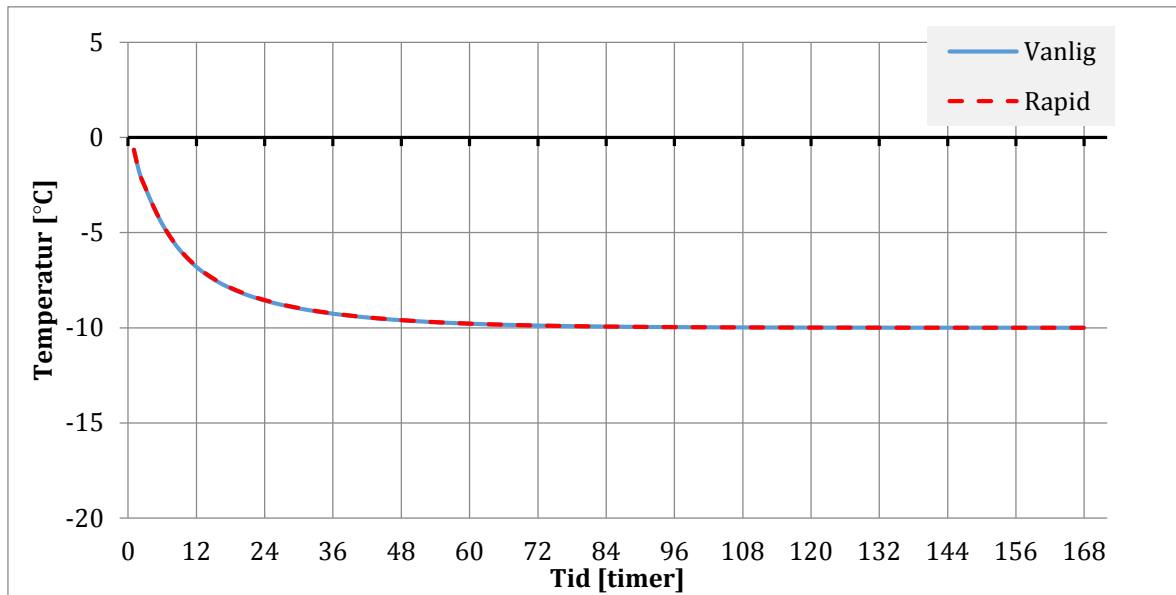


Figur I-4
Simulering av temperatur i skjærfuge ved -15 °C.

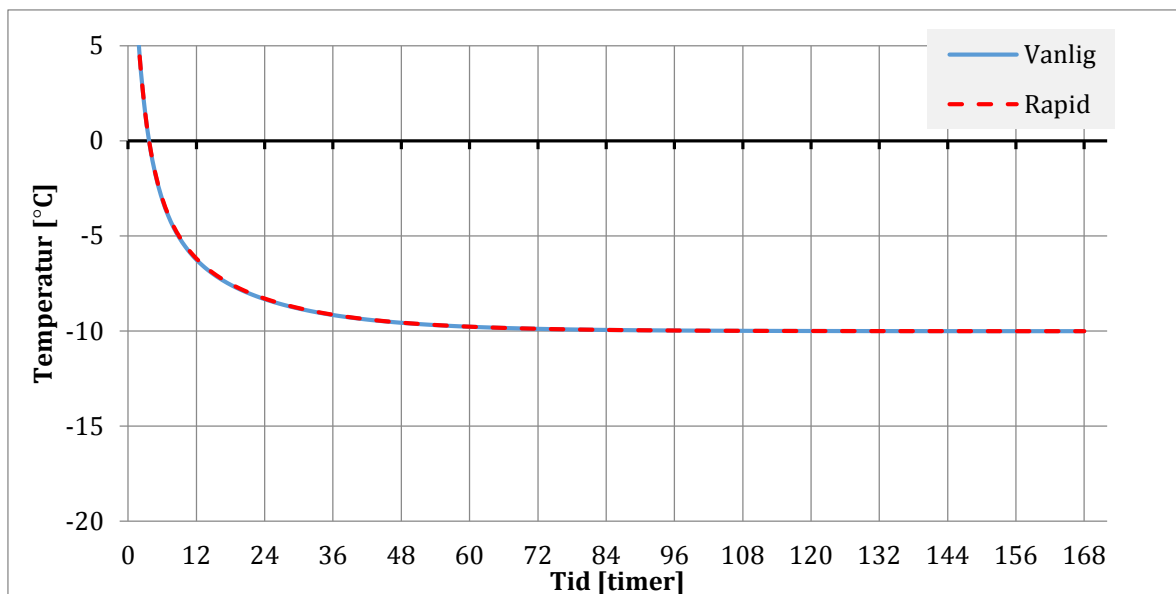


Figur I-5
Simulering av temperatur i kanal ved -15 °C.

Konstant lufttemperatur -10 °C.

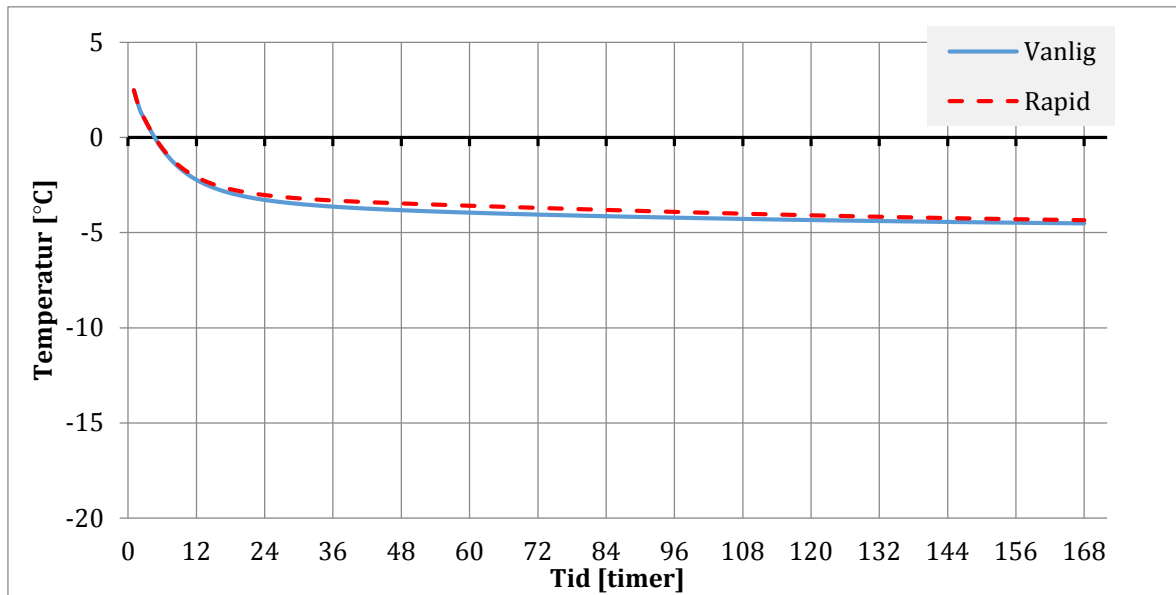


Figur I-6
Simulering av temperatur i skjærfuge ved -10 °C.

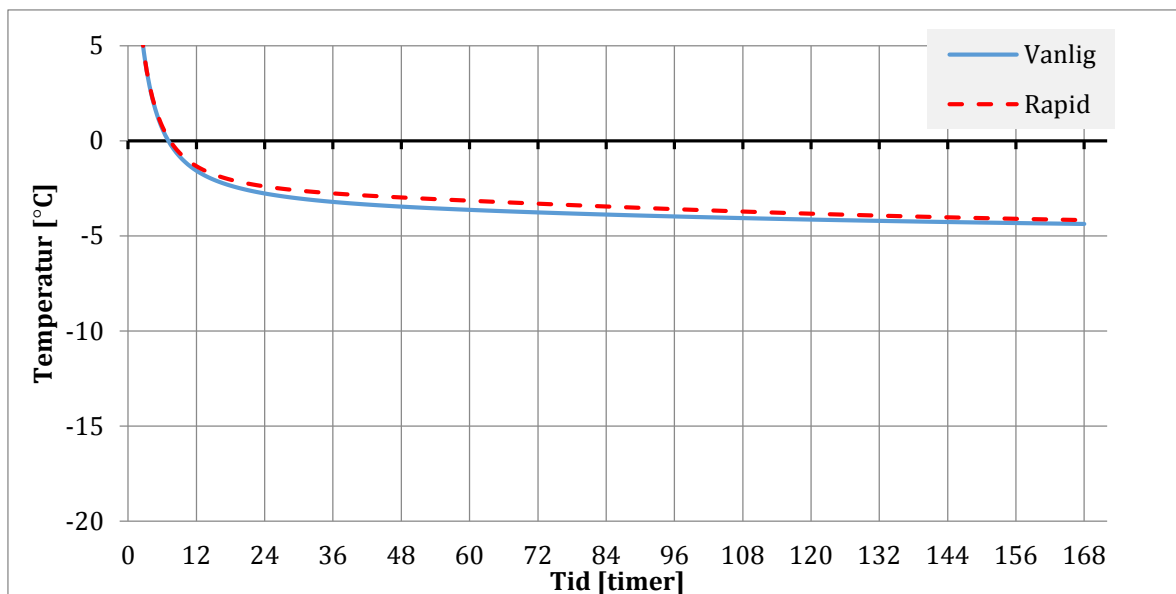


Figur I-7
Simulering av temperatur i kanal ved -10 °C.

Konstant lufttemperatur -5 °C.

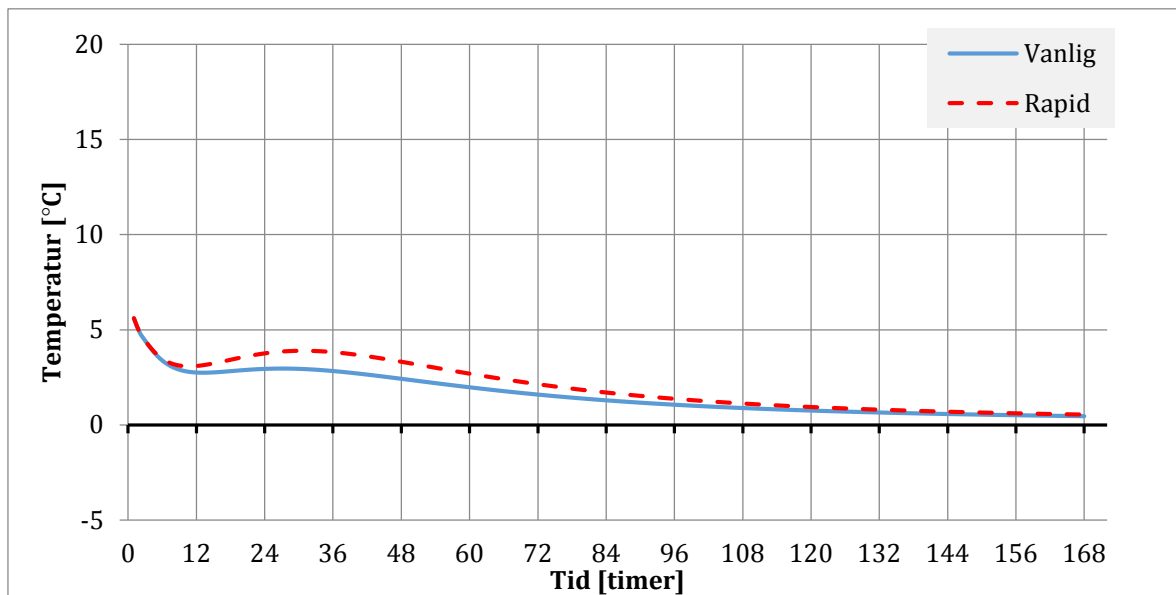


Figur I-8
Simulering av temperatur i skjærfuge ved -5 °C.

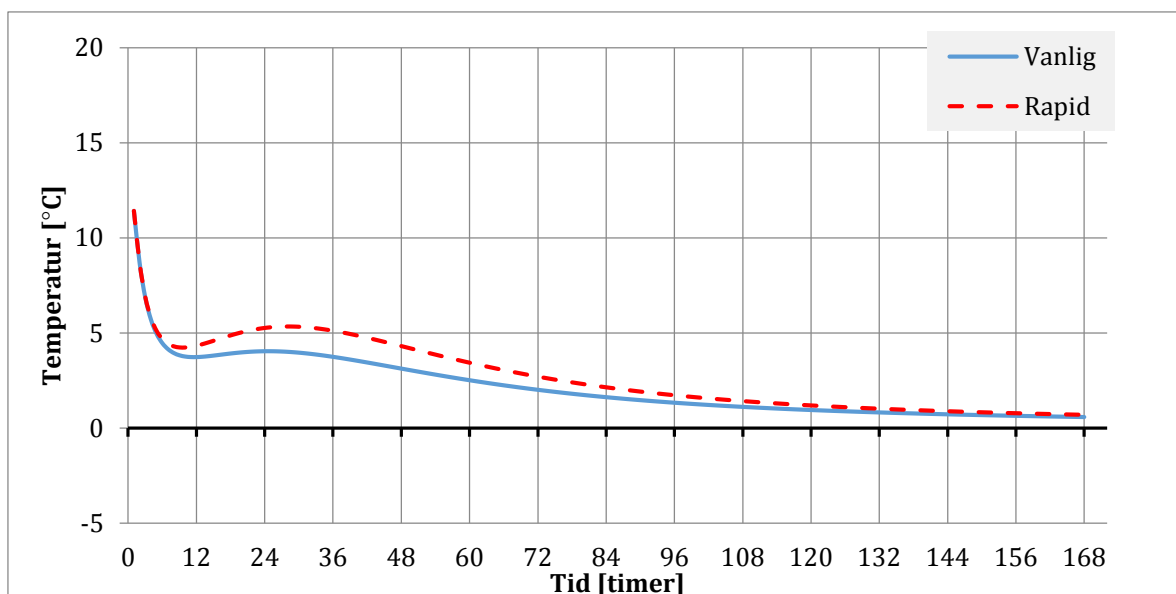


Figur I-9
Simulering av temperatur i kanal ved -5 °C.

Konstant lufttemperatur 0 °C.

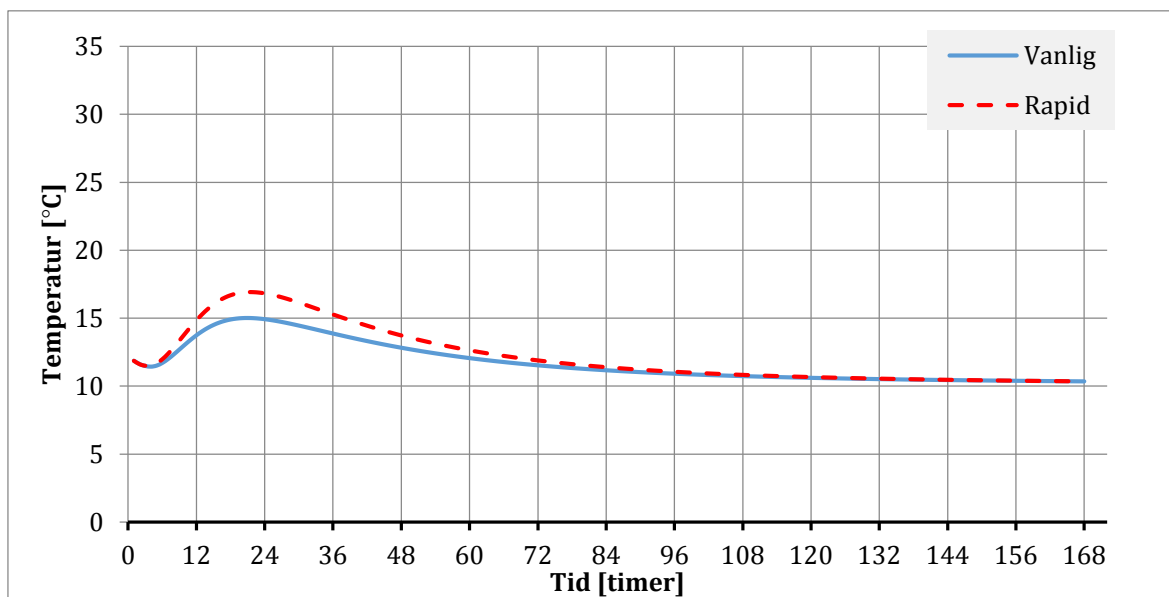


Figur I-10
Simulering av temperatur i skjærfuge ved 0 °C.

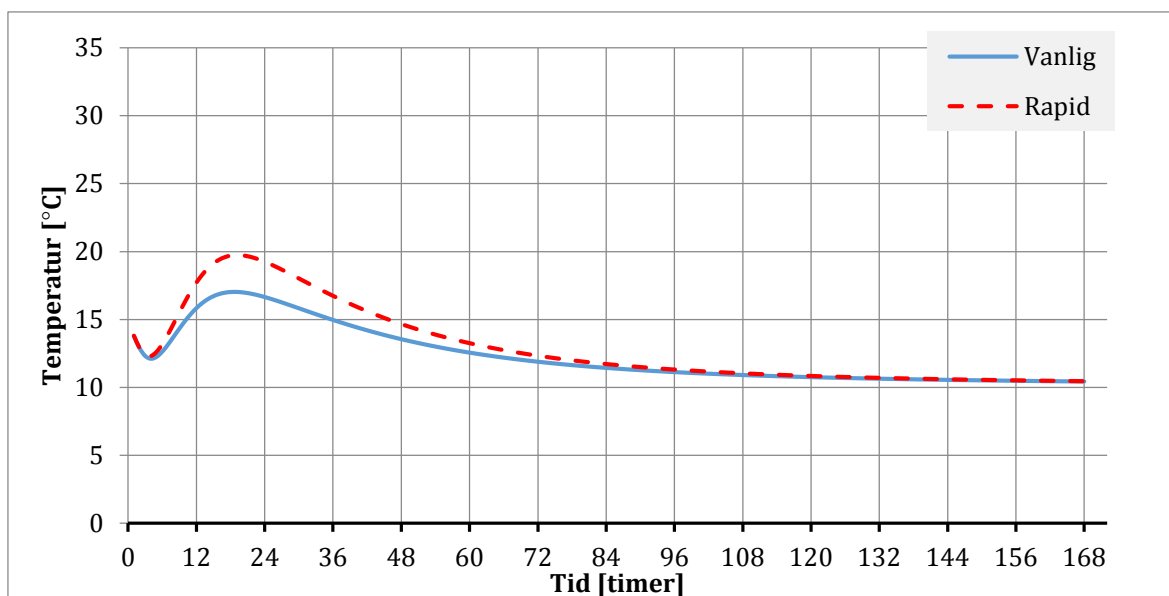


Figur I-11
Simulering av temperatur i kanal ved 0 °C.

Konstant lufttemperatur 10 °C.

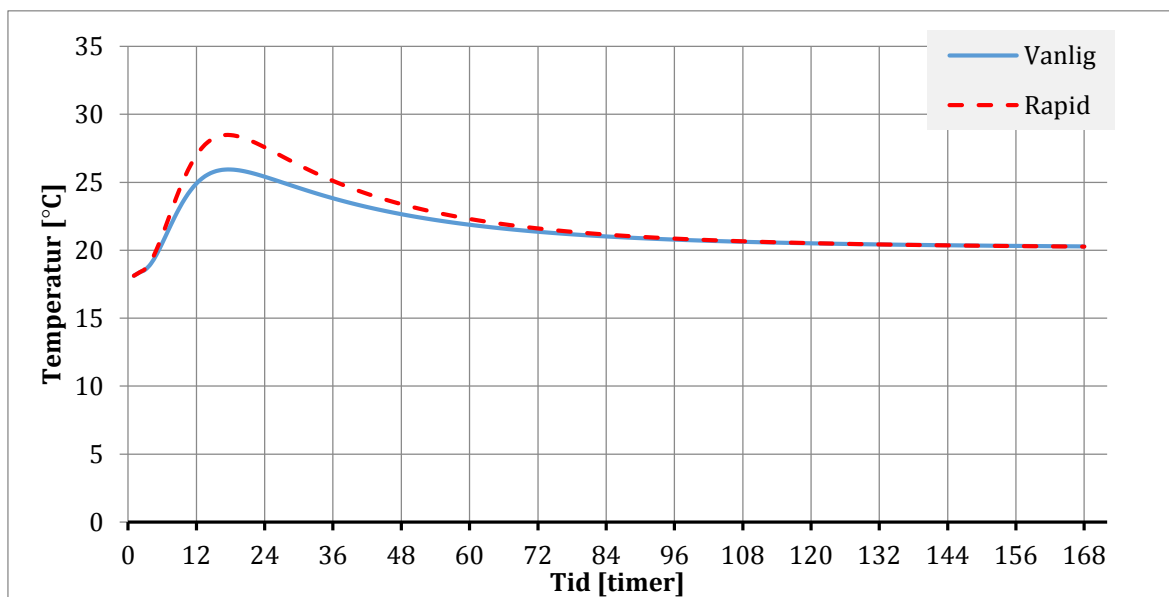


Figur I-12
Simulering av temperatur i skjærfuge ved 10 °C.

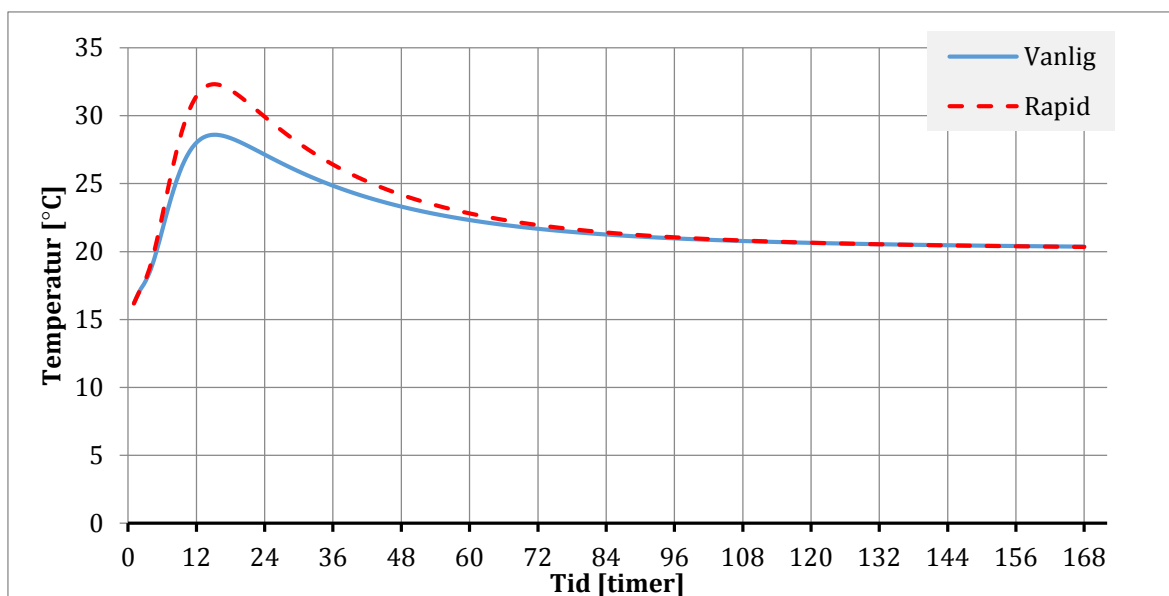


Figur I-13
Simulering av temperatur i kanal ved 10 °C.

Konstant lufttemperatur 20 °C.



Figur I-14
Simulering av temperatur i skjærfuge ved 20 °C.



Figur I-15
Simulering av temperatur i kanal ved 20 °C.



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no