

Praktiske råd og tiltak mot fastholdingsriss i herdende betongkonstruksjoner

WP 1.1 Crack risk assessment of concrete structures at early ages

Author(s)

Øyvind Bjøntegaard, Statens vegvesen (red.)

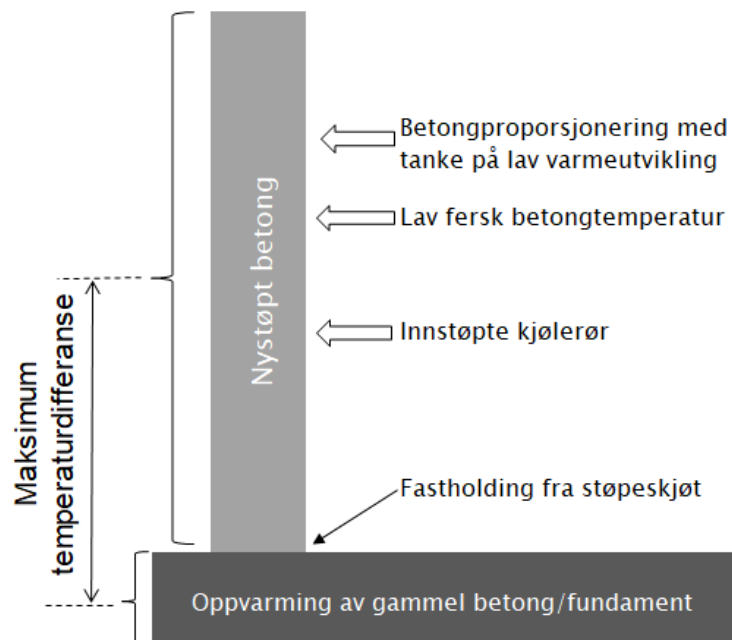
Ingrid Hegseth, Skanska

Sverre Smeplass, Skanska

Terje Kanstad, NTNU

Anja B.E. Klausen, NTNU

Bernt Kristiansen, AF Gruppen



Praktiske råd og tiltak mot fastholdingsriss i herdende betongkonstruksjoner

KEYWORDS:
Keywords

AUTHOR(S)

Øyvind Bjøntegaard, Statens vegvesen (red.)
Ingrid Hegseth, Skanska
Sverre Smeplass, Skanska
Terje Kanstad, NTNU
Anja B.E. Klausen, NTNU
Bernt Kristiansen, AF Gruppen

DATE

2020-10-09

VERSION

Final

REPORT LANGUAGE

Norsk

**NUMBER OF
PAGES/APPENDICES:**

58 + 1 Appendix

ABSTRACT

At det finnes ulike tiltak for å redusere risikoen for gjennomgående fastholdingsriss er antagelig velkjent, men valg av tiltak, gjennomføring og potensiell effekt av ulike tiltak er ikke like åpenbare. Rapporten søker å øke kunnskapen på dette området ved å gi anslag på kostnader, samt nytten i form av beregningseksempler. Det gis erfaringer fra praksis, også med hensyn til dokumentasjon og reparasjon. I tillegg gis en generell definisjon av fastholding, samt en oversikt over relevant regelverk på området.

Det er gjort beregninger av fastholdingspenninger i noen vegger støpt på fundament. Disse er basert på data fra to spesifikke betongresepter (referanse- og lavvarmebetong), samt gitte valg av beregningsforutsetninger for en liten (400 mm) og en stor (800 mm) vegg. Resultatene kan ikke generaliseres, men de ulike effektene av tiltak som er vist (bruk av kald betong, lavvarmebetong, varmekabler, kjølerør), enkeltvis og i kombinasjon, representerer imidlertid prinsipielle trender som har læringsverdi.

PREPARED BY

Bjøntegaard Øyvind

CHECKED BY

Sverre Smeplass

APPROVED BY

Kjell Tore Fosså

REPORT NO.

Report No. 8

CLASSIFICATION

Open

PROJECT

DaCS - WP 1.1 Crack risk assessment of concrete structures at early ages

REPORT NO.

Report No. 8

VERSION

Final

Preface

This report and the related work have been carried out within the research project “Durable advanced Concrete Solutions” (DaCS). The project started in 2015 and is a 4-years’ research program with focus on concrete structures for severe conditions. The main R&D objective is to enable production of sustainable and durable concrete structures for coastal and offshore arctic applications, considering both production and service life phases.

Multiple researchers from the Norwegian University of Science and Technology, SINTEF and industry partners, together with 3 PhD-students and a number of MSc-students, work on four focus areas:

- WP 1: Early age cracking and crack calculation in design
- WP 2: Production and documentation of frost resistant concrete
- WP 3: Concrete ice abrasion
- WP 4: Ductile, durable Lightweight Aggregate Concrete

The industry partners are leading multinational companies in the cement and building industry, together with Norwegian engineering companies and offshore industry. Together our aim is to improve the concrete material quality to produce environmentally friendly and durable concrete structures for future arctic offshore and coastal applications. Combining the existing knowledge and experience cross industries with the recognised research capabilities of NTNU and SINTEF, provides a good basis for both high quality and industry relevant research. Achieving the overall research objectives, will strengthen the Norwegian industry’s relevance, attractiveness and competitiveness.

The DaCS project partners are: Kværner AS (project owner), Axion AS (representing Stalite), AF Gruppen Norge AS, Concrete Structures AS, Mapei AS, Multiconsult AS, NorBetong AS, Norcem AS, NPRA (Statens Vegvesen), Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), SINTEF Byggforsk, Skanska Norge AS, Unicon AS and Veidekke Entreprenør AS. The project has received financial contribution from the Norwegian Research Council.

For more information, see <https://www.sintef.no/projectweb/dacs/>.



Summary

English summary

Countermeasures against through-cracking in hardening concrete structures subjected to external restraint are well-known, but the choice of measure, how to execute and potential effects are not as evident. The scope is to increase the knowledge on these issues by discussing cost-benefit, supported by simulations. Field experience is given, also with regard to documentation and repair. A general definition of restraint is given, as well as an overview of relevant regulations.

Any countermeasure will in principle reduce the risk of cracking and the extent of cracking, but whether it gives a crack-free structure is not certain. The effect of a given measure is entirely dependent on how comprehensive it is. To ensure a crack-free structure, the scope of the measure, or combination of measures, must be designed via calculations. The execution of the measure must then be in accordance with the assumptions in the calculation.

2D calculations have been made of restraint stresses in some walls cast on a foundation. The calculations are based on data from two specific concrete recipes (reference and low-heat concrete), as well as given choices for calculation parameters for a small (400 mm) and a large (800 mm) wall. The results can not be generalized, but the various effects of measures shown (use of cold concrete, low-heat concrete, heating cables, cooling pipes), individually and in combination, however, represent fundamental trends that have learning value. Our calculation results can be summarized as follows:

- The temperature effect dominates, and an increase in wall thickness results in increased maximum temperature and normally increased risk of cracking (although increased wall thickness can result in somewhat lower restraint).
- The risk of cracking is normally highest in winter because the initial difference in temperature between fresh concrete/newly cast structure and the old restraining structural part is greatest then. This contributes to increased temperature difference during the hardening phase. Do not order warm fresh concrete in cold climate, and if below zero degrees ensure proper curing conditions to avoid frost damage in newly cast concrete.
- Using cold fresh concrete (here: reduction from 20 °C to 15 °C) has a good effect in reducing cracking risk. Delivery of cold concrete, both naturally cold or by using ice during mixing, has however challenges.
- Low-heat concrete has a good effect; in our calculations about the same effect as cold concrete.
- For our large wall, the use of low-heat concrete will not necessarily be sufficient to avoid cracking, but it has a significant positive effect.
- Heating the foundation with heating cables (here: one layer centric) is shown to be very effective and can provide a crack-free wall, even for the large wall. For the given wall-on-massive slab case, the calculations indicate that the spread area for heating cables in the slab should not be less than approx. 4 meters.
- The use of cooling pipes is a potentially powerful measure that can provide a crack-free wall, even for the large wall. However, the effect of cooling pipes is highly dependent on the execution; cooling water temperature, pumping capacity, loop length etc.
- A combination of measures (when successful) will naturally be very powerful and is likely to provide crack-free walls, even for large thicknesses.

Norsk sammendrag

Se kapittel 9.

INNHold

1	Innledning	7
2	Tiltak og kostnader	9
3	Tiltak mot fastholdingsriss - beregningseksempler	11
3.1	Beregningsforutsetninger.....	11
3.1.1	Valg av geometri og dimensjoner.....	11
3.1.2	Referansebetong, forskaling og klima	12
3.1.3	Valgte tiltak mot fastholdingsriss	13
3.2	Beregningsresultater	14
3.2.1	Effekten av geometri og dimensjon.....	14
3.2.2	Effekten av naturlig kald fersk betong.....	15
3.2.3	Effekten av lavvarmebetong.....	17
3.2.4	Effekten av varmekabler.....	19
3.2.5	Effekten av kjølerør	20
3.3	Fastholdingsforhold ved seksvensiell veggstøp.....	22
3.4	Diskusjon og oppsummering - beregningseksempler.....	25
4	Praktiske erfaringer med de ulike tiltakene	27
4.1	Erfaring med naturlig kald betong.....	27
4.2	Erfaring med lavvarmebetong.....	27
4.3	Erfaring med varmekabler.....	28
4.4	Erfaring med kjølerør.....	29
4.5	Erfaring med kald betong med isbiter som del av blandevannet.....	31
5	Dokumentasjon	33
5.1	Utstyr for å måle temperatur	33
5.2	Montering av termoelementer og registrering av endelig plassering.....	35
5.3	Måling av maksimums- og minimumstemperatur	36
5.4	Temperaturdifferanser over tverrsnittet (indre fastholding).....	37
5.5	Temperaturforskjell mellom ny og gammel konstruksjon.....	38
5.6	Rissregistrering	40
5.7	Kalibrering av beregninger	41
6	Reparasjon av riss	43
7	Fastholding	44
7.1	Introduksjon	44
7.2	Indre fastholding	44
7.3	Ytre fastholding	45
7.4	Generell definisjon av fastholdingsgrad	52
8	Krav i regelverket	54
8.1	Utførelsesstandarden NS-EN 13670+NA	54
8.2	Statens vegvesens håndbok R762, prosesskode 2	54
8.3	Betegnelse Lavvarmebetong og spesialbetongen SV-Lavvarme	55
8.4	Hva som kommer i nye Eurocode 2.....	56
9	Oppsummering	57
10	Referanser	58

Acknowledgement

Følgende takkes for bidrag i rapportprosjektets tidlige fase:

Frode Skottun, Veidekke

Andreas Sjaastad, Veidekke

Britt Blom Marstrander, Multiconsult

Helga Kjos Hanssen, Veidekke

Silje Gystad Ytterdal, Multiconsult

1 Innledning

En herdende konstruksjondel i betong er i praksis i større eller mindre grad utsatt for:

- Indre fastholding; hvor herdevarmen skaper temperaturdifferanser over konstruksjonsdelens tverrsnitt. Dette skaper strekkspenninger i overdekningssonen som kan, hvis de blir store nok, føre til krakeleringsriss.

og

- Ytre fastholding; hvor herdevarmen skaper temperaturforskjell til tilstøtende (kald) konstruksjonsdel(er). Dette skaper strekkspenninger over hele tverrsnitt som kan, hvis de blir store nok, føre til riss som går tvers gjennom hele tykkelsen.

Rapporten omhandler primært *ytre fastholding* (indre fastholding er nevnt i kap. 5.4 og kap. 7). Spesielt anleggskonstruksjoner, som ofte er massive, utvikler høye herdetemperaturer og potensielt høye fastholdingspenninger. Erfaringsmessig ser man gjennomgående fastholdingsriss i slike konstruksjoner ganske ofte, se eksempler i Figur 1. Rissene kan medføre problemer knyttet til tetthet, bestandighet og estetikk.



Garasjevegg fastholdt mot bunnplate
(Foto: B. Kristiansen, AF Gruppen)



Kantbjelke fastholdt mot brudekke
(Foto: Skare og Stemland, NTNU)



Støttevegg fastholdt mot bunnplate
(Foto: S. Helland, Skanska)



Toppdekke fastholdt mot to vegger
(Foto: Statens vegvesen)

Figur 1. Eksempler på gjennomgående fastholdingsriss pga. ytre fastholding

La oss ta et eksempel med en massiv vegg (tykkelse > 40 cm) som støpes mot stivt fundament. Etter støp øker temperaturen i vegg pga. herdevarmen og deretter vil den avkjøles gradvis

tilbake til omgivelsestemperaturen når herdeprosessen avtar. Veggene vil derfor ekspandere først under temperaturøkningen (typisk første 1–3 dagene) og deretter trekke seg sammen under avkjølingen (typisk over en uke eller to). Støpeskjøten mot underlaget forhindrer helt eller delvis disse temperaturbevegelsene og det oppstår derfor spenninger i veggene.

Under avkjølingen opplever veggene at sammentrekningen blir fastholdt og de bygger seg derfor opp strekkspenninger over hele veggens tverrsnitt. Hvis spenningene blir store nok dannes det riss, ofte flere, gjennom hele veggens tverrsnitt.

Temperatureffekter er normalt den klart største drivkraften til opprissing og derfor benevnes gjerne dette som «termoriss». Autogent svinn (selvuttørkingssvinn) bidrar imidlertid også da det for eksempel forsterker betongens sammentrekning i avkjølingsfasen. Både temperatur- og autogent svinn-bidraget inngår ved simuleringsberegninger.

At det finnes ulike tiltak for å redusere risikoen for slik opprissing er antagelig velkjent, men valg av tiltak, gjennomføring og potensiell effekt av ulike tiltak er ikke like åpenbare. Rapporten søker å øke kunnskapen på dette området ved å gi anslag på kostnader (kap. 2), og nytte (kap. 3) i form av beregningseksempler. Erfaringer er diskutert med hensyn til; de enkelte tiltak (kap. 4), dokumentasjon (kap. 5) og reparasjon (kap. 6).

Det gis også en generell diskusjon/definisjon av fastholding (kap. 7), samt oversikt over relevant regelverk (kap. 8).

For annen relevant litteratur på området kan nevnes Byggforskseriens byggdetaljblader gitt i referanse [1], [2] og [3].

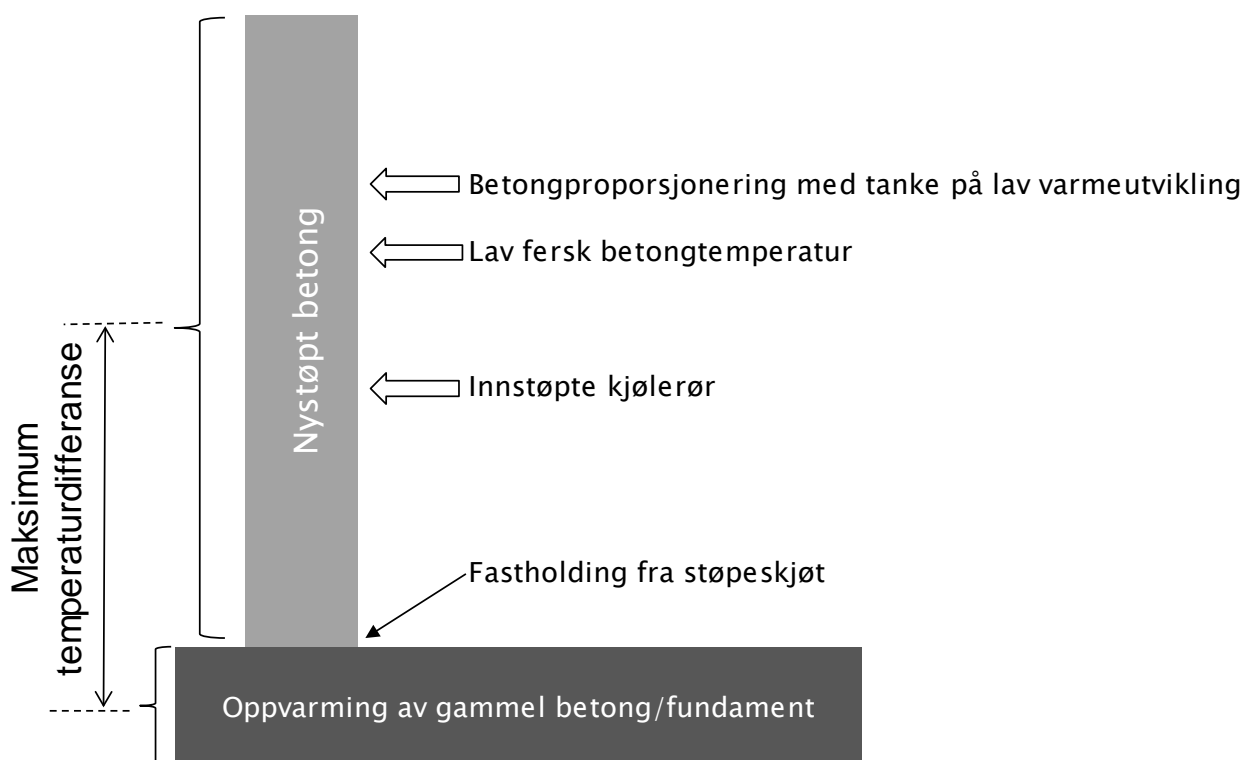
2 Tiltak og kostnader

Det som er hoveddriveren for spenningene som bygger seg opp i nystøpt konstruksjon er den maksimale gjennomsnittlige temperaturforskjellen mellom denne og konstruksjonsdelen det støpes mot, se Figur 2. Høy maksimumstemperatur midt inne i vegg er en indikasjon på at gjennomsnittstemperaturen også er høy.

Tiltak handler derfor i sin enkelthet om å begrense maksimaltemperaturen i nystøpt konstruksjon og/eller varme opp konstruksjonen det støpes mot.

De aktuelle tiltakene er som følger, her eksemplifisert ved en vegg støpt på fundament:

- Vegg (fastholdt konstruksjonsdel):
 - o Proporsjonere betongen slik at den avgir lite varme
 - o Kald betong; levere betongen med lav fersk betongtemperatur
 - o Kjøle betongen med innstøpte kjølerør
- Fundamentet (fastholdende konstruksjonsdel)
 - o Oppvarming av fundamentet med innstøpte varmekabler



Figur 2. Aktuelle tiltak for å redusere fastholdingsspenninger i vegg støpt på fundament. Maksimal temperaturforskjell mellom konstruksjonsdelene bestemmer i stor grad oppbygging av spenninger og risstendensen.

Kostnader og arbeidsomfang for de ulike tiltakene er svært forskjellig, og ved valg av tiltak vil det være naturlig å vurdere effekten av tiltakene i den rekkefølgen de er angitt her.

- Bruk av naturlig kald fersk betong har normalt ingen eller marginale kostnadskonsekvenser. Tiltaket er primært tilgjengelig i de kalde årstidene, dvs. høst, vinter og vår.

- Bruk av knust is som erstatning for blandevann kan i prinsipp brukes som et tiltak for å oppnå kald fersk betong under sommerforhold, men vil være kostnadskreven og reduserer blandekapasiteten betydelig. Dette krever imidlertid at det settes i verk tiltak for å sikre at det ikke finnes rester av is i betongen under støp, samt en innkjøringsperiode både mht. stabilitet av konsistens og luftinnhold (i MF-betong). Kostnadseffekt vil variere mye avhengig av betongvolum og tilgang på is. Erfaring antyder at det kan være mulig å komme ned mot en kostnad på ca. 400 kr/m³ i store prosjekt.
- Kostnadene ved bruk av lavvarmebetong avhenger først og fremst av betongprodusentens tilgang på flygeaske. Normal kostnadseffekt er i området 50–200 kr/m³, mye avhengig av eventuelle riggkostnader. Se for øvrig ref. [4].
- Kostnadene ved bruk av varmekabler avhenger først og fremst av geometrien, det kan bli vesentlig mer omfattende å varme opp en stor bunnplate enn et lite stripefundament. Typisk kostnadseffekt kan være 200–400 kr/m³, der kostnadskonsekvensen er knyttet opp til betongvolumet i sist støpte konstruksjonsdel. For en kulvert relateres kostnaden dermed til veggstøpen, selv om tiltaket installeres i bunnplaten.
- Bruk av kjølerør kan være relativt kostnadskreven fordi det krever installasjon av stål- eller plastrør, pumpeanlegg og tilgang på kaldt vann, og blåsing og injeksjon av rørene med grout etter at betongen er nedkjølt. Kostnadseffekten er svært avhengig av geometri, lokale forhold og prosjektets størrelse. Kostnadene kan i visse tilfeller komme ned mot 300 kr/m³, men helt opp i 1000 kr/m³ er også erfart.

3 Tiltak mot fastholdingsriss – beregningseksempler

3.1 Beregningsforutsetninger

3.1.1 Valg av geometri og dimensjoner

Vi har gjennomført beregninger for å vise effekten av ulike tiltak på faren for opprissing. Beregningene er utført ved bruk av det to-dimensjonale FEM-programmet Crack TeSt COIN. Programmet er utviklet av Prof. Jan Erik Jonasson ved Luleå Tekniske Universitet, og tilpasset norsk praksis gjennom FoU-prosjektene COIN og DaCS.

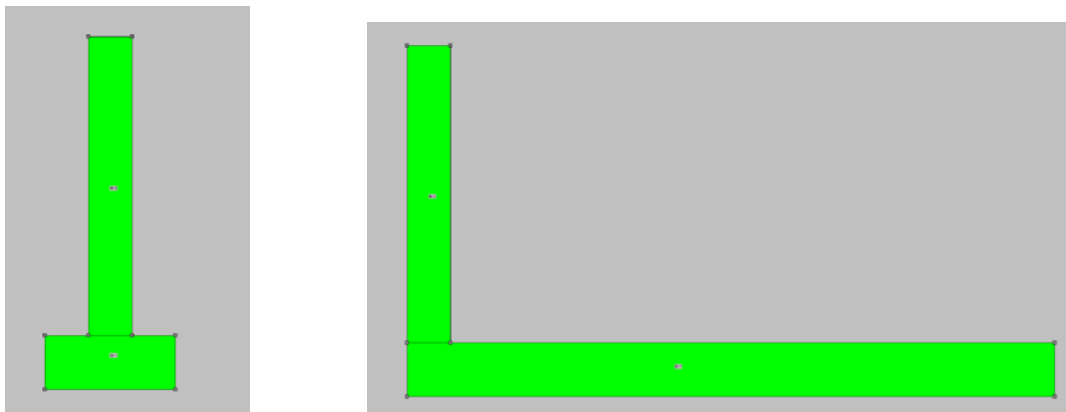
Crack TeSt COIN beregner temperaturforløp og -fordeling i herdende betongkonstruksjoner modellert i to dimensjoner under forutsetning av at varmetransporten i den tredje dimensjonen kan neglisjeres. Resultatet brukes til å beregne den resulterende spenningsutviklingen og -fordelingen som oppstår når den termiske og autogene dilatasjonen begrenses av indre og ytre fastholdingeffekter. Betongens varmeutvikling, autogene svinn, strekkfasthetsutvikling, stivhetsutvikling og krypegenskaper inngår blant annet som inngangsdata i denne analysen. Fastholdingeffektene er i hovedsak styrt av geometrisk utforming og materialstivhet. Dette er diskutert mer inngående i kapittel 7.

Faren for opprissing evalueres ved å beregne «rissindeksen», som er det løpende forholdet mellom opptredende strekkspenning og strekkfasthet gjennom herdeforløpet. En rissindeks på 1,0 tilsvarer at strekkfastheten er fullt utnyttet, og at det derfor er betydelig fare for opprissing. Det har vært vanlig å anta at en rissindeks lavere enn 0,75 gir tilstrekkelig sikkerhet mot opprissing. Kapittel 8.2 gjengir hvordan Statens Vegvesens håndbok R762 [5] regulerer krav til beregnede rissindekser.

Fastholdingsforholdene har direkte effekt på spenningsnivået og dermed rissindeksen og opprissingsfaren. For å illustrere dette har vi valgt å modellere fire forskjellige fastholdingssituasjoner.

- a. Stor vegg på stripefundament
- b. Liten vegg på stripefundament
- c. Stor vegg på bunnplate
- d. Liten vegg på bunnplate

Geometri og dimensjoner er vist i Figur 3 og Tabell 1.



Figur 3. Stor vegg på stripefundament og stor vegg på bunnplate. Skjermbilder fra CrackTeSt COIN

Tabell 1. Valgte dimensjoner i konstruksjonseksemlene.

Konstruksjon		Dimensjoner			
		Høyde vegg	Tykkelse vegg	Bredde fundament	Tykkelse fundament
Vegg på stripefundament	a	5500	800	2400	1000
	b	5500	400	2000	800
Vegg på bunnplate	c	5500	800	12000	1000
	d	5500	400	12000	800

I beregningene er det antatt at vi kan neglisjere endeeffekter, dvs. vegg og fundament er «uendelig» lange, at vegg og fundament har konstant tverrsnitt, og at begge er upåvirket av ekstern fastholding fra grunnen (friksjon og forankring) og eventuelle naboseksjoner. I CrackTest COIN tilsvarer dette at graden av slik ekstern fastholding settes lik 0. Se avsnitt 3.3 om ekstern fastholding.

Når en vegg med en gitt veggtykkelse herder vil temperaturforskjellen mot enten et stripefundament eller en bunnplate bli omtrent den samme dersom betongtype og omgivelser er like. Eventuelle forskjeller i rissindeks må derfor i hovedsak skyldes at en bred bunnplate gir høyere fastholdingsgrad enn det smalere stripefundamentet. Dette er diskutert mer detaljert i kapittel 7.

3.1.2 Referansebetong, forskaling og klima

Som utgangspunkt for beregningene har vi brukt en B45M40-kvalitet basert på Norcem Anleggssement FA med flygeaskeinnhold på 18%. Silikamengden er 5% av bindemidlet. Den totale bindemiddelmengden er på 380 kg/m³. Fersk betongtemperatur er satt til 20°C.

Materialdata er ellers hentet fra en forsøksserie på en enkelt betongsammensetning, gjennomført ved NTNU innenfor forskningsprosjektet DaCS [6]. Datasettet er i utgangspunktet gyldig bare for den aktuelle betongsammensetningen. De resultatene som er oppnådd kan derfor ikke sies å ha

generell gyldighet. Resultatene burde likevel kunne gi et godt inntrykk av den prinsipielle effekten av de herdetiltakene som er evaluert gjennom analysene.

I analysene har vi tatt utgangspunkt i sommerforhold, med en jevn døgntemperatur på 15°C, og en vindhastighet på 2 m/s. Fundamentene og grunnen er antatt å være i temperaturløst med omgivelsene. Vinterforhold er simulert ved å anta en jevn døgntemperatur på 0°C, og at fundamentene og grunnen også her er i temperaturløst med omgivelsene.

Forskalingen er 15 mm finer, stige-hastigheten under støp er 1 m/s. Forskalingen rives etter 3 døgn. Betongoverflatene dekkes ikke til etter avforskaling. Temperatur- og spenningsforløp er beregnet for et tidsspenn på 1 måned, dvs. 672 timer.

3.1.3 Valgte tiltak mot fastholdingsriss

I beregningseksemplene har vi benyttet følgende tiltak:

1. Bruk av naturlig kald fersk betong. Vi har senket fersk betongtemperaturen fra 20°C til 15°C i beregningene, og vurdert effekten av dette tiltaket både under vinter- og sommerforhold. Vi har ikke vurdert aktiv kjøling med bruk av knust is her.
2. Bruk av lavvarmebetong. Lavvarmebetongen er basert på Norcem Anleggssement FA, med tilsatt flygeaske til et total flygeaskeinnhold på 32%. Silikamengden er 5% av bindemidlet. Den totale bindemiddelmengden er på 380 kg/m³. Tiltaket er brukt alene under sommer og vinterforhold, og i kombinasjon med naturlig kald fersk betong, bruk av varmekabler, og bruk av kjølerør. Forsøksdataene er også her hentet fra en forsøksserie på en enkelt betongsammensetning innen prosjektet DaCS [6].
3. Bruk av varmekabler. Det er brukt varmekabler med en effekt på 40W/m, plassert sentrisk i tverrsnittet, med en innbyrdes senteravstand på 400 mm. I beregningene har varmekablene gitt effekt 4 dager før støp, og 1 døgn etter støp. I bunnplatene har vi variert bruken av varmekabler ved å plassere dem a) i hele platen, b) fra veggen og 4 meter ut i platen, og c) fra veggen og 2 meter ut i platen. Tiltaket er brukt alene under sommerforhold og i kombinasjon med lavvarmebetong.
4. Bruk av kjølerør. Det er brukt 30 mm stålrør plassert horisontalt sentrisk i veggen med 500 mm innbyrdes avstand. Vanntemperaturen i rørene er satt til konstant 7°C. Dette betinger i praksis en relativt stor vanngjennomstrømning. Kjølingen avsluttes 3 døgn etter støp. Tiltaket er brukt alene under sommerforhold og i kombinasjon med lavvarmebetong.

Analysen i Crack Test COIN gir mulighet til å hente ut fullstendige forløp av temperatur, spenning og rissindeks i ethvert punkt i geometrimodellen. Vi har hentet ut:

- maksimaltemperatur i vegg
- maksimal forskjell i gjennomsnittstemperatur for vegg og fundament /bunnplate
- maksimal rissindeks i vegg

Disse resultatene er rapportert samlet for alle simuleringene i VEDLEGG 1. I diskusjonen om effekten av ulike tiltak i de videre avsnittene i rapporten er det fokusert ensidig på maksimal beregnet rissindeks i veggene.

Rapporterte rissindekser representerer effekten av ytre fastholding ved avsluttet nedkjøling av vegg, dvs. eventuelle tidlige maksimaleffekter relatert til indre fastholding og høye overflatespenninger like etter avforming er neglisjert.

3.2 Beregningsresultater

3.2.1 Effekten av geometri og dimensjon

Figur 4 viser en sammenstilling av de høyeste beregnede rissindeksene gjennom herdeforløpet for de 4 geometrimodellene under sommerforhold, og uten spesielle tiltak. Figurene viser som forventet at bunnplatene gir noe større fastholdingseffekt enn stripefundamentene. Forskjellen i maksimal rissindeks er imidlertid liten, dvs. i størrelsesorden 0,05.

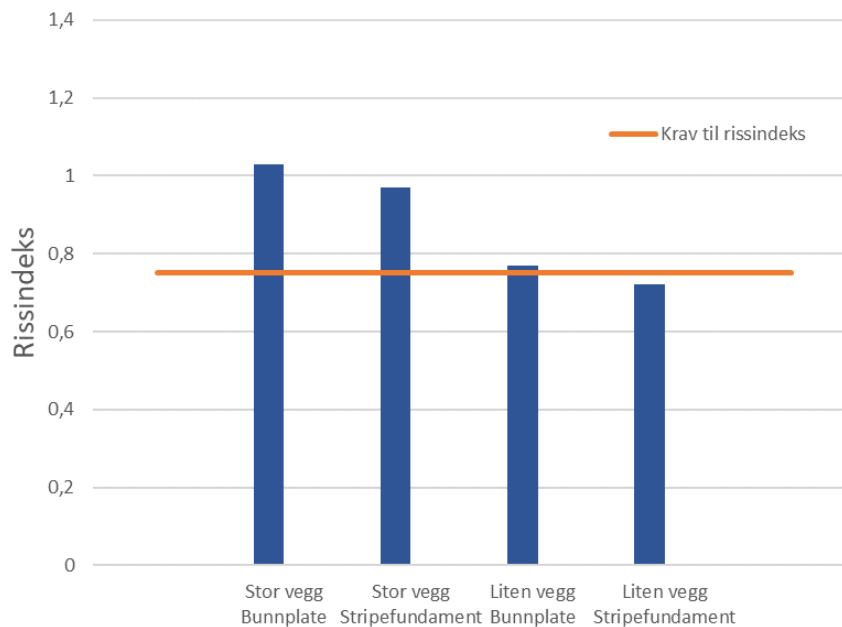
De store veggene har noe større rissindekser enn de små. Dette skyldes den høyere temperaturforskjellen mellom vegg og bunnplate / stripefundament. I dette tilfellet er maksimaltemperaturen i de store veggene 49°C, og 39°C i de små veggene.

Samtidig er fastholdingsgraden for de store veggene noe mindre enn for de små veggene, fordi dimensjonene på fundamentet i konstruksjonseksemplene ikke øker like mye som veggtykkelsen. Dette bidrar til å begrense rissindeksen, dvs. forskjellen mellom stor og liten vegg er ikke så stor som endringen i temperaturforskjell skulle tilsi. I praksis vil den samlede effekten av temperaturøkning og redusert fastholding være forskjellig fra tilfelle til tilfelle, men vi ser som regel at temperatureffekten dominerer, dvs. større veggtykkelser gir normalt økt rissindeks, slik vi har fått her.

Maksimal gjennomsnittlig temperaturforskjell mellom vegg og bunnplate er 27°C for vegg med 800 mm tverrsnitt, og 21°C for vegg med 400 mm tverrsnitt. Figur 4 viser at tilhørende rissindekser er i størrelsesorden 1,0 for vegg med 800 mm tverrsnitt og 0,75 for vegg med 400 mm tverrsnitt.

SVV Håndbok R762, prosess 84.5 «Spesielle herdetiltak» omfatter ekstraordinære tiltak for å redusere risikoen for opprissing og andre effekter som skyldes betongens herdevarme. Prosess 84.55 angir at største tillatte forskjell i gjennomsnittstemperatur er 15 °C. Dette kravet kan fravikes dersom det gjennomføres analyse av faren for termisk induert opprissing (prosess

84.56). Største utnyttelse av betongens strekkfasthet (rissindeksen) skal i så fall ikke overstige 75%. Dette er omtalt mer utfyllende i kapittel 8.2.



Figur 4. Maksimale beregnede rissindekser for de 4 ulike geometriene under sommerforhold, uten spesielle herdetiltak

I de konkrete eksemplene i Figur 4 vil det derfor være nødvendig å bruke spesielle herdetiltak for å begrense risikoen for opprissing for de store veggene, mens de små veggene har beregnede rissindekser i størrelsesorden 0,75, og dermed akseptabel sikkerhet mot opprissing pga. fastholdt termisk og autogen dilatasjon, selv om temperaturforskjellene ikke tilfredsstiller kravet i Prosess 84.55.

3.2.2 Effekten av naturlig kald fersk betong

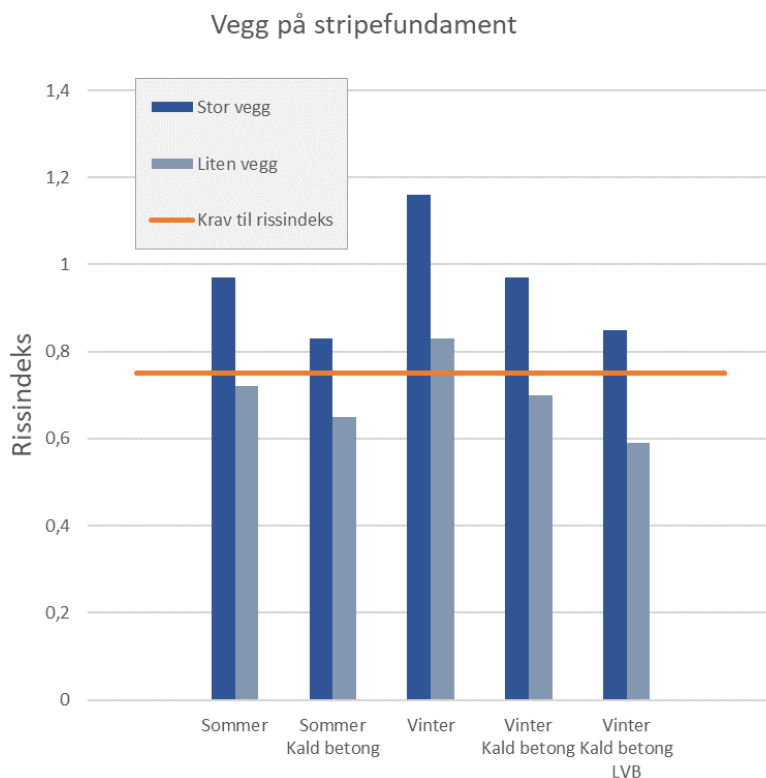
Figur 5 og Figur 6 viser effekten av å redusere fersk betongtemperatur fra 20°C til 15°C. Tiltaket er effektivt, og har her gitt en reduksjon i høyeste beregnede rissindeks i området 9–16% for de 4 geometriene, under sommer- og vinterforhold. For vegger med begrenset tykkelse («Liten vegg» har tykkelse 400 mm) vil dette tiltaket i praksis kunne bidra til tilstrekkelig sikkerhet mot opprissing, forutsatt at materialvalg og rammebetingelser ikke er spesielt ugunstig.

Tiltaket er litt mindre effektivt under sommerforhold enn under vinterforhold. Redusert fersk betongtemperatur gir alltid redusert hydrasjons-hastighet, og maksimal herdetemperatur blir dermed forskjøvet ut i tid. Dette gir økt varmetap mot omgivelsene i oppvarmingsfasen, og dermed redusert temperaturstigning. Denne effekten er mer markert om vinteren enn om sommeren, pga. større temperaturforskjell mellom betongen og omgivelsene. Under vinterforhold kan vi dermed også forvente at maksimal- og gjennomsnittstemperaturen reduseres litt mer enn reduksjonen i fersk betongtemperatur ved bruk av kald fersk betong. Dette gir en gunstig tilleggseffekt på rissindeksen under vinterforhold.

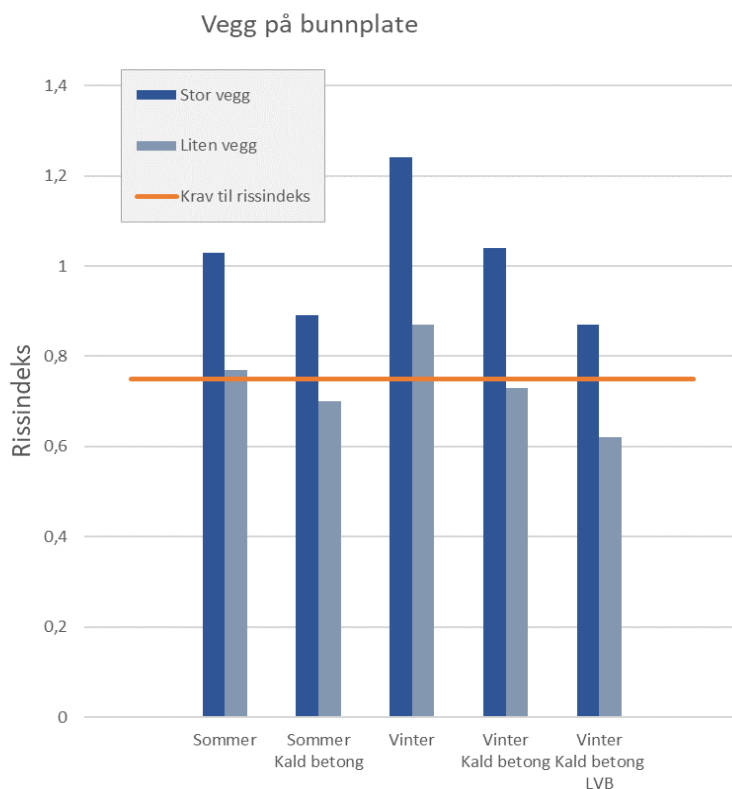
Figurene viser også en svært gunstig effekt av å kombinere kald fersk betong med lavvarmebetong (LVB) under vinterforhold. Resultatene viser at en senkning av fersk betongtemperatur med 5 °C alene kan være like effektivt mht. opprissingstendensen som bruk av lavvarmebetong.

For veggene med 800 mm tykkelse («Stor vegg») er kombinert bruk av kald fersk betong og lavvarmebetong med 32% flygeaske likevel ikke nok til å redusere rissindeksen til et nivå under akseptkriteriet 0,75. For disse konstruksjonene vil det derfor være behov for flere tiltak.

Som nevnt i kapittel 2 er kald fersk betong i praksis bare generelt tilgjengelig i den kalde årstiden. Under vinterforhold vil det i mange tilfeller være mulig å redusere den ferske betongtemperaturen ytterligere, gjerne ned mot 10°C. En reduksjon av fersk betongtemperatur fra 15° til 10°C vil gi et tilleggsbidrag til redusert rissindeks i samme størrelsesorden som reduksjonen fra 20° til 15°C.



Figur 5. Effekten på beregnet rissindeks av naturlig kald betong for vegg på stripefundament. Fersk betongtemperatur er senket fra 20°C til 15°C.



Figur 6. Effekten på beregnet rissindeks av naturlig kald betong for vegg på bunnplate. Fersk betongtemperatur er senket fra 20°C til 15°C.

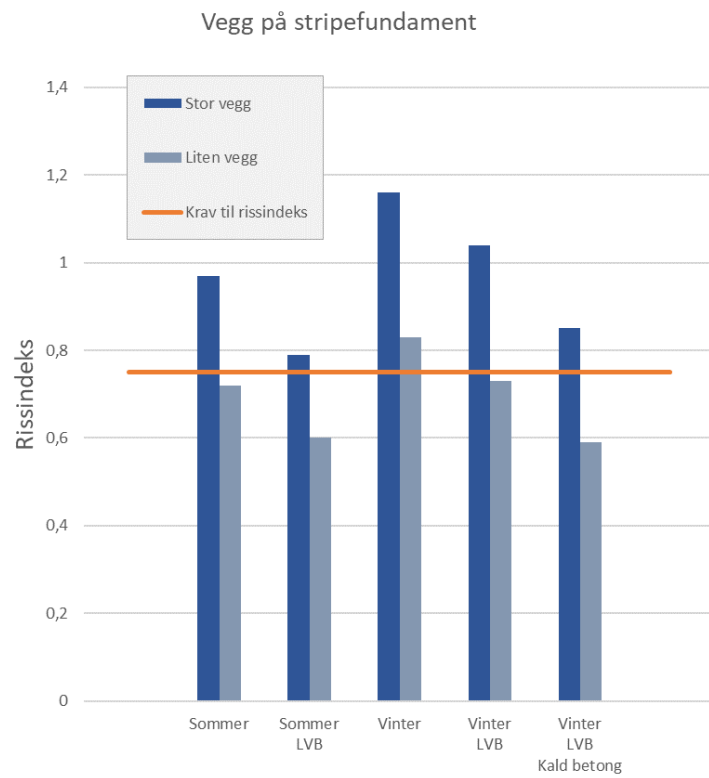
3.2.3 Effekten av lavvarmebetong

I Figur 7 og Figur 8 ser vi effekten av å bruke lavvarmebetong. Å bytte ut sement med flygeaske bidrar til en lavere varmeutvikling i betongen. For betongen vi har tatt utgangspunkt i her vil varmeutviklingen normalt være ca. 320 kJ/kg bindemiddel, mens for lavvarmebetongen vil den normalt være ca. 290 kJ/kg bindemiddel. Dvs. at vi får en reduksjon i varmeutvikling på ca. 10% ved å bytte til lavvarmebetongen. Denne reduksjonen vil føre til redusert temperaturstigning og dermed redusert fare for termisk induert opprissing. Som vi ser av Figur 7 og Figur 8 er bruk av lavvarmebetong (LVB) et effektivt tiltak for å redusere faren for opprissing. I disse tilfellene gir lavvarmebetong en reduksjon i rissindeksen på mellom 10 og 19 %.

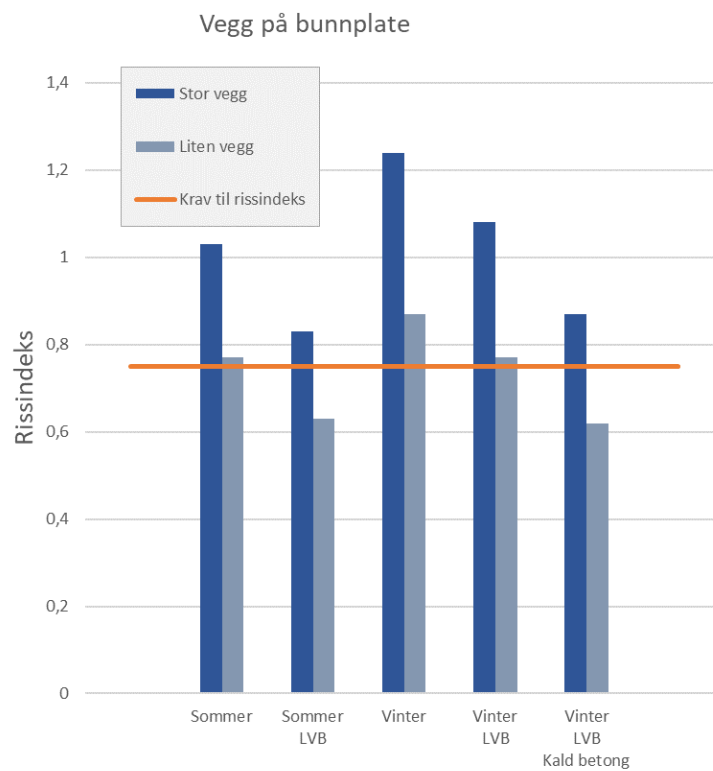
For de små veggene er bruk av lavvarmebetong som eneste tiltak i dette tilfellet nok til at vi tilfredsstillter akseptkriteriet for rissrisiko på 0,75. For de store veggene ser vi derimot at det er nødvendig med ytterligere tiltak for å få helt rissfri vegg.

Figuren viser også effekten av å kombinere effekten av lavvarmebetong og kald betong under vinterforhold. Ved å kombinere disse tiltakene får vi en god effekt, selv om det fremdeles ikke er nok til å komme under akseptkriteriet for rissindeksen for de store veggene.

Når lavvarmebetong brukes med lav utgangstemperatur under vinterforhold vil det som regel være nødvendig å sette i verk ekstra tiltak for å beskytte spesielt utsatte konstruksjonsdeler som toppflater, endeflater og hjørner mot frostskaader. Slike tiltak kan være tildekking med isolasjonsmaterialer og presenning, i enkelte tilfeller kombinert med fying.



Figur 7. Effekten av lavvarmebetong på beregnet rissindeks for vegg på stripefundament.



Figur 8. Effekten av lavvarmebetong på beregnet rissindeks for vegg på bunnplate.

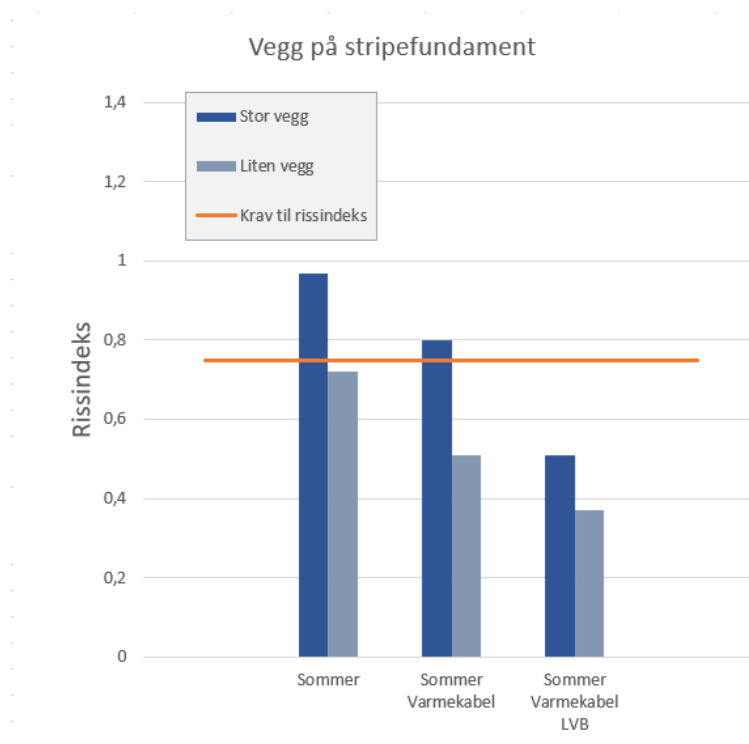
3.2.4 Effekten av varmekabler

Varmekabler blir brukt for å øke temperaturen i bunnplate/stripefundament, og dermed redusere temperaturforskjellene som genererer termisk indusert spenning. I bunnplatene har vi variert bruken av varmekabler ved å plassere dem i hele platen, i et felt fra veggen og 4 meter ut i platen, og et felt fra veggen og 2 meter ut i platen. Ut fra resultatene i Figur 9 og Figur 10 ser vi at bruk av varmekabler er et godt tiltak for å redusere faren for opprissing. For disse eksemplene gir det en reduksjon i rissindeksen på mellom 14 og 33 %.

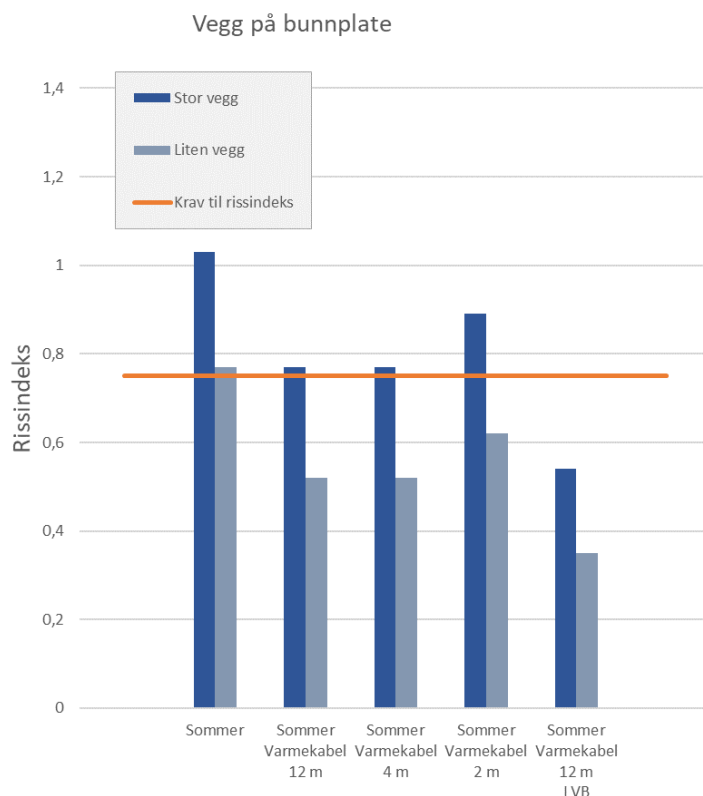
Effekten av varmekablene er avhengig av hvor stor del av bunnplata varmekablene legges i. Fra Figur 10 ser vi at varmekabler i et felt på 4 meter og 12 meter ut fra vegglivet gir samme rissindeks. Det å legge varmekabler i et felt fra vegglivet og bare 2 meter ut, gir her mindre reduksjon i rissindeksen. Resultatet viser for vårt tilfelle at varmekablene evnet å øke gjennomsnittstemperaturen i fundamentets tverrsnitt med ca. 10 °C i det området de var montert.

Hvor langt ut fra vegglivet det er nødvendig å legge varmekabler vil variere fra konstruksjon til konstruksjon, og dette bør beregnes i hvert enkelt tilfelle. Hvis det ikke gjøres beregninger, er det mest fornuftig å varme opp hele bunnplaten. Antall og plassering av varmekablene bør også sørge for at mest mulig av bunnplate-tverrsnittet varmes opp. Dersom det er praktisk mulig, vil det være fornuftig å dekke bunnplateoverflaten med isolasjon i oppvarmingsfasen for å få best mulig effekt av varmekablene.

Vi har også sett på kombinasjonen av å bruke varmekabler og lavvarmebetong. Som vi ser på figur 9 og 10 gir denne kombinasjonen en betydelig reduksjon i rissindeksen.



Figur 9. Effekten av varmekabler på beregnet rissindeks for vegg på stripefundament.



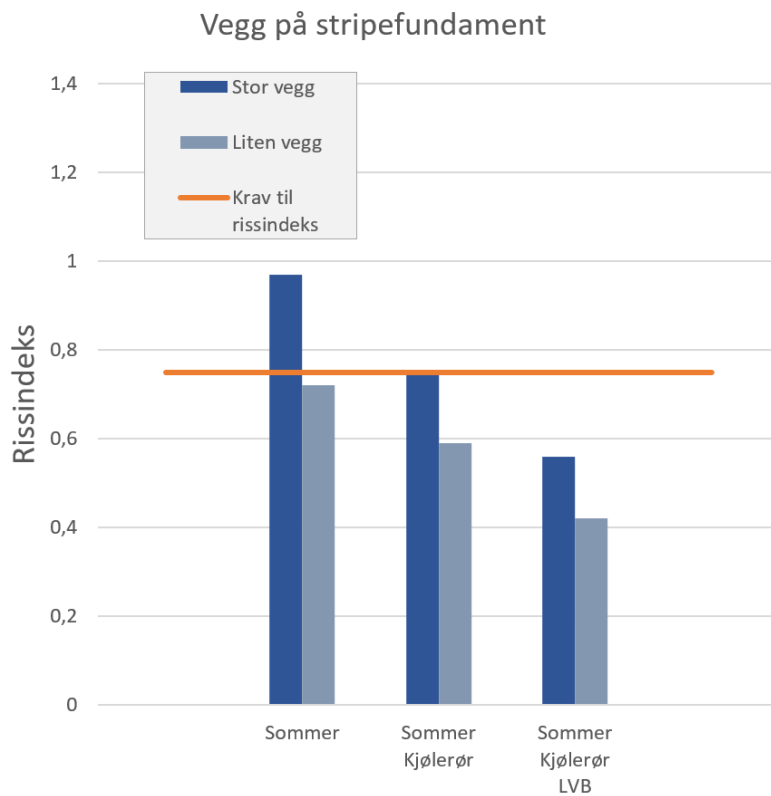
Figur 10. Effekten av varmekabler på beregnet rissindeks for vegg på bunnplate.

3.2.5 Effekten av kjølerør

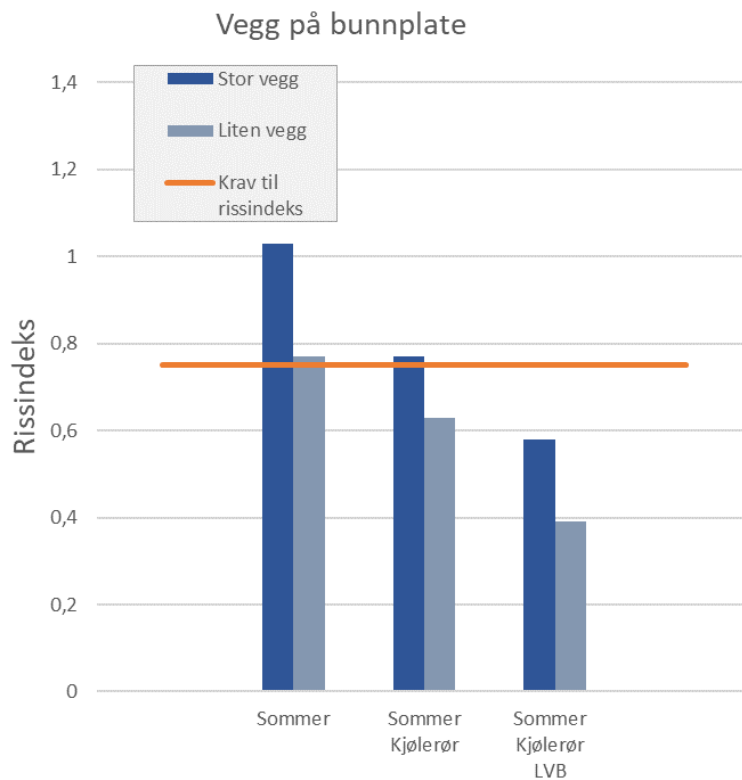
Kjølerør blir brukt for å redusere temperaturen i vegg, og dermed redusere temperaturforskjellene som genererer termisk indusert spenning. Effekten av å bruke kjølerør er vist i Figur 11 og Figur 12 under. Som vi ser, fører bruk av kjølerør til en betydelig reduksjon i rissindeksen. For disse eksemplene gir bruk av kjølerør en reduksjon i rissindeksen på mellom 18 og 26%. Vi vil understreke at effekten av denne typen kjøletiltak er svært avhengig av konstruksjonens geometri, rørdimensjon og avstanden mellom kjølerørene, oppnåelig temperatur på kjølevannet, og pumpekapasiteten.

For de store veggene, som i utgangspunktet her har en rissindeks i størrelsesorden 1,0 har bruk av kjølerør i disse beregningene gitt en reduksjon i rissindeksen som er omtrent stor nok til å tilfredsstillende akseptkriteriet på 0,75.

Figurene viser også effekten av å kombinere kjølerør med lavvarmebetong. Som vi ser er dette en svært effektiv kombinasjon, som bidrar til å redusere rissindeksen ytterligere. Varmeutviklingen i lavvarmebetongen er langsom, noe som er gunstig i seg selv, og ekstra gunstig når kjøling kommer i tillegg. Kjølingen får da et lenger tidsspenn der kjølingen kan bidra til reduksjon av maksimaltemperaturen



Figur 11. Effekten av kjølerør på beregnet rissindeks for vegg på stripefundament.



Figur 12. Effekten av kjølerør på beregnet rissindeks for vegg på bunnplata.

3.3 Fastholdingsforhold ved seksvensiell veggstøp

Ved bruk av to-dimensjonale beregningsmodeller forutsetter vi i utgangspunktet at den modellerte konstruksjonen har konstant tverrsnitt (x - y -planet), og er uendelig lang (z). I praksis vil alle støpeavsnitt ha en begrenset lengde. Dette fører til at tøyningdifferansen mellom vegg og fundament vil kunne gi krumning enten om den horisontale aksen (x -aksen) eller både den horisontale og vertikale aksene (x - og y -aksen). Vegg på stripefundament er symmetrisk om y -aksen, og vil derfor bare gi krumning om x -aksen, mens vegg på bunnplate vil gi krumning både om x - og y -aksen. Prinsippet er illustrert i Figur 13.

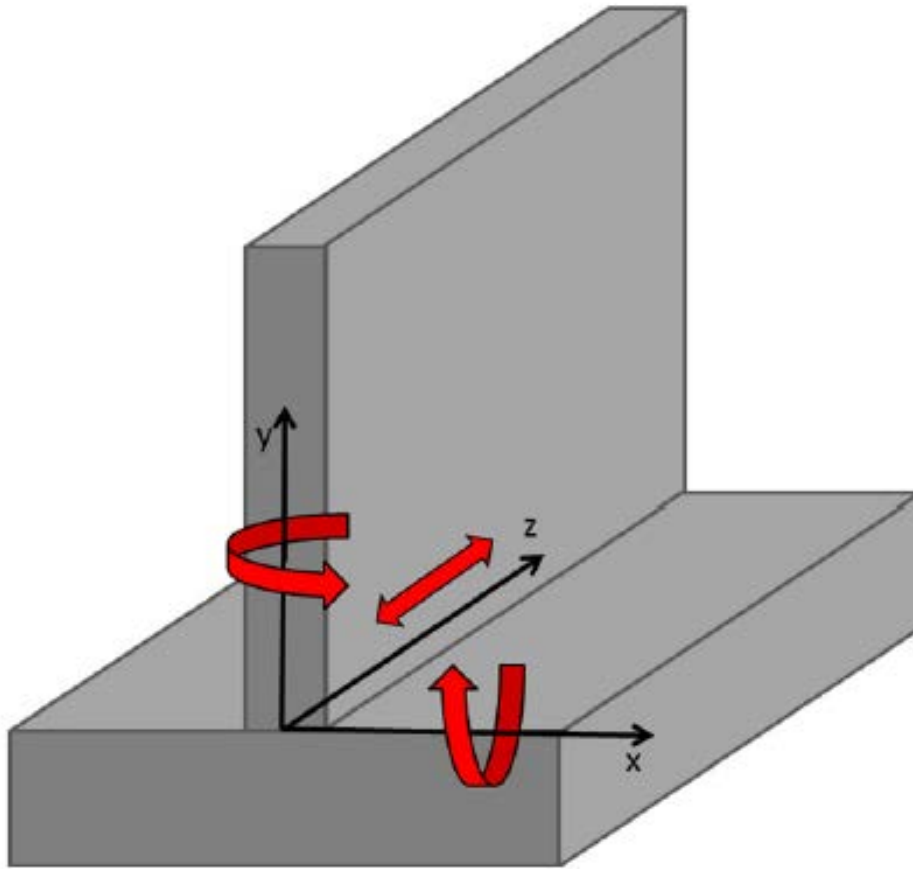
Veggstøp gjennomføres normalt seksvensielt, dvs. oppdelt i etapper. Støp av fundamenter og bunnplater vil som regel ligge flere etapper foran støp av vegg. Når bunnplaten eller fundamentet er lenger enn veggen vil den være stivere enn det som er forutsatt i den to-dimensjonale modellen, og dette begrenser rotasjonsmuligheten om både x - og y -aksen.

Ved støp av påfølgende veggseksjoner vil foregående seksjoner påvirke spenningssituasjonen i den nystøpte seksjonen både ved at den påvirker dilatasjonsmuligheten langs veggen (z -aksen) og rotasjonsmuligheten om x - og y -aksen.

Crack TeSt COIN gir mulighet til å ta hensyn til disse eksterne fastholdingseffektene, som kan ha stor påvirkning på spenningssituasjonen, og dermed på beregnede rissindekser. I programmet er det mulig å direkte angi graden av slik ekstern fastholding, både fastholdt rotasjon om x - og y -aksene, og fastholdt dilatasjon langs z -aksen. Det er imidlertid svært vanskelig å anslå størrelsen på fastholdingsgradene uten at det gjøres en 3-dimensjonal FEM-analyse. I praksis blir disse verdiene angitt med basis i erfaring fra tidligere analyser og observasjoner av risstendens ved støp.

Figur 14 og Figur 15 viser effekten av å anta at både fastholdingen mot rotasjon om x - og y -aksen og fastholding langs z -aksen settes til 0,25 (25%), slik det er vist i Tabell 2. Dette tilsvarer erfaringsmessig 2. støpetappe for veggstøper der fundament / bunnplatestøpen ligger en etappe foran. Støpeskjøten mellom veggetappene antas plan og vertikal. Vi vil understreke at disse fastholdingseffektene er estimert, ikke beregnet.

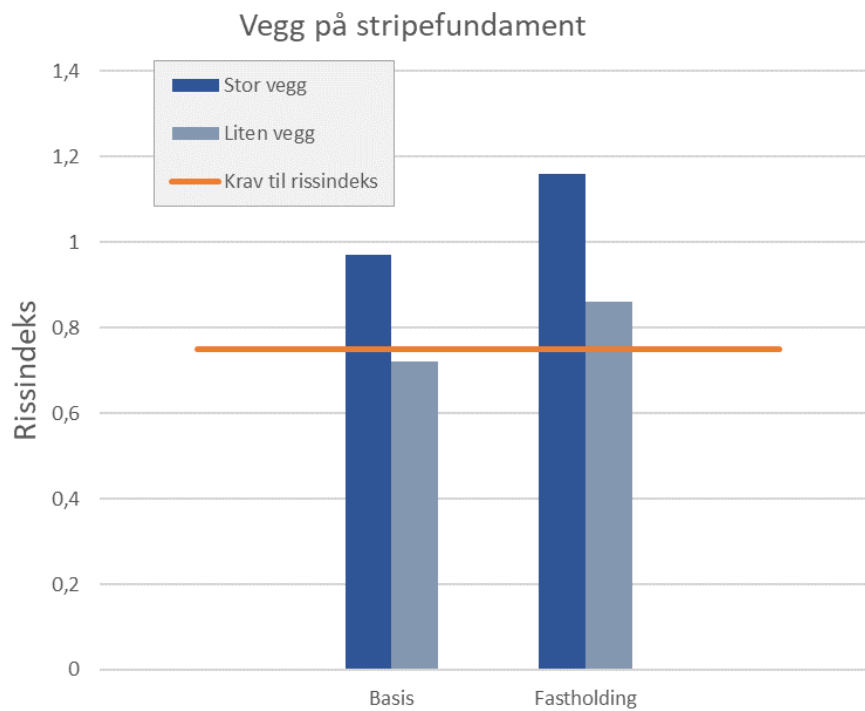
Figurene viser at effekten av fastholding, slik den er estimert her er omtrent like stor som effekten av vinterforhold, se Figur 14 og Figur 15.



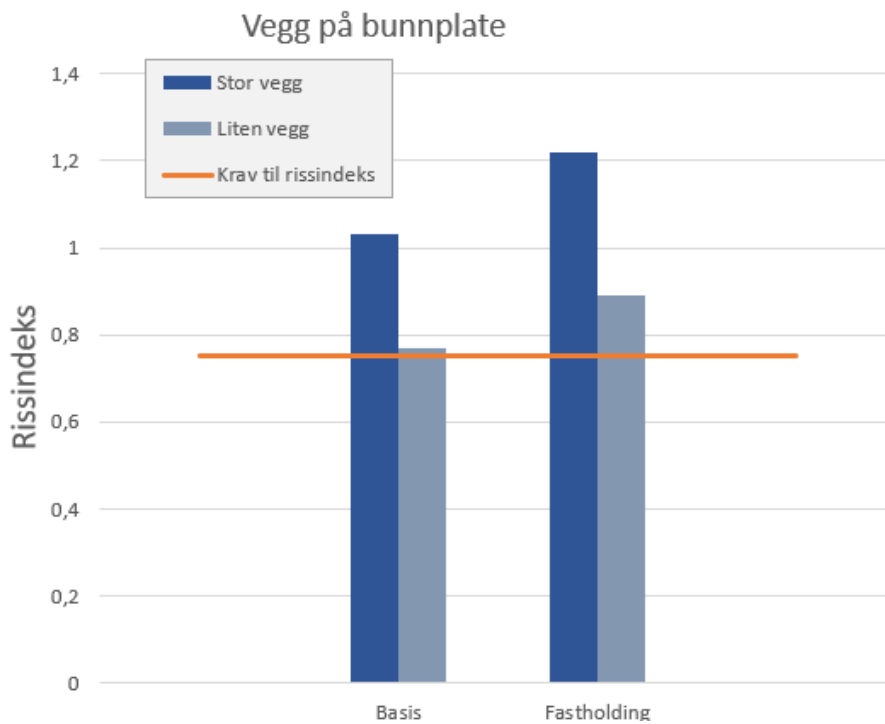
Figur 13. Illustrasjon av rotasjons (x og y)- og translasjonsakser (z) for en vegg på stripefundament.

Tabell 2. Valgte innstillinger for ekstern fastholding i CrackTeSt COIN for sekvensielle støpetapper for vegg

Konstruksjon		Fastholdingseffekter		
		0,25X	0,25Y	0,25Z
Vegg på stripefundament	A	X	-	X
	B	X	-	X
Vegg på bunnplate	A	X	X	X
	B	X	X	X



Figur 14. Effekt av ekstern fastholding («fastholding») ved sekvensielle støpetapper for vegg på stripefundament.



Figur 15. Effekt av ekstern fastholding («fastholding») ved sekvensielle støpetapper for vegg på bunnplate.

3.4 Diskusjon og oppsummering – beregningseksempler

De beregningsresultatene som er vist i denne rapporten kan brukes som en første veileder for å vurdere faren for opprissing ved fastholdt termisk og autogen dilatasjon, og til en viss grad for å vurdere og sammenligne mulige tiltak.

Beregningsmodellene er imidlertid ikke tilstrekkelig representative til at resultatene kan brukes ved detaljert prosjektering eller planlegging av tiltak. En innlysende årsak er at bindemiddel/betongresept kan være en helt annen enn hva som er basis for våre beregninger. I tillegg kan relativt små endringer i geometri (f.eks. 100 mm endring i tverrsnittstykkelse) gi store forskjeller både i fastholdingsgrad og temperatur, og det er derfor som regel nødvendig å gjøre konkrete vurderinger og beregninger i hvert enkelt tilfelle. Dette gjelder spesielt dersom de geometriske forholdene ikke lar seg beskrive tilstrekkelig presist i en to-dimensjonal modell, eller når fastholdingsforholdene er spesielle, f. eks. ved kontaktstøp mot fjell.

I tillegg til valg av geometrisk modell vil valg av materialdata, randbetingelser, herdetiltak og spesielle tiltak for å redusere temperaturforskjellene ha stor påvirkning på beregnet rissindeks.

Sentrale materialdata som herdevarme, strekkfasthets- og E-modulutvikling bør måles for den aktuelle betongsammensetningen dersom beregningene skal brukes til dokumentasjonsformål. I tillegg trengs data for termisk utvidelseskoeffisient, autogent svinn og kryp, men for å begrense måleomfanget kan en forenkling være å basere disse på tidligere prøving av betong med tilsvarende sammensetning. Valg av tiltak må noen ganger gjøres før det foreligger konkrete data for den aktuelle betongsammensetningen. Slike innledende beregninger bør gjennomføres med data som er tilstrekkelig representative, og bekreftes med nye beregninger etter at datasettet er oppdatert.

Ved bruk av herdetiltak som varmekabler eller kjølerør vil f.eks. endring i rørdiameter, senteravstand mellom rør eller kabler osv. kunne gi helt andre resultater enn de som er vist her. Det samme gjelder bruk av isolasjonstiltak. Ved bruk av isolasjon er det viktig å være klar over at isolasjonstiltak som har til hensikt å redusere temperaturdifferanser i betongtverrsnittet under herding (indre fastholding), kan gi økt temperaturforskjell mot tilstøtende konstruksjonsdeler, og dermed øke faren for opprissing pga. ytre fastholding.

Som nevnt i kapittel 2 er det stor forskjell i kostnadsbildet for de aktuelle tiltakene som kan brukes for å redusere risstendensen ved fastholdt termisk og autogen dilatasjon. Ved valg av tiltak vil det derfor være naturlig å først gjennomføre en analyse av kost-nytte effekten av tiltakene. Dette vil i mange tilfeller føre til at det er mer naturlig å kombinere kostnadseffektive tiltak som bruk av kald betong og lavvarmebetong, framfor bruk av varmekabler eller kjølerør. Det er også nødvendig å vurdere tilgjengeligheten av de aktuelle tiltakene.

Kald betong er generelt ikke tilgjengelig i sommerhalvåret. Bruk av knust is som en del av blandevannet ved produksjon av betongen er prinsipielt mulig, men krever svært tett oppfølging

for å gi et godt resultat, og vil også redusere produksjonskapasiteten ved blandeverket betydelig. Totalt sett kan dette gi en uønsket høy risiko og betydelig kostnadsbidrag.

Bruk av lavvarmebetong krever bruk av spesialsement eller bruk av flygeaske som tilsetningsmateriale. Tilgjengeligheten av disse produktene er best i sentrale strøk. Utenfor de største byene vil bruk av lavvarmebetong ofte kreve installasjon av ekstra silokapasitet hos betongleverandøren, og ekstrakostnader knyttet til lang transportavstand for flygeaske eller spesialsement. Tilgangen på flygeaske forventes generelt å bli dårligere både på grunn av økt etterspørsel og reduserte produksjonsvolum etter hvert som kullkraftverk fases ut i Europa.

Bruk av varmekabler og kjølerør vil være tilgjengelig i de aller fleste tilfeller, men bruk av disse tiltakene vil kreve at de innarbeides relativt tidlig i rigg- og produksjonsplanene. Ved valg av disse tiltakene er det derfor viktig at beregningsresultater og kost-nytte analysene foreligger tidlig i prosjektgjennomføringen.

4 Praktiske erfaringer med de ulike tiltakene

4.1 Erfaring med naturlig kald betong

Temperaturen på den ferske betongen varierer ut fra temperaturen på delmaterialene som sement, vann og tilslag. I tillegg vil utetemperaturen under transport og transportlengden påvirke.

Temperaturen på sement varierer om den er fersk eller gammel. Fersk sement kan være opp mot 70°C, men gammel sement kan være < 30°C. Temperaturen på blandevannet er ofte 4–5°C hvis det er grunnvann eller vann fra store offentlige kilder. Temperaturen på tilslaget varierer gjennom årstidene og lagringsbetingelsene.

Om sommeren er betongen naturlig varm, ofte 26–27°C mens betongen er naturlig kaldere på våren og høsten, gjerne ned mot 15°C. Temperatur på den ferske betongen vinterstid er ofte en utfordring. Det er lett å si at vi skal ha kald betong, ned mot 10°C fordi tilslaget er kaldt. En utfordring vinterstid er ofte at tilslaget inneholder fukt og at det fryser. Frosset tilslag må tines og det kan da være vanskelig å styre temperatur på den ferske betongen. Det meste av betong som leveres vinterstid leveres tilsiktet på 20°C. Da er tilslaget tinet og varmet opp. Noen blandeverk har siloer under tak og kan la tilslaget ligge så det tiner av seg selv. Det kan da være mulig å få temperatur på den ferske betongen ned mot 10°C, men det er ikke en generell mulighet.

Det er ofte ønskelig å senke temperaturen på den ferske betongen. Det gjøres prinsipielt enten ved å kjøle ned tilslaget eller benytte isbiter som erstatning for en del av vannet.

Kjøling av tilslaget kan gjøres ved å spyle vann på tilslaget og når tilslaget tørker vil energien fra prosessen gi en lavere temperatur på tilslaget. Ved en slik kjøling er det viktig å ha kontroll på vannet, med tanke på fukt i tilslag og masseforhold. Erfaringsmessig er kjøling av tilslag en mer krevende oppgave enn det høres ut som. For å utnytte effekten av kjølingen må tilslaget benyttes på et rimelig nøyaktig tidspunkt, som er bestemt ved forprøving. Tilslaget vil relativt raskt gå tilbake til utgangstemperaturen før kjølingen. Det vil si at ved kjøling av tilslag må det gjennomføres fullskala test for å bestemme effekten av kjølingen.

4.2 Erfaring med lavvarmebetong

I Norge har vi etter hvert lang og god erfaring med lavvarmebetonger basert på flygeaske-sementer, der det er tilsatt ekstra flygeaske ved blanding av betongen. NS-EN 206+NA tillater bruk av inntil 35% flygeaske, mens materialspesifikasjonen SV Lavvarme i Statens Vegvesens håndbok R762 tillater inntil 40% flygeaske. Maksimal flygeaskedosering gir 15–20% lavere varmeutvikling enn det vi får i tilsvarende betongkvaliteter uten tilsatt ekstra flygeaske. I tillegg er varmeutviklingen noe tregere, dette kan også være positivt mht. oppnådd maksimaltemperatur.

Effekten av tilsatt flygeaske begrenses noe av at den normalt må regnes inn i masseforholdet med k-faktor 0,7. De betongprodusentene som kan bruke utvidete bruksbetingelser for flygeasken, dvs. k-faktor 1,0 har derfor bedre forutsetninger for å produsere lavvarmebetong.

Bruk av flygeaske har ingen negative konsekvenser for betongens støpelighet, og gir i de fleste tilfeller bedre forutsetninger for å proporsjonere selvkomprimerende betong på grunn av flygeaskens gode filleregenskaper. Selvkomprimerende betong gir normalt et høyere bindemiddelforbruk og dermed høyere varmeutvikling enn tradisjonell betong. Det kan derfor være utfordrende å proporsjonere og produsere selvkomprimerende lavvarmebetong.

Lavvarmebetong basert på tilsetning av flygeaske har noe tregere fasthetsutvikling enn vanlig konstruksjonsbetong, og dermed også større ettervekst etter 28 døgns alder. Dette har som regel liten eller ingen betydning for framdriften ved produksjon av massive konstruksjoner. Det kan i noen tilfeller være fornuftig å skyve kriteriet for samsvarsvurderingen av trykkfasthet fra 28 til 56 eller 90 døgns alder. Dette må i så fall avtales med byggherren i hvert enkelt tilfelle.

Flygeaske er normalt tilgjengelig som tilsetningsmateriale hos de største betongprodusentene, dvs. i de største byene. Små produsenter har ofte ikke tilstrekkelig silokapasitet til å kunne håndtere ekstra tilsetningsmaterialer som flygeaske, og trenger derfor tidlig varsling, og samtidig et visst produksjonsvolum for å kunne oppgradere blandedanlegget til produksjon av lavvarmebetong.

I andre land er det vanlig å produsere lavvarmebetong basert på slaggsement med høyt slagginnhold (>50%), eller portlandsement tilsatt en høy andel slagg ved blanding av betongen. Vi har lite erfaring med det i Norge, hovedsakelig fordi det har vist seg vanskelig å dokumentere tilfredsstillende frostbestandighet for betong med høyt slagginnhold.

Bruk av slaggsement med moderat slagginnhold (f.eks. CEM II/B-S) gir mulighet til å produsere betonger med lavt bindemiddelinhold, og det er derfor mulig å oppnå relativt lav varmeutvikling og samtidig tilfredsstillende frostbestandighet for slike betonger.

4.3 Erfaring med varmekabler

Bruk av varmekabler har vist seg å være relativt enkelt og effektivt tiltak ved produksjon av kulverter, vegg på stripefundament og andre typer konstruksjoner der det støpeavsnittet som forårsaker fastholdningseffekten er begrenset i utstrekning.

Ettersom varmekablene må installeres i tilstøtende konstruksjonsdel, må tiltaket planlegges og gjennomføres i god tid før oppstart av arbeidene på den konstruksjonsdelen som skal beskyttes mot opprissing. Omfanget av tiltaket og plassering av kablene bør fortrinnsvis planlegges ved hjelp av analyse, slik det er vist i kapittel 3.1.3. Normal innbyrdes avstand mellom kablene er 300–500 mm når kablene plasseres midt i tverrsnittet. Dersom tverrsnittstykkelsen er større enn ca. 800 mm vil det være fornuftig å vurdere mer enn 1 lag varmekabler, se eksempel i Figur 16.

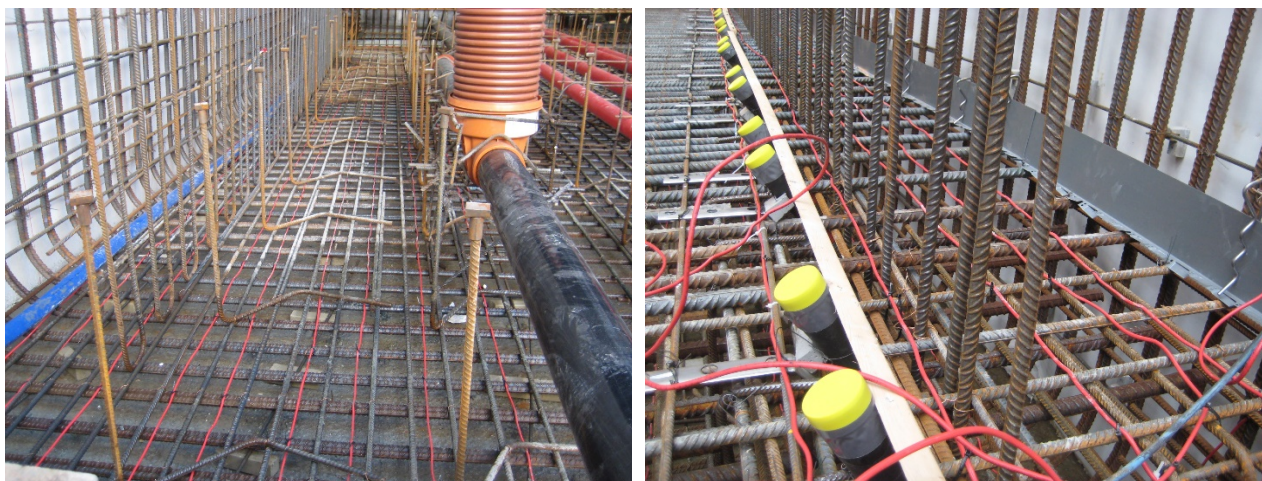
Det er vanlig å bruke enkle en-leder varmekabler til dette formålet. Optimal avgitt effekt vil normalt være i området 30–50 W/m kabel. Lavere effekt gir behov for tett kabelføring for å oppnå tilstrekkelig oppvarming, og større effekt kan gi lokal overoppheting. Ettersom påtrykt spenning er konstant, må ønsket effekt oppnås ved å tilpasse sløyfelengden til motstanden i kabelen. Slik tilpasning av sløyfelengden krever elektroteknisk kompetanse.

Varmekablene stripses normalt fast på armeringen, slik at de er beskyttet mot skade ved støp. Armeringsføringen er som regel ikke optimal mht. plassering av varmekablene i tverrsnittet. Det kan derfor være nødvendig å legge inn ekstra armering for montasje av varmekablene.

Eksentrisk plassering av varmekablene i ett lag, på hovedarmeringen, vil ofte gi en dårligere effekt på gjennomsnittlig temperaturøkning enn sentrisk plassering. Dersom kablene ønskes montert eksentrisk på den ordinære armeringen må dette også simuleres ved beregninger. Eksentrisk plassering av varmekabler i to lag (på uk og ok armering) vil i så måte gi vesentlig bedre effekt enn ett lag eksentrisk plassering, og sannsynligvis også vesentlig bedre enn ett lag sentrisk.

Kablene må føres ut av betongtverrsnittet på en slik måte at de beskyttet mot skadelig påvirkning, og slik at tilkobling av strøm er mulig i god tid før støp av tilstøtende konstruksjonsdel.

Varmekablene kobles til strøm noen dager før støp av den konstruksjonsdelen som skal dra nytte av tiltaket, og kobles fra etter at denne konstruksjonsdelen har oppnådd maksimaltemperatur. Optimalt til- og frakoblingstidspunkt kan bestemmes ved analyse. Det vil være en fordel å isolere overflatene på den konstruksjonsdelen som er under oppvarming, men det er ofte lite praktisk fordi oppvarmingen normalt skjer i en periode der det foregår forskalings- og armeringsarbeid på den tilstøtende konstruksjonsdelen.



Figur 16. Eksempel på montering av varmekabler i to lag i ei bunnplate; først på underkant armering (venstre) så på overkant armering (høyre). Foto: Statens vegvesen

4.4 Erfaring med kjølerør

Bruk av kjølerør er et mer omfattende og kostbart tiltak enn bruk av lavvarmebetong eller varmekabler, se kapittel 2. Det har likevel blitt brukt i en rekke prosjekter, f. eks ved støp av veggene i Operatunnelen, og nylig ved støp av pilarene til Lepsøybrua.

Normalt brukes 30 mm tynnveggede stålrør, men det er også mulig å bruke andre materialer og dimensjoner, forutsatt at rørene ikke gir isolasjonseffekt av betydning. Ved bruk av stålrør er det vanlig å bruke fleksible rør eller slanger i bend, og i inn- og utløp. Rør og koblinger bør tåle et vanntrykk på minst 5 bar. Rørsystemet må alltid trykktestes etter montering og før støp, for å

unngå lekkasjer inn i nystøpt betong. Rørene må monteres slik at man unngår skadelige trykkstøt og deformasjoner når vanntrykket settes på. Dette vil som regel kreve innfesting mot ordinær armering, eller mot tilleggsarmering.

Sløyfelengdene bør planlegges slik at kjølevannet ikke varmes opp mer enn ca. 5°C. Oppvarmingen av kjølevannet er avhengig av betongtverrsnittet, avstanden mellom rørene, betongtype, rørtverrsnittet, vanntrykket og gjennomstrømningshastigheten. For en 1 meter tykk vegg med 30 mm stålrør montert sentrisk med 500 mm innbyrdes avstand, og et tilgjengelig vanntrykk på 2–3 bar, vil dette gi en typisk sløyfelengde på 40 meter.

Kjølevannet er som regel tilgjengelig ferskvann, enten fra kommunalt nett, eller fra et lokalt vassdrag. Ved støp av veggene i Operatunnelen ble det brukt kjøleaggregat som tillot sirkulering av det samme vannet i hele nedkjølingsperioden. Det er også mulig å bruke sjøvann som kjøling, men dette stiller naturlig nok ekstra strenge krav til tetthet av rørsystemet, og til fullstendig tømming før gysing av rørene.

Ved støp av vegg kan rørene monteres horisontalt eller vertikalt. Vertikal montering er ofte mest hensiktsmessig, og gir den fordelen at sammenkoblingen av sløyfene i toppen av vegg kan skje utenfor betongtverrsnittet. Dette kan være praktisk når rørene skal blåses tomme for vann og gyses med grout.



Figur 17. Eksempel på monterte kjølerør (piler) over hele vegg høyden, sett ovenfra og ned. Kun de fire øverste kjølerørene i vegg ses på bildet.

Foto: Skanska, E18 Bjørvika Senketunnelen

Kjølingen startes ved oppstart av støpearbeidet. Kjølingen avsluttes normalt innen et døgn etter at støpeavsnittet har nådd maksimaltemperaturen. Langvarig nedkjøling vil kunne øke faren for opprissing, fordi nedkjølingen da vil skje hurtigere enn normalt og gi høye strekkspenninger før betongen har utviklet sin potensielle strekkfasthet.

Tømming av rørene etter avsluttet nedkjøling bør skje ved bruk av trykkluft. Rørene gyses med sementbasert grout etter anvisningene i Norsk Betongforenings publikasjon nr. 14 [7].

4.5 Erfaring med kald betong med isbiter som del av blandevannet

Produksjon av betong som skal ha tilsatt is er mer utfordrende enn normalt, og krever forprøving. I tillegg blir betongproduksjonen mer tidkrevende. Betongen må for eksempel blandes med redusert vannmengde noe som kan, hvis prosedyre ikke er innarbeidet, føre til klumper av sement, flygeaske, silikastøv og finstoff. Slike klumper er vanskelig å løse opp, også etter at isen er tilsatt.

Kontroll ved mottak bør være mer omfattende enn i hht. utførelsesklasse 3. Hver bil bør kontrolleres med tanke på temperatur, konsistens og luft.

I Bjørvikaprojektet, da veggene i Operatunnelen Sørenga-parsellen ble bygget i 2007, var det behov for kald fersk betong. Typisk fersk betongtemperatur på sommeren uten spesielle tiltak var 26–27 °C. Behovet for redusert fersk betongtemperatur ble bestemt fra beregninger av fastholdingspenninger i veggen (støpt mot bunnplate).

Det ble benyttet isbiter fra et isanlegg som produserte isbiter med størrelse ca. 40 x 30 x 20 mm³, se Figur 16 og Figur 17. Figur 18 viser tobben med veiecele som ble brukt til å fylle på is på betongbilen og opplegget som sørget for å skru isen ut fra lagercontaineren, samt den digitale vekten med utskrift som var tilknyttet veiecellen.

Det ble gjort utprøving for å se på nødvendig ismengde (temperaturreduksjonen) og hvor lang tid det tok før isen smeltet i betongbilen.

Basert på beregnet kjølebehov landet man her på 60 kg is pr. m³ betong, og det tok ca. 20 min før isen smeltet etter tilsetning. Endelig blandedprosedyre ble som følger:

- først ble 3 m³ betong blandet med 60 kg/m³ redusert vannmengde og tømt på bil
- bilen kjørte så til isanlegget som lå nærheten, og det ble fylt på 60 kg/m³ is via tobb.
- deretter ble betongen tromlet i 25 minutter, samtidig som den ble transportert til byggeplass og losset så raskt som mulig.

Registreringer av fersk betongtemperaturer er gitt i Tabell 3. Total temperaturreduksjon med 60 kg is pr. m³ ble ca. 7–9 °C, og regnet om til temperaturreduksjon pr 10 kg is ble effekten 1,1–1,5 °C.

Tabell 3 Effekt av 60 kg is pr m³ ved kjøling av betong, fra prøving på Bjørvikaprojektet.

	Bil 1	Bil 2	Bil 3	Bil 4
Temperatur før is, °C	26,1	23,3	25	24,6
Temperatur etter is, °C	17,8	16,6	16,1	17,1
Temperatur i luft, °C	14-16	14-16	14-16	14-16
Effekt av is, °C	8,3	6,7	8,9	7,5
Effekt av 10 kg is, °C	1,38	1,12	1,48	1,25



Figur 16. Is brukt til kjøling av betong

Foto: B. Kristiansen, AF Gruppen



Figur 17. Opplegg for produksjon av is

Foto: B. Kristiansen, AF Gruppen



Figur 18. Tobb med veiecelle (venstre) og digital vekt med utskrift (høyre).

Foto: B. Kristiansen, AF Gruppen



5 Dokumentasjon

5.1 Utstyr for å måle temperatur

Ved måling av temperaturforløp i herdende betong bruker vi vanligvis termoelementer. Dette måleprinsippet gir enkel installasjon og oppfølging, og lave kostnader.

Et termoelement er ganske enkelt en ledning med to forskjellige, isolerte ledere, der den ene enden avisoleres, slik at lederne kan tvinnes sammen for å gi elektrisk kontakt. Den andre enden kobles til et måleinstrument (i prinsipp et potensiometer med loggefunksjon). Til måling i betong bruker vi som regel termoelementer av type T, som har ledere av kobber og konstantan. Konstantan er en legering av kobber, nikkel og mangan.

Måleprinsippet er basert på den termoelektriske effekten. Når to ledere i forskjellige metaller kobles sammen, og hver ende utsettes for forskjellig temperatur, oppstår det en potensialforskjell (spenning) mellom de to koblingspunktene. Potensialforskjellen er tilnærmet proporsjonal med temperaturforskjellen mellom punktene. Når det ene koblingspunktet settes i et potensiometer med innebygget nullpunkt kompensasjon, kan det andre koblingspunktet dermed brukes til å måle temperatur, f. eks i herdende betong.

Figur 18 viser en datalogger av typen Testo T176 T4 med ett termoelement tilkoblet. Det finnes mange typer slike loggere som er egnet for måling av temperatur i betongkonstruksjoner. De fleste er basert på batteridrift. Dette er praktisk, og gir også god målesikkerhet. Den termoelektriske effekten gir små potensialforskjeller, og er dermed følsom for forstyrrelser i strømmettet eller påvirkning fra annet elektrisk utstyr.

Det er derfor også viktig at måleenden på termoelementet ikke er i elektrisk kontakt med armeringen, som ofte brukes som jording for sveiseapparater.

Denne typen dataloggere med termoelementer trenger normalt ikke kalibrering, men det er en god ide jevnlig å kontrollere at utstyret gir pålitelige resultater ved å måle temperaturen i en beholder med vann og isbiter, og i kokende vann. Hvis resultatene avviker fra 0°C og 100°C kan det enten være en indikasjon på at lederne er koblet feil i konnektoren i loggeren (kobber skal kobles mot kobber, og konstantan mot konstantan), eller at det er en feil i potensiometeret i dataloggeren. I det siste tilfellet må loggeren skiftes ut.

Legg merke til at den frie ledningsenden i termoelementet i Figur 18 er avisolert, og at lederne er tvunnet sammen. Dette er en forutsetning for at termoelementet skal kunne fungere. Den frie ledningsenden støpes inn i det punktet i betongen der vi ønsker å følge temperaturforløpet.



Figur 18. Datalogger av typen Testo T176T4 med termoelement

Den loggeren som er vist på bildet har fire kanaler, og kan dermed logge temperaturen i 4 punkter samtidig. Slike loggere har lang batterilevetid og stort minne, og vi kan derfor velge den loggefrequensen og loggeperioden som passer best til vårt formål. Loggefrequensen settes ofte til 15 eller 30 minutter. Det er mulig å bruke en høyere loggefrequens, men dette gir større og mer uhandterlige datafiler. Når temperaturmålingen er avsluttet kobles loggeren mot en PC, slik at data kan hentes ut, analyseres og eventuelt sammenstilles mot temperaturberegningene. Enkelte loggere gir mulighet til å hente ut data underveis i måleperioden.

Det finnes også dataloggere med SIM-kort, som kan kommunisere temperaturdata løpende over telefonnettet. Dette reduserer behovet for fysisk oppfølging av målingene på byggeplass, og kan i mange tilfeller være praktisk for å få tidlige indikasjoner på tendenser i temperaturforløpene.

Vanligvis er loggeperioden relativt kort, typisk en uke. Hvis det er ønskelig å følge temperaturforløpet lenger kan det være en god ide å beskytte termoelementet med en dråpe epoksy i koblingspunktet. Dette sikrer at det alkaliske miljøet i betongen ikke forstyrrer den metalliske kontakten i termoelementet.

Når termoelementet skal støpes inn må ledningen beskyttes mot tilfeldig påkjenning fra betong og vibrator. Det er vanlig å bruke standard elektrikerstrips for å feste ledningene til armeringen. Dataloggeren bør plasseres slik at den er beskyttet mot nedbør og annen fukt, og slik at den er skjermet fra direkte sollys. Utstyrsleverandørene har gode løsninger med tette plastbokser for dette formålet.

Når målingen avsluttes klippes termoelementledningen ved betongoverflaten, og den resterende ledningen kan brukes som termoelement på nytt etter at enden er avisolert og tvunnet sammen.

5.2 Montering av termoelementer og registrering av endelig plassering

Elektrikerstrips er praktisk å bruke til å feste termoleddninger til armering.

Når termoelement er endelig montert er det viktig å registrere nøyaktig plassering i konstruksjonen, og ekstra viktig i de tilfeller der målinger skal sammenliknes med temperatursimuleringer. Avstand til allerede montert forskaling og avstand til underlag er praktiske referansepunkter. Angivelse av plassering på tegning er nyttig.

Ved montering av termoelementer inne i konstruksjonen, og rasjonell ledningsføring ut til logger, kan det være nødvendig å samordne dette med armeringsleggingen for å få nødvendig tilgang. Dette bør vurderes og planlegges på forhånd.

Figur 19 viser eksempel på bruk av ekstra bøylearmering til feste av termoelementer i tre nivåer i ei bunnplate. Bøylene må festes godt i sin endelige plassering. Figur 20 viser eksempler på plassering av termoelementer i to vegger, i ulike nivåer i senter og ved ytterste lag armering.

Måling av temperatur lenger ut enn ytterste armering kan gjøres direkte fra overflaten for uforkalt overflate. Mot forskalte flater er det mer utfordrende, men bruk av ikke-metallisk materiale i overdekningssonen til feste av termoelement er en mulighet. Ledningen kan så trekkes inn i konstruksjonen, så opp og ut i toppen.



Figur 19. Bunnplate: Eksempel på montering (venstre) og endelig plassering (høyre) av termoelementer i tre nivåer på armeringsbøyle. (Foto: Statens vegvesen)



Figur 20. Vegg: Eksempler på plassering av termoelementer og målepunkter (piler) i to vegger. (Foto: Statens vegvesen)

5.3 Måling av maksimums- og minimumstemperatur

Ved enkel kontroll av temperatur i en konstruksjonsdel vil normalt de mest aktuelle punktene å måle temperatur i være der det forventes:

- Maksimumstemperatur; dette vil normalt være i midten av tverrsnittet
- Minimumstemperatur;
 - overflater mot forskaling (vegg) og etter avforskaling
 - uforskalte horisontale overflater
- Samt lufttemperaturen

Montering av termoelementer i senter og over tverrsnittet ut til ytterste armeringslag er relativt greit fordi det er armering til å feste i, og det er muligheter for å sette inn ekstrajern for å skape feste. Montering i betongens overflateområde er mer utfordrende ettersom overdekningssonen ikke har armering og ekstrajern ikke kan settes inn. Et alternativ kan være ikke-metallisk forlengelse av armering ut i overdekningssonen.

Maksimal temperaturdifferanse i et tverrsnitt er forskjellen mellom høyeste og laveste temperatur over et tverrsnitt (se neste avsnitt). For spesielt massive konstruksjoner er maksimumstemperaturen interessant i seg selv ettersom det er et generelt krav om at herdetemperaturen i betongkonstruksjoner ikke skal overstige 70 °C (ref. NS-EN 13670+NA [8]). Minimumstemperaturen er også i seg selv nyttig å følge opp ved støp i minusgrader ettersom

fersk betong ikke må fryse. Her er det generelle kravet at betong ikke må falle under 0 °C før den har oppnådd en fasthet på 5 MPa. For eksempel uforskalt veggtopp, hjørner, områder med ustikkende armering/mye innstøpingsgoods, og langvarige støp av plater/dekker kan være områder og situasjoner hvor det kan være fare for frost i fersk betong vinterstid.

5.4 Temperaturdifferanser over tverrsnittet (indre fastholding)

Statens vegvesens håndbok R762 angir krav (ved spesiell beskrivelse) til maksimalt 20 °C temperaturdifferanse over tverrsnittet (se kapittel 8.2). For store temperaturdifferanser mellom kjerne og overflate gir riss i overdekningssonen, gjerne i form av krakelering. Dette kalles indre fastholding og er nærmere forklart i kapittel 7.

Isolasjon på overflaten er et effektivt tiltak for å begrense temperaturdifferansen. Betong med redusert varmeutvikling vil få lavere maksimumstemperatur, dette vil naturligvis også bidra til redusert temperaturdifferanse. Eksempel på riss i bunnplate som ble utløst på grunn av for tidlig fjerning av isolasjon, og for store temperaturdifferanser over tverrsnittet, er gitt i Figur 21. Der isolasjonen fikk ligge lenge nok ble det ikke riss. Rissene er i dette tilfelle orienterte, noe som ofte opptrer i bunnplater. I for eksempel vegger kommer slike riss helst som krakelering. Rissene tar til seg fukt og ses best etter regnvær når betongen tørker og fukt henger igjen i rissene. Ved kalkutfelling kan de etter hvert ses mer permanent.



Figur 21. Eksempel på riss i ok bunnplate pga. temperaturdifferanser over tverrsnittet. Fra vinterstøp med isolasjon på overflaten etter støp, men isolasjonen ble fjernet ved en feil etter ett døgn. Foto: Statens vegvesen

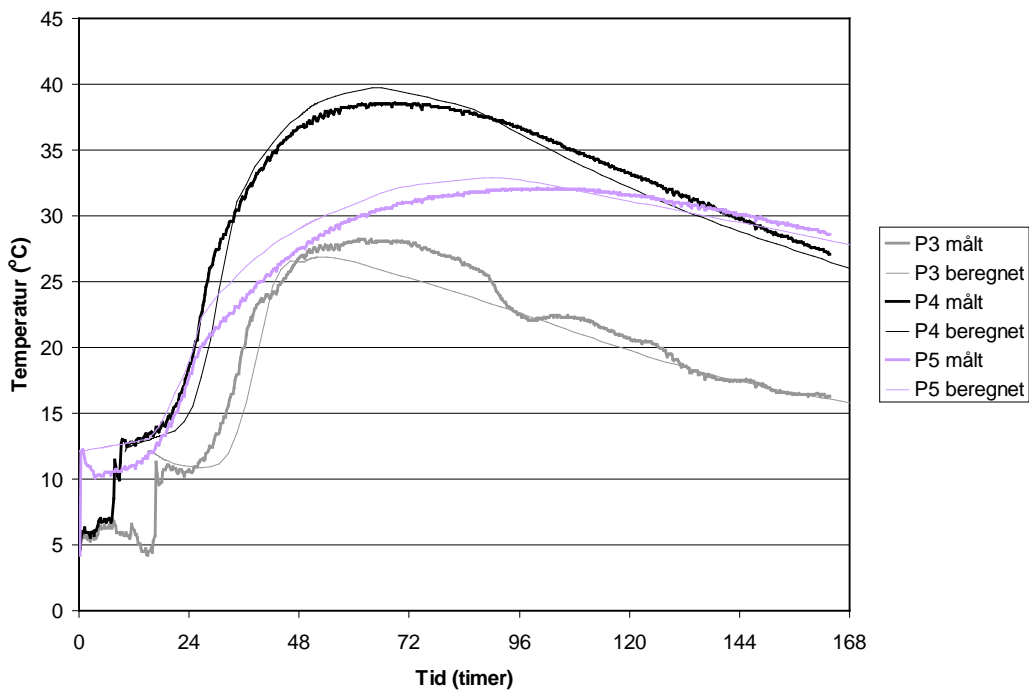
Det å isolere overflaten for å hindre riss i overdekningssonen (indre fastholding) må ikke forveksles med tiltak for å redusere temperaturforskjell mot tilstøtende konstruksjonsdeler (ytre fastholding). For ytre fastholding vil isolasjon på overflaten i prinsippet virke negativt ettersom dette også vil øke maksimumstemperaturen og dermed øke temperaturforskjellen mellom ny og gammel konstruksjon. Den negative effekten av isolasjon på ytre fastholdingseffekter trenger imidlertid ikke være særlig stor, og kan for den spesifikke situasjonen eventuelt kvantifiseres ved simuleringsberegninger.

5.5 Temperaturforskjell mellom ny og gammel konstruksjon

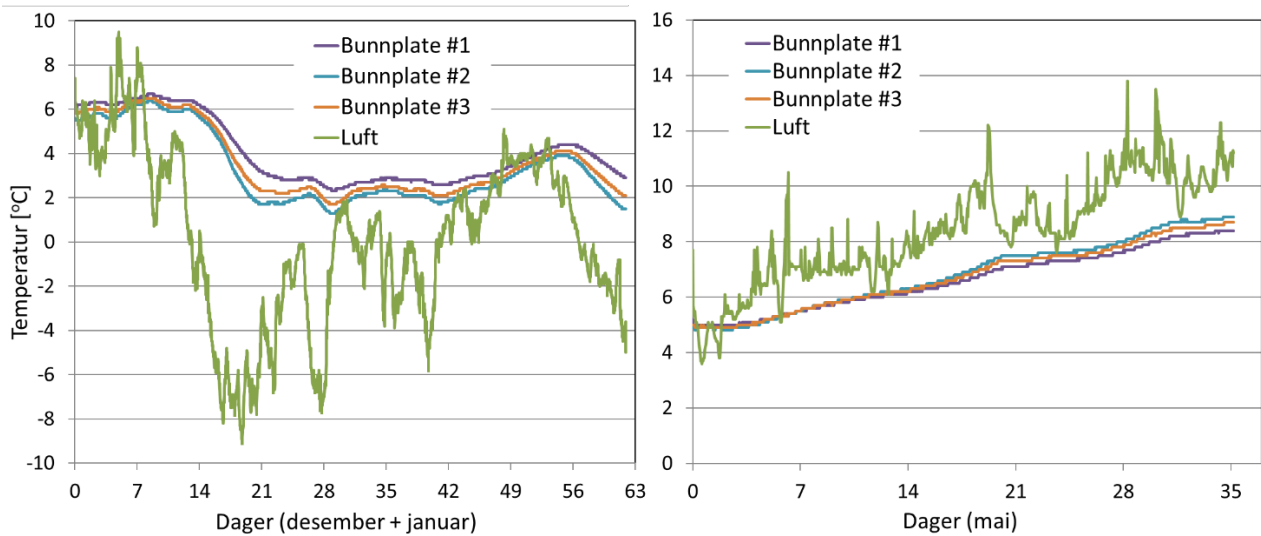
Statens vegvesens håndbok R762 angir krav (ved spesiell beskrivelse) til 15 °C maksimum differanse mellom gjennomsnittstemperaturen til nystøpt konstruksjonsdel i forhold til eksisterende/gammel konstruksjonsdel det støpes mot, se kapittel 8.2. Dette er relatert til å begrense spenninger (gjennomgående riss) på grunn av ytre fastholding, se kapittel 7 for nærmere forklaring av ytre fastholding.

Nystøpt konstruksjonsdel: Det går ikke an å måle en gjennomsnittstemperatur, men via noen temperaturmålinger over tverrsnittet kan man i ettertid få et grovt anslå på hva maksimum gjennomsnittstemperatur var. For å få et godt estimat på gjennomsnittstemperaturen før støp må man gjøre temperatursimuleringer som muliggjør presentasjon av beregnet gjennomsnittstemperatur. Simuleringene kan i ettertid verifiseres mot de punktene i konstruksjonen hvor man har målt temperaturen, se eksempel i Figur 22.

Gammel konstruksjonsdel: Det er vanlig å anta at gammel konstruksjonsdel er i likevekt med lufttemperaturen. Konstruksjonsdelen vil imidlertid normalt være støpt mot underlag eller mot fjell og temperaturen vil til en viss grad være påvirket av grunnvarmen. Det er derfor grunn til å anta at gammel konstruksjonsdel om sommeren vil være noe kaldere enn lufttemperaturen, og ved kalde vinterperioder være noe varmere enn lufttemperaturen. Faktiske målinger på denne sammenhengen er mangelvare, men i Figur 23 gis et eksempel på langtidsmåling av temperatur i en og samme bunnplate vinter og vår.



Figur 22. Eksempel på målt og beregnet temperatur i tre punkter i en herdende konstruksjonsdel. Ref: Skanska, E18 Bjørvika Senketunnelen.



Figur 23. Langtidsregistrering av temperatur i gammel bunnplate (tre punkter i ulik høyde) og lufttemperatur gjennom 2 mnd. på vinter (venstre) og i mai (høyre). Vinter: bunnplata var i gjennomsnitt 3,5 °C varmere enn lufta. Mai: bunnplata var i gjennomsnitt 1,6 °C kaldere enn lufta. Ref: Statens vegvesen, E6 øst Strindheimtunnelen, Dagsone vest

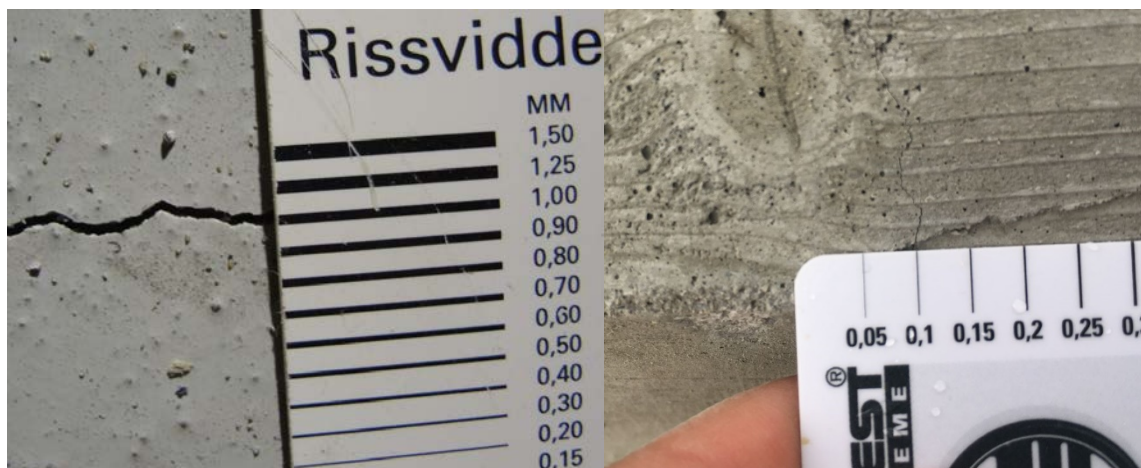
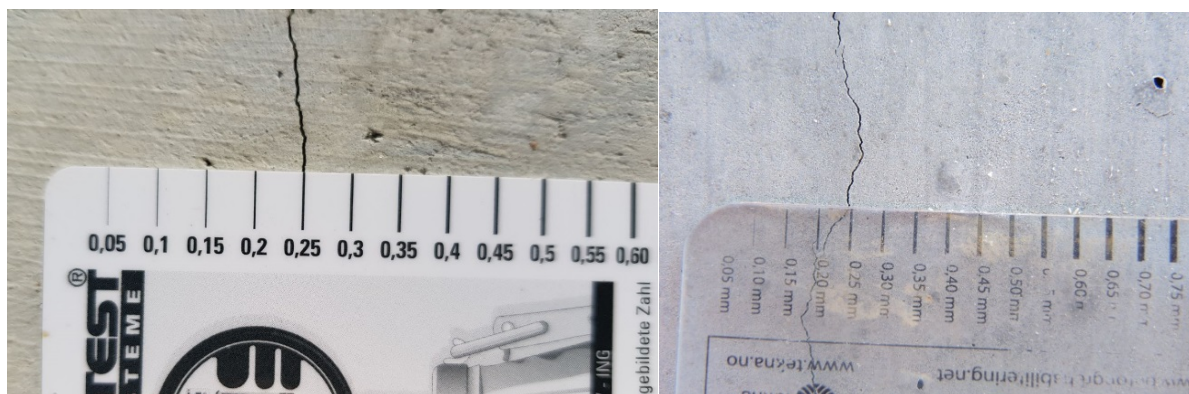
5.6 Rissregistrering

Gjennomgående riss på grunn av ytre fastholding er gjerne orientert normalt på støpeskjøten. For en vegg på bunnplate betyr det at rissene i veggen ofte er vertikalt orienterte, men kan også være skråstilte spesielt mot veggene. Ved kontaktstøp mot fjell har rissene gjerne tilfeldig orientering ettersom det er fastholding fra en flate (to dimensjoner) og fjelloverflaten er ujevn. Måling av rissvidder gjøres tidligst etter at temperaturen i betongen er kommet i likevekt med omgivelsene. En rissviddemåler benyttes for å finne nøyaktig rissvidde på rissene. Rissene lokaliseres systematisk; hvor de er lokalisert på konstruksjonen, rissvidde, orientering og lengde, se Tabell 4 og Figur 19.

En annen måte å gjøre det på er å ta tegningene av konstruksjonsdelen, tegne inn rissene og skrive inn målte verdier direkte på tegningen.

Tabell 3 Eksempel på skjema for dokumentasjon av riss

Dato:	Støpedato:			Kontrollør:	
Nr.	Rissvidde [mm]	Risslengde/høyde [m]	Orientering	Sted	Kommentar
1	0,2	2	30 ° skråstilt mot ende	Akse xx	
2	0,3	Hele vegghøyden	Vertikal	Akse xx	Lekkasje ved regn
3	0,2	2	30 ° skråstilt mot ende	Akse xx	



Figur 24 Ulike rissviddemålinger. Foto: Veidekke

Riss på grunn av temperaturdifferanser over tverrsnittet (indre fastholding) vil i stor grad lukke seg når konstruksjonen avkjøles og kommer i likevekt med omgivelsene, og dermed ikke mulig å måle. Rissene er oftest tilfeldig orienterte (krakelering) og kan observeres ved at fukt henger igjen ved tørrvær etter en periode med regn. I tillegg er kalkutslag i rissene ikke uvanlig etter en viss tid.

5.7 Kalibrering av beregninger

Resultatene fra analysen av faren for termisk indusert opprissing kan aldri bli helt presise. Det vil alltid være en viss usikkerhet både i materialdata, den geometriske modellen og ikke minst i beskrivelsen av randbetingelsene.

I tidlig fase, dvs. ved prosjektering og ved produksjonsplanlegging, er alle materialdata erfaringsbasert. I denne fasen er analysene derfor best egnet til å studere effekten av tiltak, slik vi har gjort i kapittel 3, og velge hovedprinsippene for de tiltakene som skal settes i verk på byggeplassen. I byggefasen er materialdataene som regel en kombinasjon av målte verdier for den aktuelle betongen, og erfaringsdata for lignende betongtyper, og kan derfor ikke forventes å være helt representative.

I byggefasen kan imidlertid usikkerheten reduseres betydelig ved løpende å bruke måldata og observasjoner fra byggeplass til å kalibrere beregningene. Slik kalibrering bør gjøres i to trinn.

1. Temperaturforløpet i konstruksjonen kan sammen med det autogene svinnet sies å representere belastningen som forårsaker strekkspenninger, og dermed fare for opprissing. Ved sammenstilling av det beregnede temperaturforløpet med målt temperaturforløp i de første støpeavsnittene kan temperaturberegningene kalibreres slik at de representerer riktig input for spenningsberegningene. Tilpasningen bør være basert på minst to målepunkter, et i kjernen av den herdende konstruksjonen, og ett i nærheten av overflaten. Målepunktene må måles nøyaktig inn for å kunne sammenstilles med beregningene. Beregningene tilpasses ved å justere betongens varmeledningsevne, konveksjonstallene for overflatene, og betongens varmetutvikling. I de aller fleste tilfellene vil det på denne måten være mulig å skape godt samsvar mellom målt og beregnet temperatur både i kjernen, og ved overflaten. Når de tilpassede parameterne i temperaturberegningen så brukes for å beregne temperatur- og spenningsforløp for senere støpeavsnitt vil denne kalibreringen bidra til å redusere usikkerheten i beregningen av rissindekser. Eksempel på kalibrering er tidligere vist i Figur 22.
2. Opprissingstendensen i de første støpeavsnittene i konstruksjonen kartlegges og sammenlignes med de oppdaterte beregningene av rissindekser.
 - Ingen observerte riss vil bety at den reelle rissindeksen er lavere enn 0,75
 - Et lite antall riss (typisk ett eller to riss for hver vegg-etappe) med rissvidder i størrelsesorden 0,1 mm vil bety at den reelle rissindeksen er i området 1,0
 - Flere riss per støpeavsnitt og rissvidder på 0,2 mm eller mer vil bety at reell rissindeks er større enn 1,0

Når temperaturberegningen er kalibrert kan spennings- og rissindeksberegningen tilpasses rissobservasjonene ved å justere betongens strekkfasthet i beregningsprogrammet. Den justerte strekkfastheten brukes så i beregningene for senere støpeavsnitt, og gir dermed et bedre grunnlag for å velge tiltak for å begrense videre opprissingstendens.

6 Reparasjon av riss

Riss som har oppstått i på grunn av ytre fastholding i byggefasen er som regel gjennomgående, og kan dermed være vannførende og potensielt lede aggressiver som klorider inn til armeringen. Når slike riss først har oppstått er det kravene til konstruksjonens funksjon (tetthet) og bestandighet som avgjør hvilke tiltak som må settes i verk. Det er knyttet usikkerhet til om riss med små rissvidder kan forårsake kloridinitiert armeringskorrosjon av betydning ved at sjøvann trenger inn til armeringen via rissene. I praksis er det vanlig å kreve utbedringstiltak når rissviddene er større enn 0,3 mm.

Riss med rissvidder mindre enn 0,3 mm vil ha en tendens til selvetting, ved at fri kalk fra betongvolumet felles ut i rissene, og karbonatiserer eller reagerer med ioner i lekkasjevannet. Tendensen til utfelling og selvetting avtar potensielt noe ved bruk av lavvarmebetong, fordi slike betonger har et redusert kalkoverskudd. Praktisk erfaring fra blant annet Operatunnelen har vist at utfellingstendensen likevel er stor nok at riss med begrenset rissvidde får permanent tetting, i alle fall ved eksponering mot sjøvann.

Tendensen til tetting ved utfelling i rissene kan forsterkes ved påføring av alkalisilkat-løsninger (vannglass) på betongoverflaten, fortrinnsvis oppstrøms. Det finnes en rekke kommersielle tettingsprodukter av denne typen.

I konstruksjoner som har absolutte krav til tetthet, f.eks. bassenger og kjellervegger under grunnvannsnivå, er det vanlig på forhånd å legge inn waterstop, svellebånd eller injeksjonslanger i skjøtene blant annet for å sikre seg mot lekkasjer pga støpefeil og gjennomgående riss. Riss som har oppstått pga. ytre fastholding har ofte retning vinkelrett på skjøtene, og denne typen tettingstiltak er derfor lite effektiv mot fastholdingsriss. Se for øvrig Byggforskanvisning [3]

Gjennomgående riss med rissvidder større enn ca. 0,2 mm kan injiseres med epoxy eller polyuretan, men dette er en omstendelig og kostbar prosess, og ofte må rissene injiseres flere ganger for å oppnå full tettingseffekt. Når rissene er grove, med rissvidder større enn ca. 0,5 mm kan det være vanskelig å oppnå tilstrekkelig injeksjonstrykk til å fylle rissene fullstendig. Det kan da være nødvendig å sparkle rissåpningene med epoxy på motsatt side før injeksjonsarbeidet settes i gang.

7 Fastholding

7.1 Introduksjon

Fastholding og fastholdingsgrad (engelsk: degree of restraint) er samlebegrep som brukes til å beskrive konstruksjonsoppførsel i mange sammenhenger og for mange problemområder.

Fastholdt tøyning er spenningsgivende tøyning, og en overordnet beskrivelse er at fastholdt tøyning er differansen mellom «tøyningen konstruksjonen får til å gjennomføre» og «tøyningen konstruksjonen ønsker å gjennomføre».

Videre kan fastholdingsgraden defineres som forholdet mellom «fastholdt tøyning» og «tøyningen konstruksjonen ønsker å gjennomføre».

For å bidra til bedre forståelse og riktig bruk av fastholding i herdeteknologi er det hensiktsmessig med forklaring og definisjon av ulike effekter og uttrykk; i første rekke:

- Indre fastholding
- Ytre fastholding fra tidligere støpte konstruksjonsdeler (og støpeavsnitt)
- Ytre fastholding fra undergrunnen og tilstøtende fjell
- Generell definisjon av fastholdingsgrad

7.2 Indre fastholding

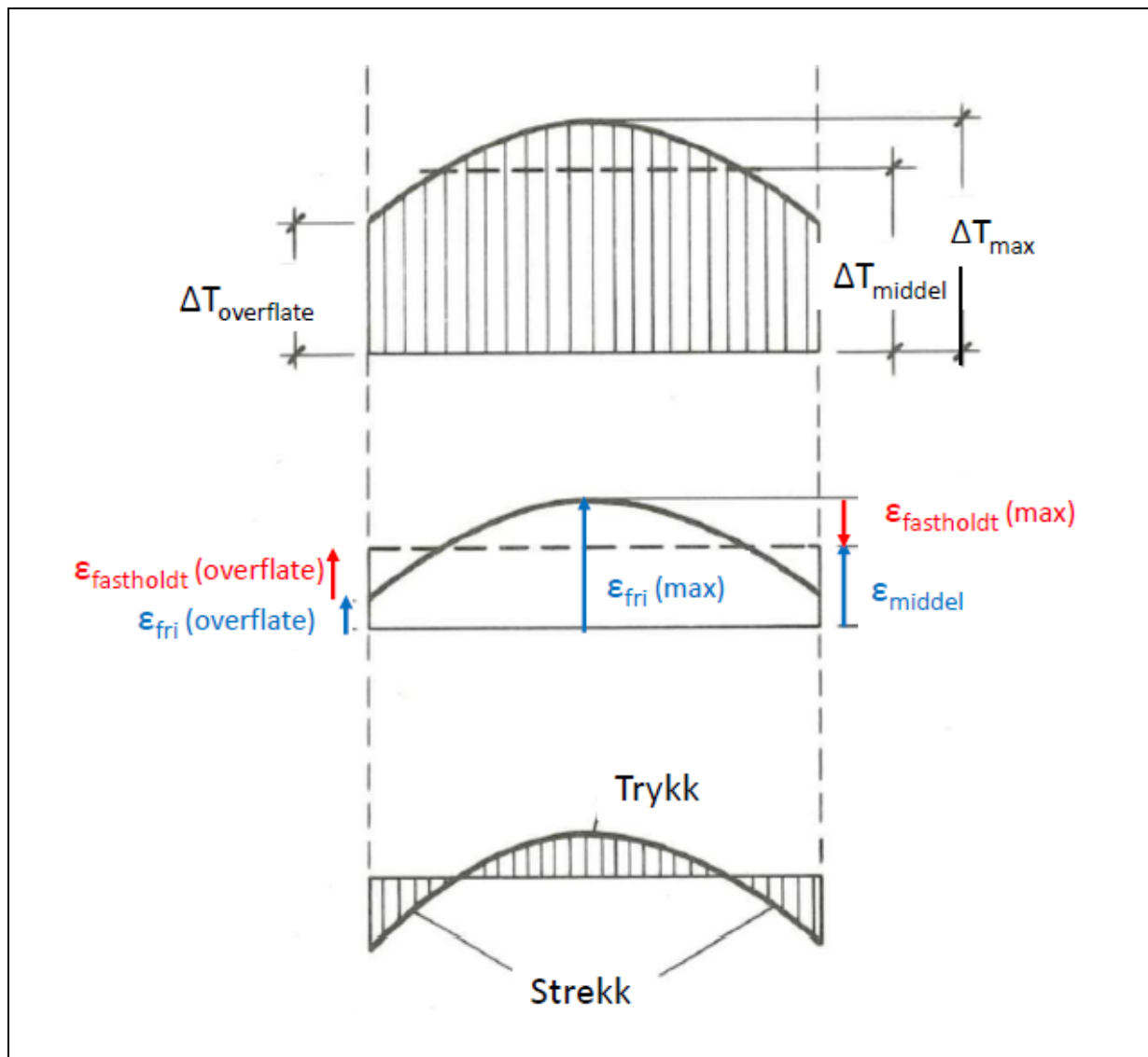
Dette begrepet kan illustreres ved egenspenningssituasjoner som for eksempel illustrert i Figur 25. I oppvarmingsfasen vil temperaturstigningen (ΔT) i det indre av betongen være større enn ved overflaten, og de indre delene vil derfor utvide seg mer enn betongen ved overflaten. Den frie temperaturtøyningen (ϵ_{fri}) er størst i midten, men pga kompatibilitetsbetingelsene (sammenhengen i materialet) er resultatet en gjennomsnittlig tøyning (ϵ_{middel}), og en utvidelse av konstruksjonselementet ($\delta = \epsilon_{\text{middel}} \cdot L$ (evt h)). Over tverrsnittet opptrer dermed en fastholdt (spenningsgivende) tøyning ($\epsilon_{\text{fastholdt}}$) og en spenning (σ) som kan bestemmes som:

$$\epsilon_{\text{fastholdt}}(y) = \epsilon_{\text{middel}} - \epsilon_{\text{fri}}(y) \quad \text{og} \quad \sigma(y) = \epsilon_{\text{fastholdt}}(y) \cdot E_{\text{ceff}}$$

Betongens E-modul (E_{ceff}) bør inkludere effekten av kryp. Fordi de indre delene ekspanderer mest blir det trykkspenninger inne i konstruksjonen, og strekkspenninger ved overflaten. Det kan også beskrives som om de ytre delene fastholder ekspansjonen inne i tverrsnittet og vice versa, derav begrepet indre fastholding. Når strekkspenningen ved overflaten når strekkfastheten vil vi få opprissing og overflateriss.

Akkurat samme situasjon for temperaturprofil, tøyning og spenning (som i Figur 25) oppnås også etter tidlig forskalingsriv; da avkjøles overflaten raskt i forhold til kjernen og det bygges opp strekkspenninger i overflaten.

I Statens vegvesens' prosesskode er det et krav om maksimal differanse mellom maksimum og overflatetemperatur på 20°C. Dette er utledet basert på antakelser om sinusformet temperaturfordeling (som vist i figuren) og at $\Delta T_{\text{middel}} = 0,65 \Delta T_{\text{max}}$.



Figur 25. Egenspenningssituasjon for illustrasjon av begrepet indre fastholding og risiko for overflateriss i ekspansjonsfasen. Situasjonen er tilsvarende også i kontraksjonsfasen (samt like etter forskalingsriving)

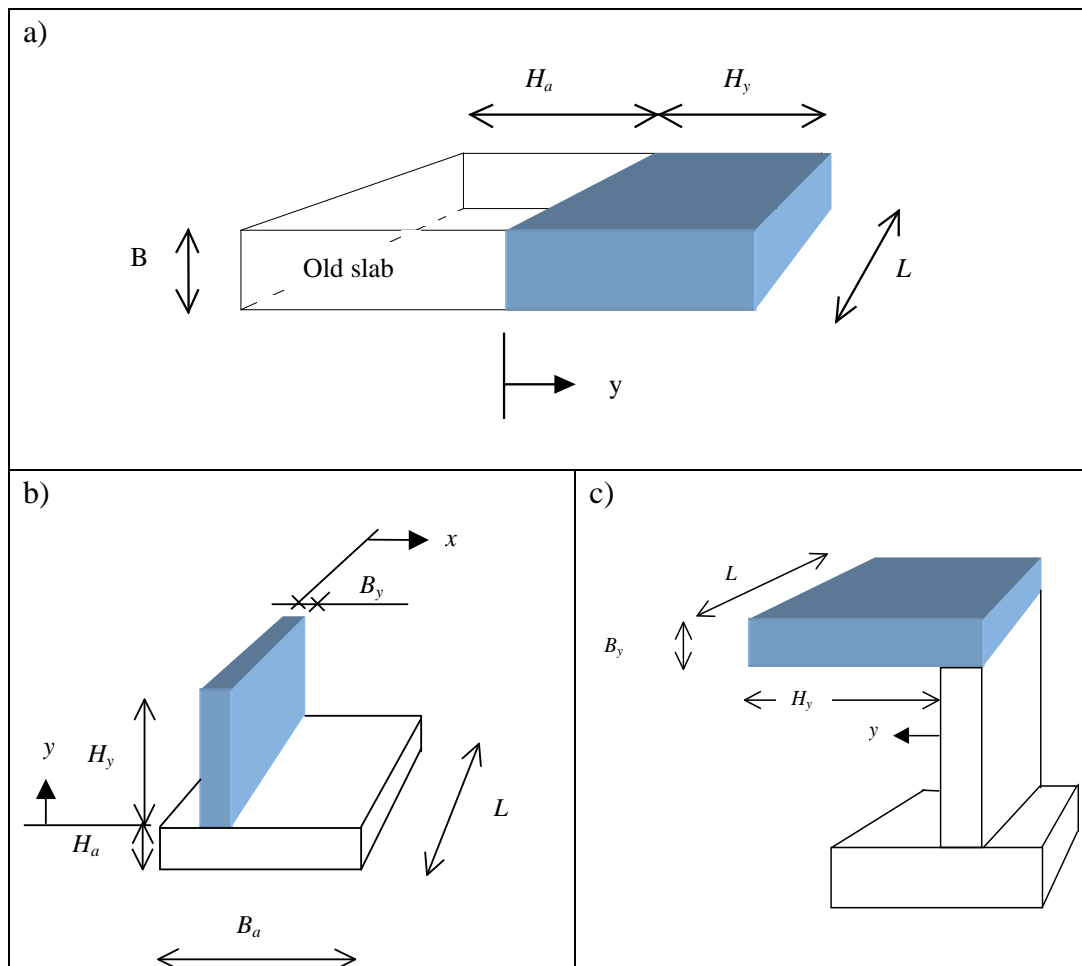
7.3 Ytre fastholding

Dette begrepet er svært generelt og omfatter fastholding fra tidligere støpeavsnitt og fra undergrunnen. Tre vanlige konstruksjonselementer og situasjoner hvor opprissing i herdefasen kan oppstå er: (a) Plate på mark fastholdt av tidligere støpeavsnitt, (b) Vegg fastholdt av fundament og undergrunn, (c) Topp-plate fastholdt av vegg, fundament og undergrunn som vist i Figur 26. Se kapittel 3 for beregningseksempler for tilfelle b).

Dersom den kritiske posisjonen (punktet med høyest rissindeks) antas å ligge en tverrsnittstykkelse vekk fra støpeskjøten er variasjonsområdet for fastholdingsgraden:

Vegg på fundament:	0.37–0.70
Plate på mark m/ støpeavsnitt:	0.05–0.52
Topp-plate:	0.12–0.52

Den kritiske posisjonen er avhengig av tverrsnittstykkelsen til den herdende konstruksjonen, og har avgjørende betydning for fastholdinggraden til et støpeavsnitt. Hvordan fastholdinggraden varierer med dimensjoner og posisjon i de aktuelle konstruksjonsdelene er grundig behandlet med parameterstudier i [9].



Figur 26. Typiske konstruksjonselementer og situasjoner hvor riss i herdefasen kan oppstå. a) Plate på mark fastholdt av tidligere støpeavsnitt, b) Vegg fastholdt av fundament og undergrunn, c) Topp-plate fastholdt av vegg, fundament og undergrunn [9].

Fasholding beskrives ofte som rotasjonsfasholding og en-, to- eller treaksiell fasholding. Her illustreres dette med utgangspunkt i vegg på stripefundament (som tidligere diskutert og simulert i kapittel 3.3). I programmet CrackTest COIN modelleres tverrsnittet av konstruksjonen et stykke fra endene, og i utgangspunktet er bare indre fastholding som tidligere vist i Figur 25, og ytre fastholding fra stripefundamentet inkludert i beregningene slik som illustrert i Figur 27-b.

I kontraksjonsfasen vil konstruksjonen deformere seg som vist i Figur 27-c. Her illustreres også de tre tøyingskomponentene: $\epsilon_{fri}(y)$, $\epsilon_{global}(y)$ og $\epsilon_{fastholdt}(y)$ som alle varierer over veggens høyde. Relasjonen mellom tøyingskomponentene er som angitt tidligere:

$$\epsilon_{fastholdt}(y) = \epsilon_{global} - \epsilon_{fri}(y)$$

Og spenningen kan forenklet uttrykkes som:

Praktiske råd og tiltak mot fastholdingsriss i herdende betongkonstruksjoner

$$\sigma(y) = \epsilon_{\text{fastholdt}}(y) \cdot E_{\text{ceff}}$$

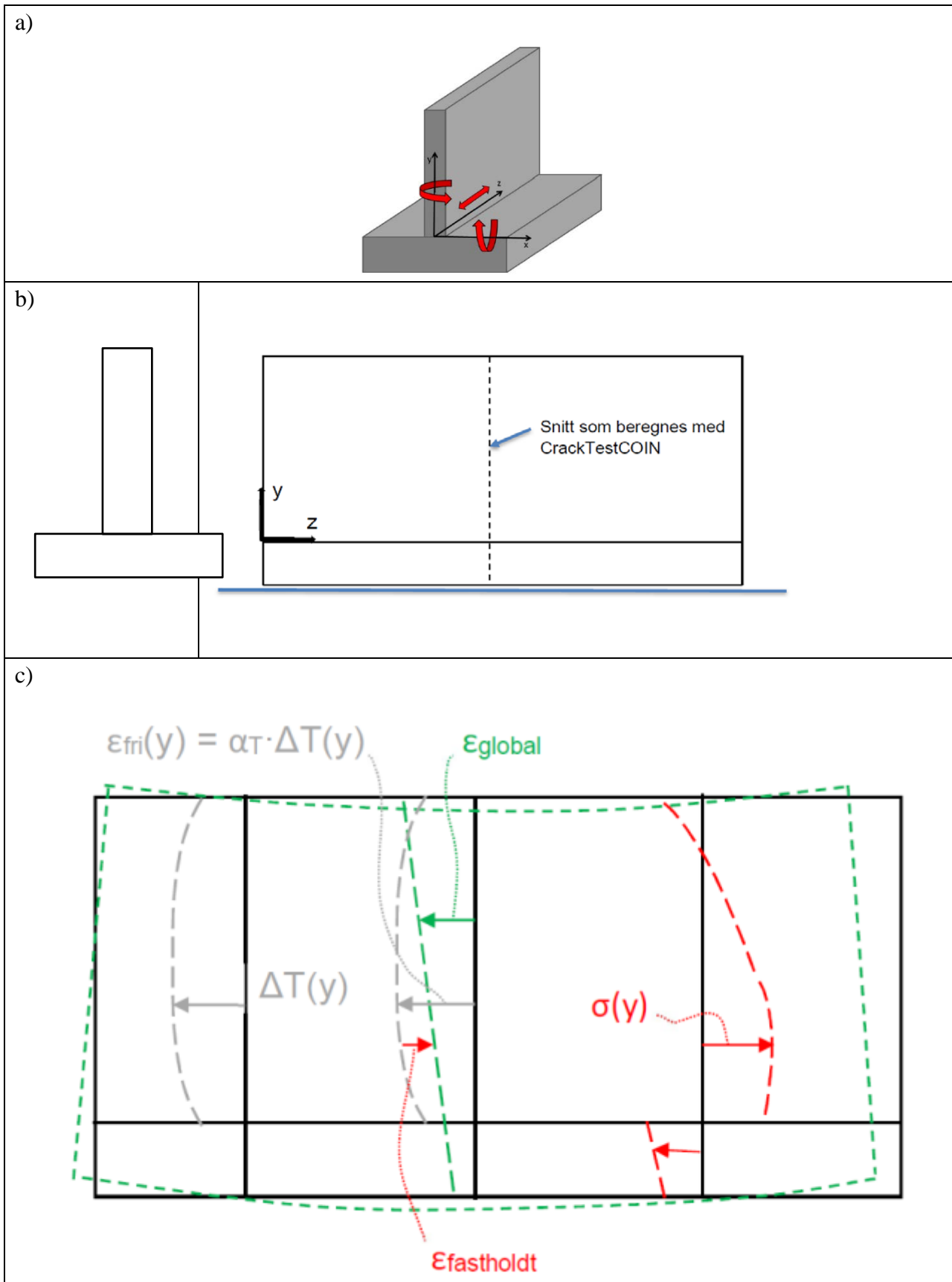
Resultatene viser at det oppstår strekkspenninger i veggen og trykkspenninger i fundamentet, og at strekkspenningene er størst ca. en veggtykkelse over fundamentet.

Fastholdingsgraden kan bestemmes som fastholdt tøyning dividert på fri tøyning:

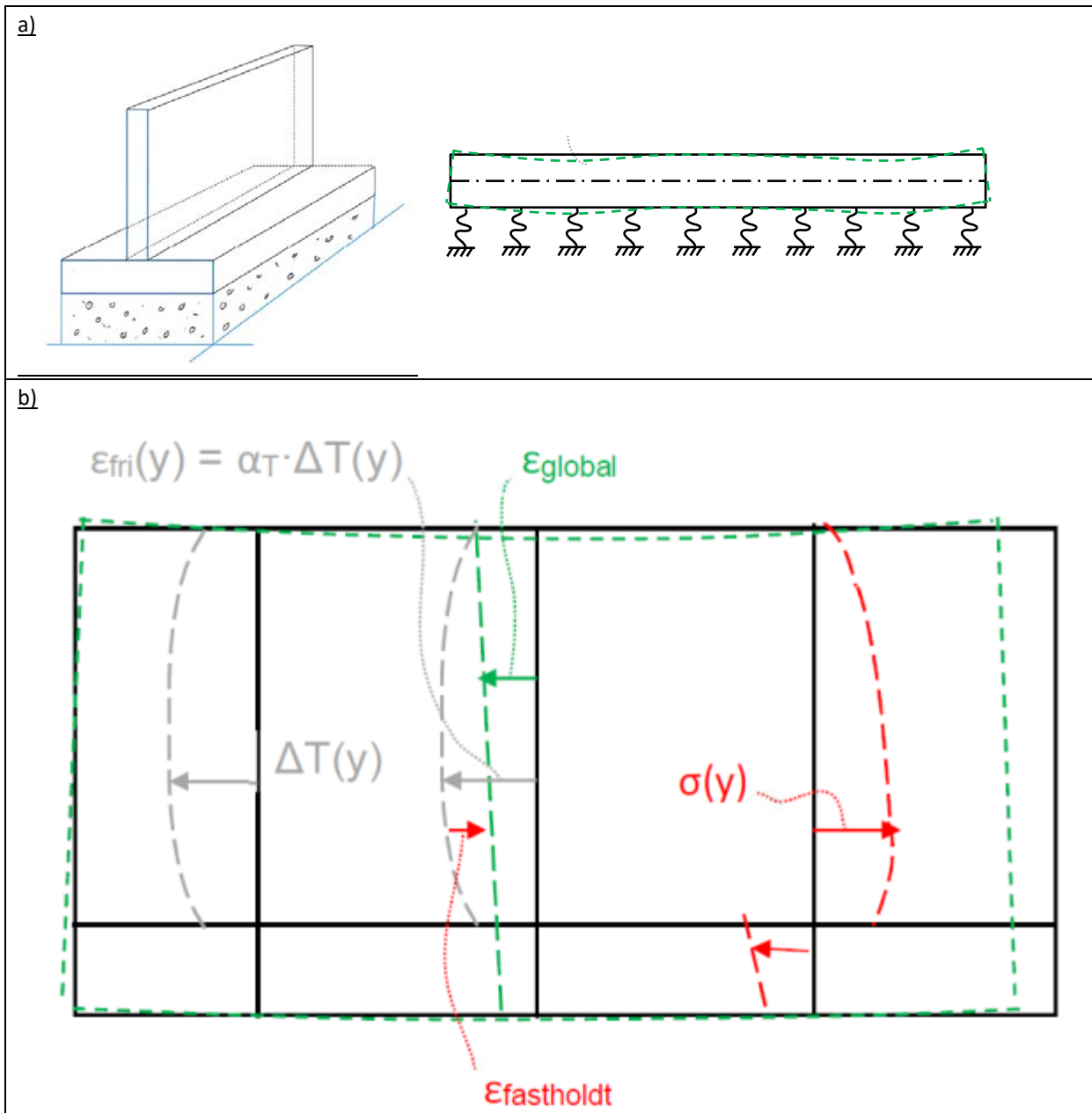
$$R(y) = \frac{\epsilon_{\text{fastholdt}}(y)}{\epsilon_{\text{fri}}(y)}$$

Og ettersom tøyningene varierer vil også fastholdingsgraden variere over konstruksjonen.

I Figur 28-a inkluderes effekten av undergrunnens stivhet. Konstruksjonen er understøttet tilsvarende en bjelke på elastisk underlag som vist på figuren. Konsekvensen relatert til Figur 27 er mindre vertikaldeformasjon og dermed en viss rotasjonsfastholding om x-aksen. Global tøyningfordeling over vegg høyden vil bli mer vertikal, og strekkspenningene fordeler seg høyere opp i veggen som illustrert i Figur 28-b.



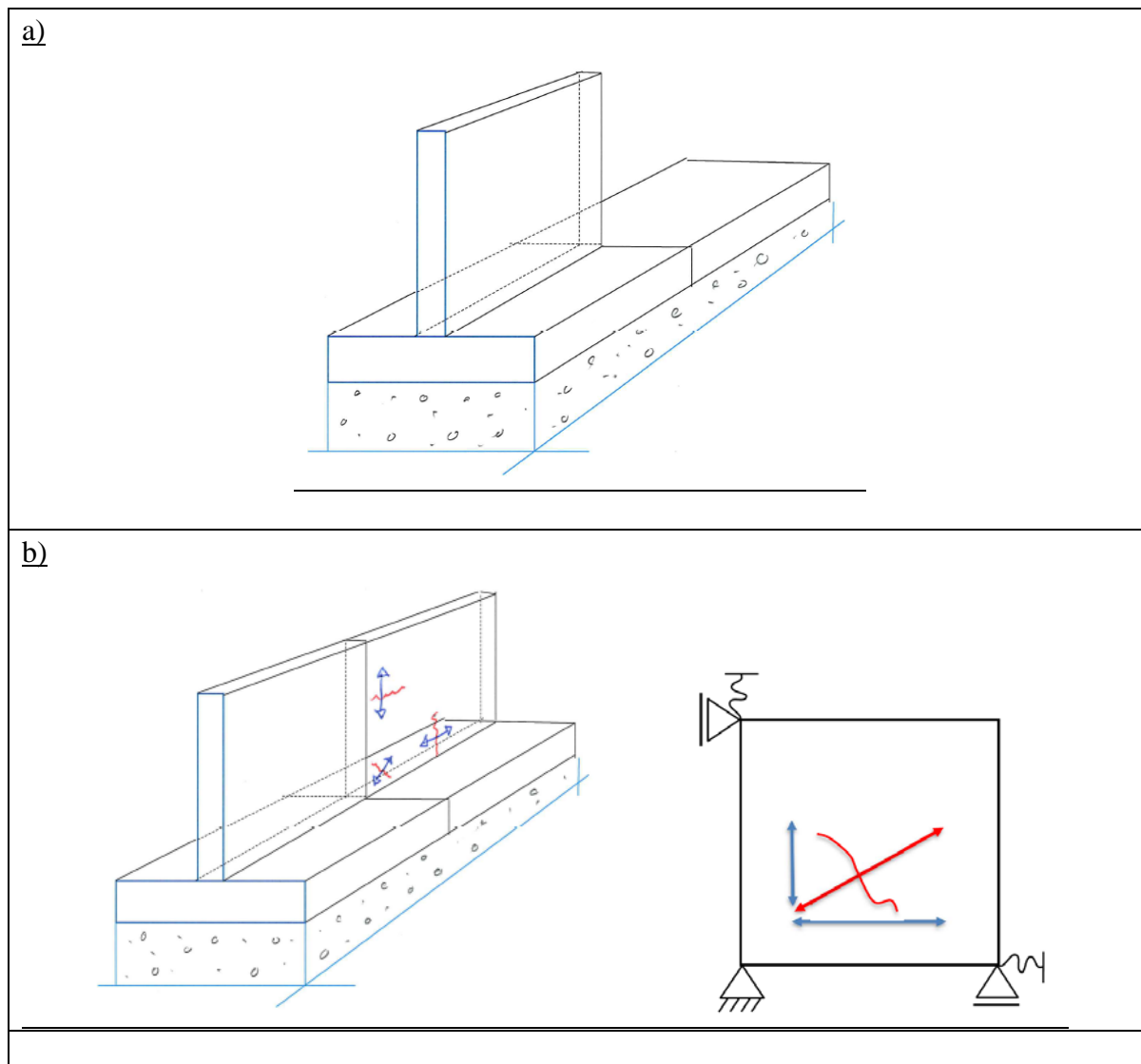
Figur 27. (a) Vegg fastholdt av stripefundament på underlag av grus/pukk, (b) System for beregningsprogram (CrackTestCOIN), (c) Deformasjoner, tøyninger og spenninger i avkjølingsfasen.



Figur 28. Illustrasjon av ytre fastholding. fra undergrunnen, a) Situasjonsbeskrivelse (b) bjelke på elastisk underlag, c) Vegg på stripefundament støpt på stiv undergrunn

I Figur 29-a illustreres effekten av at tidsskjemaet for støping av fundamentet ligger foran veggstøpen. Dette vil bidra til økt fastholding i lengderetningen (z), men også til økt rotasjonsfastholding om x-aksen. Dersom veggene er usymmetrisk plassert på fundamentet vil vi også få økt rotasjonsstivhet om y-aksen.

Figur 29-b viser fastholding fra tidligere veggstøp- etappe. Nederst i hjørnet hvor den nystøpte veggene er fastholdt horisontalt av fundentet og vertikalt av den forrige veggstøpen er fastholdingen 2-dimensjonal og kan være betydelig høyere enn midt på veggene.

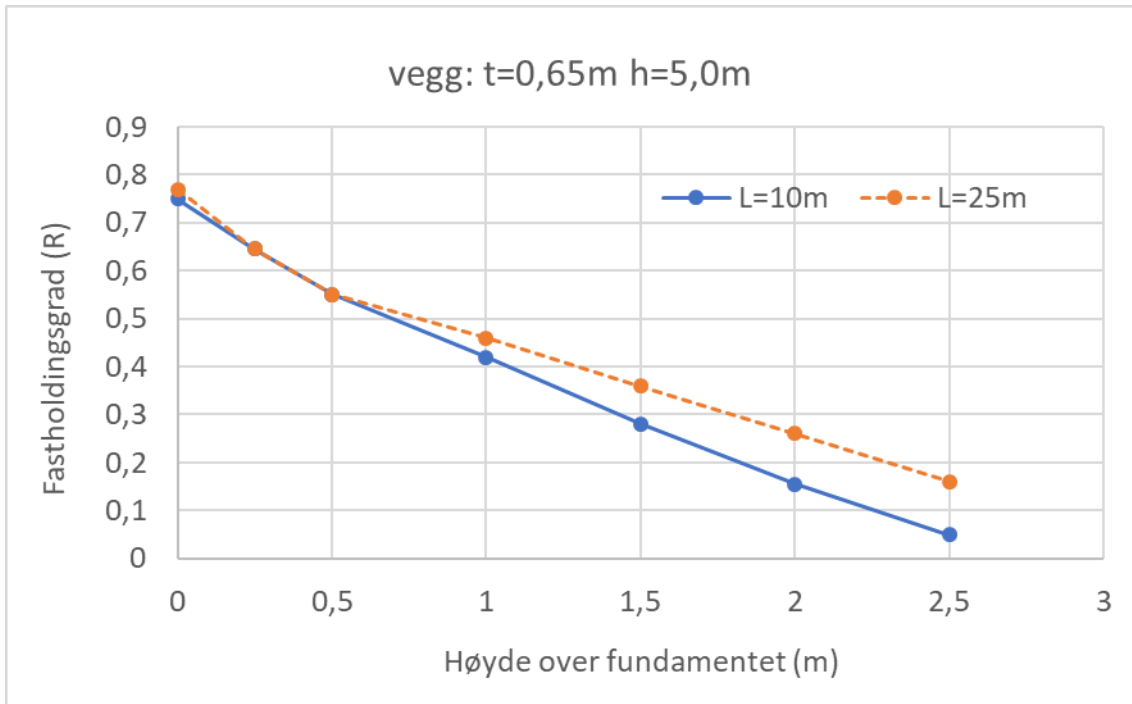


Figur 29 Illustrasjon av ytre fastholding. (a) Fastholding fra fundamentet tilhørende neste støpetappe, b) Illustrasjon av tilleggsfastholding fra tidligere veggstøp- etappe, og dermed en toaksiell fastholdings situasjon.

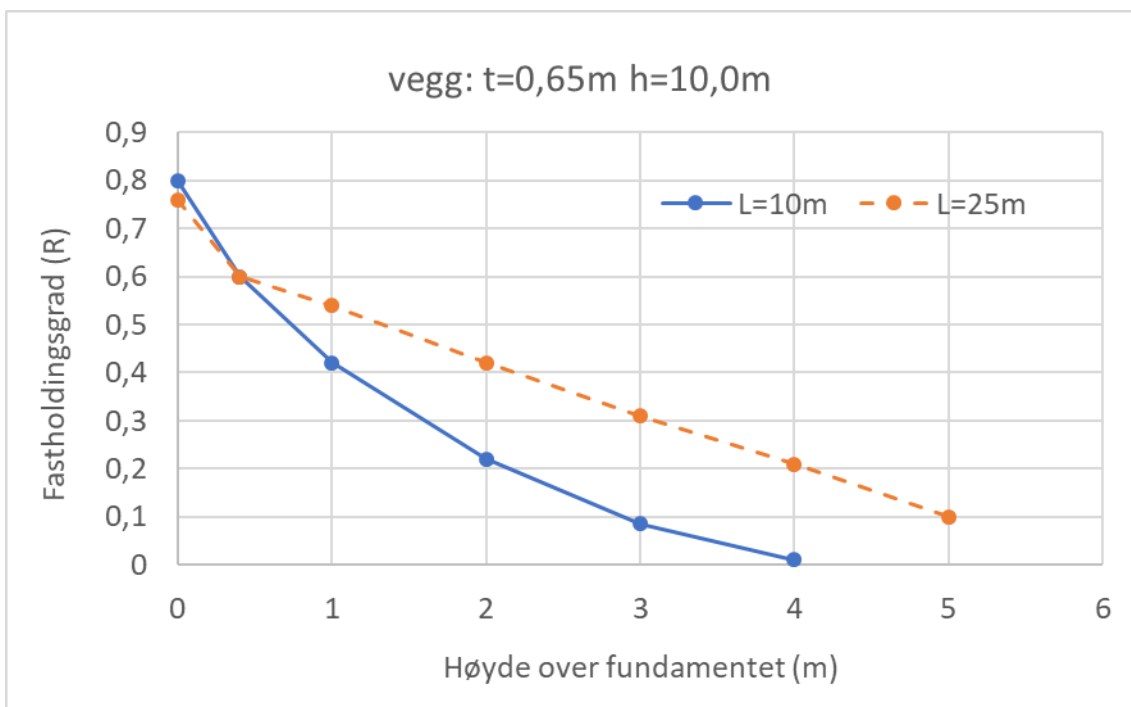
Figur 30 viser hvordan fastholdingsgraden varierer over vegg høyden for ulike veggdimensjoner. Figur 30-a viser situasjonen for vegger med tykkelse 0,65m, høyde 5,0m (inkl. fundament) og lengde 10m (2 ganger høyden) eller 25m (5 ganger høyden). Figur 30-b gjelder også tykkelse 0,65m, men høyde 10m, og lengder 10m (1 ganger høyden) og 25 m (2,5 ganger høyden).

Dersom den kritiske posisjonen (punktet med høyest rissindeks) antas å ligge en tverrsnittstykkelse vekk fra støpeskjøten, dvs 0,65m over fundamentet kan det sees at fastholdingsgraden varierer mellom 0,50 og 0,57 for de aktuelle dimensjonene, og at veggens lengde/høyde-forhold hovedsakelig påvirker fastholdingsgraden høyere opp i veggen.

a)



b)



Figur 30 Ulike Figur m. Beregnet fastholdingsgrad over vegghøyden. Veggtykkelse=0,65m. a) total høyde $h=5,0$ m, lengde, 5 og 25m, b) total høyde $h=10,0$ m, lengde, 5 og 25m.

7.4 Generell definisjon av fastholdingsgrad

Som diskutert tidligere kan fastholdingsgraden bestemmes som fastholdt tøyning dividert på fri tøyning:

$$R(x,y,z) = \frac{\varepsilon_{fastholdt}(x,y,z)}{\varepsilon_{fri}(x,y,z)}$$

Denne vil variere over den aktuelle konstruksjonsdelens geometri $f(x,y,z)$ og kan relativt enkelt bestemmes ved hjelp av lineær elastiske elementmetode analyser. For eksempel kan man sette på den samme frie tøyningen over hele den nystøpte konstruksjonsdelen:

$$\varepsilon_{fri}(x,y,z) = \alpha_T \Delta T, \text{ og } \Delta T = 10 \text{ grader}$$

Den fastholdte tøyningen, $\varepsilon_{fastholdt}(x,y,z)$, beregnes deretter av elementmetode programmet og fastholdingsgraden bestemmes som ovenfor.

Fastholdingsgraden kan også konkretiseres ved hjelp av en-aksiell ytre fastholding som vist i Figur 31; for fritt system i Figur 31-a ($R=0$), og for fullt fastholdt system i Figur 31-b ($R=1,0$). De aller fleste virkelige system ligger mellom disse og kan illustreres som vist i Figur 31-c. Uttrykt med størrelsene i denne figuren kan fastholdingsgraden defineres som:

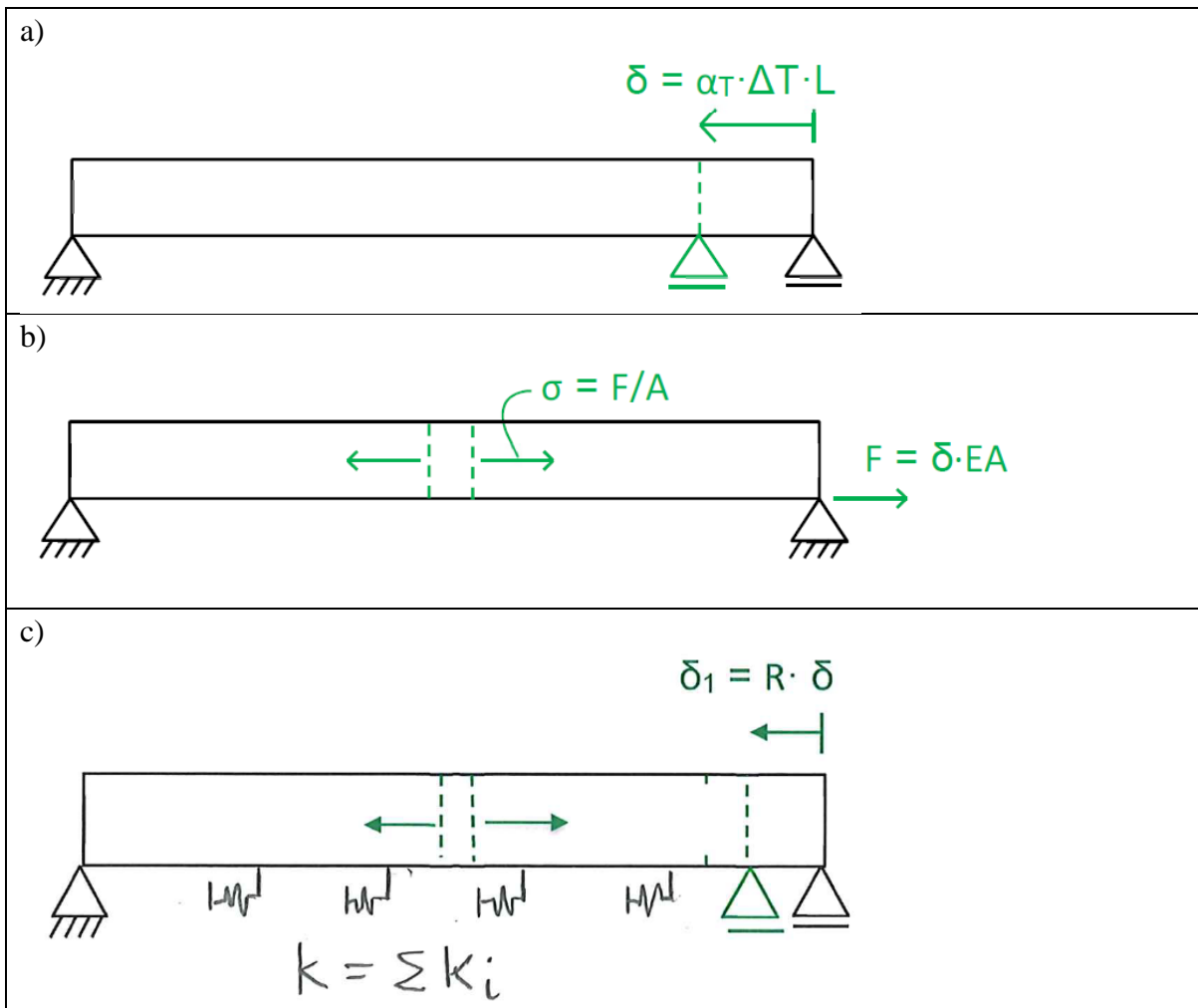
$$R = \frac{\Sigma k_i}{\Sigma k_i + E_c A_c}$$

Fastholdingsgraden er da definert som stivheten av de fastholdende konstruksjonsdelene dividert på stivheten av det totale systemet.

For konstruksjoner fastholdt av berggrunn, og mindre eller slankere konstruksjonsdeler støpt mot massive konstruksjonsdeler vil stivheten av de fastholdende konstruksjonsdelene, Σk_i , være svært stor sammen lignet med den fastholdte konstruksjonsdelen, $E_c A_c$, og fastholdingsgraden kan derfor i slike tilfeller bli tilnærmet lik 1,0.

Dersom det antas at den fastholdende konstruksjonen (de elastiske fjærene) også er et betongtværssnitt (areal $(E_c A_c)_2$) kan fastholdingsgraden beskrives som:

$$R = \frac{(E_c A_c)_2}{(E_c A_c)_2 + E_c A_c}$$



Figur 31 Illustrasjon av fastholdingsbegrepet ved en-aksiell ytre fastholding, a) Fritt system ($R=0$), b) Full fastholding ($R=1,0$), c) Mellomliggende fastholding ($0 < R < 1,0$).

8 Krav i regelverket

8.1 Utførelsesstandarden NS-EN 13670+NA

Standarden gir to overordnede temperaturkrav som gjelder all betongutførelse. Kravene er imidlertid ikke knyttet direkte til termisk opprissing:

- Standarden krever (pkt. 8.5) at betong ikke skal overstige 70 °C i herdefasen. Selv om høy herdetemperatur i seg selv er ugunstig mht. termisk opprissing gjelder dette maksimumstemperaturkravet først og fremst faren for forsinket ettringittdannelse (som er skadelig på lengre sikt) samt fare for redusert fasthet og økt porøsitet.
- I tillegg krever standarden at fersk/ung betong ikke skal synke under 0 °C før betongens overflate har fått en trykkfasthet på minst 5 MPa; dette for å unngå frostskafer i fersk betong, som gir porøs betong og redusert fasthet.

For tiltak mot fastholdingsriss pga. herdevarme er ikke standarden mer spesifikk enn å angi at det kan spesifiseres krav til «for eksempel bruk av lavvarmebetong, kjølerør, isolasjon osv».

8.2 Statens vegvesens håndbok R762, prosesskode 2

Utover de generelle kravene som angitt ovenfor beskriver Statens vegvesen spesifikke «ekstraordinære tiltak for å redusere risikoen for opprissing og andre effekter som skyldes betongens herdevarme». Det er håndbok R762 [5] som gir disse kravene (se også [10]). Kravene trer i kraft når ett eller flere tiltak (underprosesser) i prosess 84.5 «Spesielle herdetiltak» er beskrevet, og hvilke konstruksjonsdeler tiltakene gjelder for. De ulike prosessene er:

- *Prosess 84.51 Supplerende varmeisolasjon i herdeperioden.* Tiltaket gjelder reduksjon av temperaturdifferanser over tverrsnittet (indre fastholding). Tiltaket er spesielt nyttig for svært massive konstruksjoner som for eksempel massive fundamenter, søyler, fenderplater etc, hvor maksimumstemperaturen kan bli høy og temperatordifferansene over tverrsnittet ditto.
- *Prosess 84.52 Kjøling av fersk betong.*
- *Prosess 85.53 Kjøling av herdende betong med innstøpte kjølerør*
- *Prosess 85.54 Oppvarming av tilstøtende konstruksjoner*

Videre er det to prosesser som beskriver simuleringsberegninger:

Prosess 84.55 Beregning og styring av herdetemperatur angir følgende krav til temperaturer (utdrag):

Simuleringsberegningene baseres på varmeutviklingen for den aktuelle betongen, og bruk av anerkjent 2D eller 3D herdeteknologi-program. Herdeforløpet skal kontrolleres og styres for å begrense fastholdt temperaturkontraksjon etter følgende kriterier:

- Over tverrsnittet: Temperaturdifferanse maksimum 20 °C (NB! Gjelder indre fastholding)
- Mellom konstruksjonsdeler: Ved fastholdingslengde mot tilstøtende konstruksjon ≥ 5 meter skal differansen mellom gjennomsnittstemperaturen i konstruksjonsdelen og konstruksjonsdelen denne er fastholdt til ikke på noe tidspunkt overstige 15 °C.

Konstruksjonsdelen skal instrumenteres med temperaturfølere. Minimum 3 stykk hvor temperaturen forventes høyest, minimum 3 stykk 10 mm fra forskalt overflate og minimum 1 føler i omgivende luft. Måleresultatene analyseres og sammenlignes med beregningene. Resultatene rapporteres på en oversiktlig måte inkludert givernes plassering og aktuell konstruksjonsdel.

Prosess 84.56 «Beregning og styring av herdetemperatur og rissrisiko. Her angis krav til fastholdingspenninger (utdrag):

Omfatter simuleringsberegninger av herdetemperatur og risiko for opprissing for kartlegging av nødvendige tiltak, gjennomføring av tiltakene, samt kontroll og styring av utførelsen i samsvar med beregningsresultatene slik at risikoen for opprissing er redusert som forutsatt. Beregningene baseres på representative herdeteknologiske parametere for tilsvarende betong som benyttes i prosjektet. Dersom prosess 84.57 er spesifisert (dvs. om omfattende laboratorieprøving kreves), utføres beregningene med de herdeteknologiske parameterne som er fastlagt for betongen benyttet i prosjektet.

Simuleringsberegningene utføres ved bruk av anerkjent 2D eller 3D herdeteknologiprogram. *Forholdet mellom største opptredende strekkspenning og betongens enaksiale strekkfasthet skal ikke på noe tidspunkt overstige 0,75.* Beregningene vil kunne vise andre tillatte temperaturdifferanser enn angitt i prosess 84.55.

Tiltakene som er aktuelle å ta i bruk for å tilfredsstille kravene til enten temperaturdifferanser eller fastholdingspenning som angitt over er:

- Redusert fersk betongtemperatur (prosess 84.52)
- Bruk av isolasjon på overflater (prosess 84.51)
- Bruk av kjølerør i den herdende betongen (prosess 84.53)
- Oppvarming av konstruksjonsdeler det støpes mot (prosess 84.54)

Alternativt kan ett eller flere av de fire tiltakene i kulepunktene over beskrives direkte, og da enten supplert med detaljert beskrivelse av gjennomføringen eller med krav til hva man skal oppnå (funksjonskrav).

8.3 Betegnelse Lavvarmebetong og spesialbetongen SV–Lavvarme

Det å proporsjonere betongen mht. lav varmeutvikling er naturlig nok gunstig ettersom det reduserer hele drivkraften til termisk opprissing, og det er et billig tiltak sammenliknet med de fysiske tiltakene som er aktuelle på byggeplass.

NS-EN 13670+NA opererer med betegnelsen «lavvarmebetong», men går ikke mer inn på hva dette er annet enn at det er implisitt at det i betongproporsjoneringen gjøres spesifikke tiltak for å redusere varmeutviklingen. Når det gjelder proporsjonering tillates det i NS-EN 206+NA opptil 35% flygeaske i bindemidlet. Tilsetning av flygeaske under blanding er det mest benyttede grepet for å redusere varmeutviklingen. I tillegg vil lav bindemiddelmengde/økt D_{maks} være gunstig; hvis utførelsesforhold (armeringstetthet) gjør dette mulig og ønskede fersk betongegenskaper oppnås.

Statens vegvesen beskriver en spesialbetong kalt SV-Lavvarme og som i hht. *håndbok N400 Bruprosjektering* (tabell 7.1) kan beskrives/benyttes når:

Konstruksjonsdeler hvor risikoen for gjennomgående fastholdingsriss på grunn av herdevarme og temperaturforskjeller er betydelig, og hvor slik opprissing er kritisk for funksjonsevnen. SV-Lavvarme skal ikke spesifiseres uten at nytteverdien er klarlagt og at det er bekreftet at betong med krevet sammensetning, i henhold til håndbok R762 Prosesskode 2, kan leveres på det aktuelle anleggsstedet. Supplerende tiltak, eventuelt som erstatning for SV-Lavvarme, kan være bruk av kjølerør, varmekabler, kald betong osv.

SV-lavvarme er spesifisert i Prosesskode 2 med rammer for bindemiddelsammensetningen og med et spesifikt (funksjons)krav til øvre grense for maksimum herdetemperatur i ei isolert herdekasse med indre mål 1 m x 1 m x 1 m, se prosess 84.4 for detaljer. Den aktuelle betongen må altså gjennom et herdekasseforsøk for evt. å kunne betegnes som en SV-Lavvarme.

Se ellers veiledning om temaet gitt i Norsk Betongforening rapport 5 [4] og Statens vegvesen rapport 451 [10].

8.4 Hva som kommer i nye Eurocode 2

I det pågående revisjonsarbeidet med Eurocode 2 (antatt tatt i bruk i 2025) er det inkludert et nytt normativt annekset: Annex D: Evaluation of early-age and long-term cracking due to restraint. Dette annekset gir en kortfattet beskrivelse av temaet, og presenterer forenklete metoder for spenningsberegning i herdefasen og etter lang tid med effektene fra herdefasen inkludert. Det angis også hvordan effektene fra herdefasen kan medtas i rissviddeberegningene.

Det antas at dette annekset vil bidra til økt bevissthet rundt effektene fra herdefasen og kreve økt kompetanse og mer konsistent behandling av temaet i aktuelle prosjekter.

9 Oppsummering

Rapporten diskuterer ulike tiltak for å redusere faren for gjennomgående fastholdingsriss i betongens herdefase på grunn av ytre fastholding fra tilstøtende konstruksjonsdeler. De ulike tiltakenes kost-nytte effekt er behandlet, samt erfaringer ved bruk. Det gis også anbefalinger med hensyn til måling og dokumentasjon.

Ethvert tiltak vil i prinsipp redusere rissfare og omfanget av opprissing, men om det gir rissfri konstruksjon er usikkert. Effekten av et gitt tiltak er helt avhengig av omfanget av gjennomføringen. For å sikre rissfri konstruksjon må tiltakets omfang, eventuelt nødvendigheten av å kombinere tiltak, dimensjoneres via simuleringsberegninger. Utførelsen av tiltaket må så være i henhold til forutsetningene i beregningen.

Det er gjort 2D beregninger av fastholdingspenninger i noen vegger støpt på fundament. Disse er basert på data fra to spesifikke betongresepter (referanse- og lavvarmebetong), samt valg av beregningsforutsetninger for en liten (400 mm) og en stor (800 mm) vegg som gitt i avsnitt 3.1. Resultatene kan ikke generaliseres, men de ulike effektene av tiltak som er vist representerer imidlertid prinsipielle trender. Våre beregningsresultater kan oppsummeres slik:

- Temperatureffekten dominerer, og en økning av veggtykkelse gir økt maksimumstemperatur og normalt økt rissfare (selv om økt veggtykkelse kan gi noe redusert fastholding).
- Rissfaren er normalt høyest om vinteren fordi utgangsforskjellen i temperaturen mellom fersk betong/nystøpt konstruksjon og fastholdende konstruksjonsdel er størst da. Dette bidrar til økt temperaturforskjell i herdeforløpet. Ikke bestille varm betong i den kalde årstiden, og ved minusgrader gjør nødvendige herdetiltak for å unngå frostskafer i nystøpt betong.
- Redusert fersk betongtemperatur (her: fra 20 °C til 15 °C) har god effekt. Leveranse av kald betong, både naturlig kald eller ved bruk av isbiter ved blanding, har sine utfordringer.
- Lavvarmebetong har god effekt; i våre beregninger omtrent samme effekt som ved senkningen av fersk betongtemperatur fra 20°C til 15 °C.
- For vår store vegg vil bruk av lavvarmebetong ikke nødvendigvis være tilstrekkelig for å unngå opprissing, men det har en betydelig positiv effekt.
- Å varme opp fundamentet med varmekabler (her: ett lag sentrisk) er vist å være et veldig effektivt tiltak som kan gi rissfri vegg, også for den store veggen. For det gitte tilfellet med vegg på bunnplate indikerer beregningene at utbredelsen av varmekablene fra vegglivet og inn i bunnplata ikke bør være mindre enn ca. 4 meter.
- Bruk av kjølerør er et potensielt kraftfullt tiltak som kan gi rissfri vegg, også for stor vegg. Tiltakets effekt er imidlertid meget avhengig av utførelsen; kjølevannstemperatur, pumpekapasitet, sløyfelengde etc.
- En kombinasjon av tiltak vil naturlig nok være svært kraftfullt og vil svært sannsynlig kunne gi rissfrihet i vegger med stor tykkelse.

10 Referanser

- [1] Byggforsk 520.028 Oppfølging av betongens herdeforløp på byggeplass
- [2] Byggforsk 520.030 Simulering av betongens herdeforløp
- [3] Byggforsk 520.055 Prosjektering og støping av vanntette betongkonstruksjoner
- [4] Norsk Betongforenings Rapport nr. 5: Beskrivelse av spesialbetonger – Lavvarmebetong
- [5] Statens vegvesen, Håndbok R762 Prosesskode 2 Standard beskrivelse for bruer og kaier
- [6] Klausen A.B.E. (2016) Early age crack assessment of concrete structures. Experimental investigation of decisive parameters. Ph.D.-thesis, NTNU Department of Structural Engineering, ISBN 978-82-326-1851-4 (eVersion)
- [7] Norsk Betongforenings Publikasjon nr. 14: Spennarmeringsarbeider
- [8] NS-EN 13670+NA Utførelse av betongkonstruksjoner
- [9] Kanstad T., Bosnjak D. and Øverli J.A. (2001) 3D Restraint Analyses of Typical Structures with Early Age Cracking Problems. IPACS report, Luleå Univ. of Tech., ISBN 91-89580-32
- [10] Bjøntegaard Ø., Pedersen B., Nordbotten G. og Bathen L. (2017) Forståelse og bruk av håndbok R762, prosess 84. Statens vegvesen rapport 451

VEDLEGG 1 Simuleringsresultater, resultattabell

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13

Vegg på stripfundament A, v2

	Basis	32% FA	43% FA	Betongtemp 15 grader	Vinter	Vinter+ 32%FA	Vinter+betong 15 grader	Vinter+15 grader+32%FA	Fastholdning	Varmekabler - helt	Kjølerør	Varmekabler+ 32%FA	Kjølerør+ 32%FA
Maksimaltemperatur vegg [°C]	49	41	-	44	42	34	37	28	49	49	40	41	33
Maksimal forskjell gjennomsnittstemp vegg-fundament [°C]	26	20	-	23	32	26	28	22	26	18	20	10	14
Maksimal rissindeks vegg	0,97	0,79	-	0,83	1,16	1,04	0,97	0,85	1,16	0,80	0,75	0,51	0,56

Justert til 2,4 meters bredde

Tatt ut maks.rissindeks i pkt.(0,4/0,8) bortsett fra for varmekabler/kjølerør

Vegg på stripfundament B, v2

	Basis	32% FA	43% FA	Betongtemp 15 grader	Vinter	Vinter+ 32%FA	Vinter+betong 15 grader	Vinter+15 grader+32%FA	Fastholdning	Varmekabler - helt	Kjølerør	Varmekabler+ 32%FA	Kjølerør+ 32%FA
Maksimaltemperatur vegg [°C]	39	33	-	36	28	21	24	17	39	40	33	33	27
Maksimal forskjell gjennomsnittstemp vegg-fundament [°C]	20	15	-	18	23	18	19	14	20	9	14	4	9
Maksimal rissindeks vegg	0,72	0,60	-	0,65	0,83	0,73	0,70	0,59	0,86	0,51	0,59	0,37	0,42

Justert til 2 meters bredde

Tatt ut maks.rissindeks i pkt.(0,2/0,7) bortsett fra for varmekabler/kjølerør

Vegg på bunnpplate A

	Basis	32% FA	43% FA	Betongtemp 15 grader	Vinter	Vinter+ 32%FA	Vinter+betong 15 grader	Vinter+15 grader+32%FA	Fastholdning	Varmekabler - helt	Varmekabler - delvis	Varmekabler- minimum	Kjølerør	Varmekabler +32%FA	Kjølerør +32%FA
Maksimaltemperatur vegg [°C]	49	41	-	44	42	34	36	28	49	50	49	49	41	41	33
Maksimal forskjell gjennomsnittstemp vegg-fundament [°C]	27	21	-	24	34	27	30	23	27	16	23	26	22	16	16
Maksimal rissindeks vegg	1,03	0,83	-	0,89	1,24	1,08	1,04	0,87	1,22	0,77	0,77	0,89	0,77	0,54	0,58

Tatt ut maks.rissindeks i pkt.(0,4/0,8) bortsett fra for varmekabler/kjølerør

Vegg på bunnpplate B

	Basis	32% FA	43% FA	Betongtemp 15 grader	Vinter	Vinter+ 32%FA	Vinter+betong 15 grader	Vinter+15 grader+32%FA	Fastholdning	Varmekabler - helt	Varmekabler - delvis	Kjølerør	Varmekabler +32%FA
Maksimaltemperatur vegg [°C]	39	33	-	36	28	21	24	17	39	39	39	33	27
Maksimal forskjell gjennomsnittstemp vegg-fundament [°C]	21	15	-	18	24	19	20	14	21	5	16	14	10
Maksimal rissindeks vegg	0,77	0,63	-	0,70	0,87	0,77	0,73	0,62	0,89	0,52	0,52	0,63	0,39

Tatt ut maks.rissindeks i pkt.(0,4/0,7) bortsett fra for varmekabler/kjølerør

Gul = manipulerte datasett. Blå = datasett Anja.

Varmekabler står på 4+1 døgn, c/c 400 mm, 40 W/m

Kjølerør står på 1,3 døgn, c/c 500, stå 7 grader

Delvis varmekabel = 4 meter

Minimum varmekabler = 2 meter

Delvis varmekabel i kombinasjon med LV1

Figurer

Lavvarmebetong + vinter

Betongtemperatur + vinter

Fastholdning

Varmekabler, kjølerør + LV

1,2,3,5,6

1,4,5,7,8

1,9

1,10,11,12,13