

DaCS

Durable advanced Concrete Solutions

Report No. 03

Risskontroll ved bygging av Granfosstunnelen Beregninger og tiltak

WP 1.1 Crack risk assessment of concrete structures at early ages

Author(s)

Nina Borvik

Smeplass, Sverre

Oliver Berget Skjølvik



Risskontroll ved bygging av Granfosstunnelen

Beregninger og tiltak

WP 1.1 Crack risk assessment of concrete structures at early ages

KEYWORDS:
Keywords

AUTHOR(S)
Nina Borvik
Smeplass, Sverre
Oliver Berget Skjølvik

DATE
2018-09-25

VERSION
Final

REPORT LANGUAGE
Norsk

**NUMBER OF
PAGES/APPENDICES:**
26 + Appendices

ABSTRACT

Abstract heading

This report shows how stress analyzes are used to handle the risk of crack appearance in a construction project with massive concrete structures with strict water tightness and durability requirements.

The analyzes have given the basis for choice of concrete type, and selection of curing measures for each structural section. This approach has been largely successful, and helped ensuring the quality of the concrete structures. However, it would have been desirable to increase the accuracy of the analyzes by conducting a more comprehensive initial documentation program for the specific concrete properties that have the greatest impact on the cracking tendency when the hardening concrete is exposed to restrained thermal and autogenous dilation

PREPARED BY
Nina Borvik

CHECKED BY
Sverre Smeplass

APPROVED BY
Kjell Tore Fosså

REPORT NO.
Report No. 03

CLASSIFICATION
Restricted until

DATE
2019-01-01

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 / sammendrag

Denne rapporten er en del av Work Package 1 (WP1) i det NFR-støttede «Durable Advanced Concrete Solutions» (DaCS). Delaktiviteten WP1.1 “Early age performance and cracks” har som mål å videreutvikle en beregningsmetode for beregning og identifikasjon av risiko for opprissing av betongkonstruksjoner som er utsatt for fastholdt termisk og autogen dilatasjon i herdefasen.

Denne rapporten viser hvordan spenningsanalyser er brukt til å håndtere risikoen for opptreden av riss pga. fastholdt termisk og autogen dilatasjon i herdefasen i et konkret anleggsprosjekt med grove betongkonstruksjoner med strenge krav til tetthet og levetid.

Analysene har gitt grunnlag for valg av betongtype og valg av herdetiltak for hver enkelt konstruksjonsdel. Denne arbeidsformen har i all hovedsak vært vellykket, og bidratt til å sikre kvaliteten på konstruksjonene. Det ville likevel vært ønskelig å kunne øke presisjonen i analysene ved å gjennomføre et mer omfattende innledende dokumentasjonsprogram for de betongegenskapene som har størst innvirkning på risstendensen ved fastholdt termisk og autogen dilatasjon i herdefasen.

This report is part of Work Package 1 (WP1) in the research project Durable Advanced Concrete Solutions (DaCS). The activity WP1.1 “Early age performance and cracks” aims to further develop a calculation method for identification and assessment of the risk of cracking of concrete structures exposed to

This report shows how stress analyzes are used to handle the risk of crack appearance in a construction project with massive concrete structures with strict water tightness and durability requirements.

The analyzes have given the basis for choice of concrete type, and selection of curing measures for each structural section. This approach has been largely successful, and helped ensuring the quality of the concrete structures. However, it would have been desirable to increase the accuracy of the analyzes by conducting a more comprehensive initial documentation program for the specific concrete properties that have the greatest impact on the cracking tendency when the hardening concrete is exposed to restrained thermal and autogenous dilation.

Table of contents

Preface	2
Summary / sammendrag	3
Table of contents	4
1 Introduksjon	6
2 Om prosjektet	7
3 Krav i kontrakten	8
3.1 Generelt	8
3.2 Beskrivelse av lavvarmebetong	8
3.3 Varmeisolering av betong	9
3.4 Oppvarming av tilstøtende konstruksjonsdeler.....	9
3.5 Simulering og registrering av temperaturutviklingen i betongen	9
3.6 Tetting av riss	9
4 Skankas tilnærming til kravene	10
4.1 Analyse.....	10
4.2 Materialalternativer.....	10
4.3 Dokumentasjon av lavvarmebetong.....	11
4.4 Målt varmeutvikling i lavvarmebetongen med 40 % FA.....	12
4.5 Kalibrering av analysen	14
5 Konstruksjonsgeometri i prosjektet	15
6 Analysearbeidet	17
6.1 Utvalg av tverrsnitt	17
6.2 Valg av beregningsforutsetninger og randbetingelser	18
6.3 Resultater fra spenningsanalysene	18
7 Bruk av analyseresultatene	20
7.1 Valg av betong	20
7.2 Sammenligning av beregnede og målte temperaturer med kontraktens temperaturkrav.....	20
7.3 Observert risstendens.....	21
7.4 Lavvarmebetongens produksjonsegenskaper og fasthetsutvikling.....	22
8 Håndbok R762 Prosesskode II, 2015	23
9 Oppsummering	25
Referanser	26

APPENDICES

[List appendices here]

1 Introduksjon

Denne rapporten er en del av Work Package 1 (WP1) i det NFR-støttede «Durable Advanced Concrete Solutions» (DaCS). WP1 omhandler «Early age cracking and crack calculation in design», og er delt i tre aktiviteter:

- WP1.1 Early age performance and cracks
- WP1.2 Design and crack calculation
- WP1.3 Cracks and durability

Skanska deltar i WP1.1, som har som mål å videreutvikle en beregningsmetode for beregning og identifikasjon av risiko for opprissing av betongkonstruksjoner som er utsatt for fastholdt termisk og autogen dilatasjon i herdefasen.

Denne rapporten viser hvordan spenningsanalyser er brukt til å håndtere risikoen for opptreden av riss pga. fastholdt termisk og autogen dilatasjon i herdefasen i et konkret anleggsprosjekt med grove betongkonstruksjoner med strenge krav til tetthet og levetid.

Rapporten gjengir bare til en viss grad generell teori om temaet, og refererer bare i liten grad forskningsresultater som ellers er oppnådd i arbeidspakken. Slike resultater, og relevansen av disse for den type beregninger som er rapportert her vil bli gitt i andre rapporter.

Spenningsanalysene er gjennomført i beregningsprogrammet CrackTest COIN, opprinnelig utviklet og publisert under navnet ConTeSt Pro av professor Jan Erik Jonasson ved Luleå Tekniske Universitet. Programmet er senere modifisert for norsk praksis og norske materialdata gjennom forskningsprogrammene COIN og DaCS. Programmet er et 2D FEM-program, med mulighet til en forenklet representasjon av 3D-effekter. En vesentlig del av aktivitetene i WP1.1 har vært knyttet til videreutvikling av materialdatabasen for programmet.

2 Om prosjektet

Rv. 150 Fellesprosjektet Granfosstunnelen er ett prosjekt av i alt ti, der tunneler i Oslo-området oppgraderes av Statens Vegvesen (SVV). Prosjektet består av rehabilitering av to separate tunneler, Lysakertunnelen og Ullerntunnelen, samt etablering av en betongkulvert i dagsonen mellom de to fjelltunnelene ved Mustad.

Byggingen av betongkulverten gjennom eksisterende dagsone gjør Statens Vegvesen i samarbeid med en privat utbygger, Mustad Eiendom. Betongkulverten skal senere tilbakefylles, og området skal utvikles videre til bolig- og parkformål.

De analysene og tiltakene som er rapportert her er knyttet til byggingen av betongkulverten. Andre deler av prosjekter vil ikke bli videre omtalt.

Byggherre: Staten Vegvesen (delvis i samarbeid med Mustad Eiendom)
Rådgiver byggeteknikk: Aas Jacobsen AS
Entreprenør: Skanska Norge AS
Betongleverandør: Unicon
Byggeperiode: 2015 – 2017



Figur 1. Illustrasjonsbilde som viser betongkulverten som binder sammen de to fjelltunnelene.

3 Krav i kontrakten

3.1 Generelt

Statens Vegvesen er byggherre, og kontraktene følger dermed Staten Vegvesen sine håndbøker. Kontrakten på Rv. 150 Fellesprosjektet Granfosstunnelen er basert på følgende håndbøker;

- Håndbok R761 "Prosesskode 1, Standard beskrivelse for vegkontrakter", utgitt 2012
- Håndbok R762 "Prosesskode 2, Standard beskrivelsestekster for bruer og kaier", utgitt 2012

Kontrakten er datert 11.november 2015. Håndbøkene kom i nye versjoner i 2015, men kontrakten er altså basert på 2012-versjonene. I tillegg til standard beskrivelsestekst fra håndbøkene har kontrakten også en del spesiell beskrivelsestekst gjeldende for dette prosjektet.

I kontrakten på Rv. 150 Fellesprosjektet Granfosstunnelen er det ikke beskrevet krav til spenningsanalyse av riss grunnet fasthold termisk og autogent dilatasjon, men det er beskrevet krav knyttet til temperaturutvikling og temperaturdifferanser i betongtverrsnittet, og til temperaturdifferanser mellom støpeavsnitt og tilstøtende konstruksjoner. Utover den standard beskrivelsesteksten som gjelder for betongarbeider iht. håndbok R762 (2012), er det listet følgende krav knyttet til temperaturforhold i konstruksjonene:

- Bruk av lavvarmebetong, og tilhørende materialbeskrivelse
- Bruk av isolasjon på betongoverflater
- Oppvarming av tilstøtende konstruksjoner
- Analyse og registrering av temperaturutviklingen i betongen
- Tetting av riss som skyldes fastholdt termisk og autogen dilatasjon

For betongkulverten er det beskrevet bruk av betongkvalitet B45 SV40, og det er i tillegg beskrevet bruk av polypropylenfibre (PP-fiber) i tak og vegger for å oppnå tilstrekkelig brannmotstand.

3.2 Beskrivelse av lavvarmebetong

Prosesen beskriver bruk av en spesiell bindemiddelsammensetning for SV40 – betongen, der hensikten er å oppnå redusert herdevarme og dermed redusert maksimaltemperatur. Bindemiddelet skal bestå av:

1. 60-70 % portlandsement (av totalt bindemiddelinnhold)
2. 30-40 % flygeaske (av totalt bindemiddelinnhold)
3. 3-5 % silikastøv av (av totalt bindemiddelinnhold)

I tillegg står det beskrevet at virkningsfaktoren for flygeaske (FA) skal settes lik 1,0, og virkningsfaktoren for silikastøv skal settes lik 2,0. Flygeasken skal tilfredsstille NS-EN 450, og ha Blaine-verdi 300-400 m²/kg.

3.3 Varmeisolering av betong

Prosesen omfatter varmeisolering for å redusere temperaturredifferanser i betongen, og kravet er satt slik at temperaturredifferansene innen støpeavsnitt ikke skal overskride 20 °C. Temperaturen logges og dokumenteres for avtalte målepunkt, og før støp skal entreprenøren legge frem resultater fra beregninger som sannsynliggjør at kravet kan tilfredsstilles.

Denne posten omhandler også varmeisolering av utvendige flater i perioder med frost.

3.4 Oppvarming av tilstøtende konstruksjonsdeler

Prosesen omfatter oppvarming av konstruksjonsdeler det støpes inntil, for å unngå uakseptable temperaturredifferanser mellom støpeavsnitt, og for å sikre mot skader som følge av støp mot kaldt underlag. Oppvarming kan skje fra overflaten, og/eller ved hjelp av innstøpte varmekabler. Det er stilt krav om at tilstøtende betong skal holde en temperatur på minimum 10 °C. Prosesskode II (2012) gir et generelt krav om at maksimal tillatt temperaturredifferanse mellom tiliggende støpeavsnitt (beregnet som forskjell i gjennomsnittstemperaturer) ikke skal overskride 15 °C. Dette kravet er ikke gjengitt i kontrakten.

3.5 Simulering og registrering av temperaturutviklingen i betongen

Prosesen omfatter levering og montering av temperaturfølere, og dokumentert registrering av temperaturutvikling i betongen under herdeprosessen. I tillegg beskriver prosessen simulering av temperaturutvikling i betongen ved hjelp av egnet program for planlegging av nødvendige herdetiltak.

Antall og plassering av målepunkter skal være tilstrekkelig til å dokumentere aktuell støpeseksjon. I hver støp skal det forutsettes minimum 2 sett á 3 følere. En føler på henholdsvis ytre og indre armering og en føler i kjernen, dvs. minimum 6 følere i hver støp. I tillegg skal lufttemperaturen logges samtidig.

3.6 Tetting av riss

Prosesen omfatter tetting av riss i bunnplate, vegger og tak i betongtunnel, og evt. andre konstruksjoner. Omfanget bestemmes av byggherren, men i utgangspunktet skal alle gjennomgående riss tettes. Dette er noe strengere enn kravene i Håndbok R762 (2012), som bare krever injeksjon av vannførende riss dersom rissvidden er mindre enn 0,3 mm. Riss som skyldes feil eller mangler i entreprenørens utførelse utbedres av entreprenøren for egen regning.

4 Skanskas tilnærming til kravene

4.1 Analyse

Kravene i kontrakten var først og fremst rettet mot temperaturdifferanser over betongtverrsnittet, dvs. fokuset var satt på indre fastholdingseffekter, som kan gi en viss opprissingstendens, men ikke gjennomgående opprissing. Riss som skyldes indre fastholding (fastholdt dilatasjon pga. temperaturforskjeller i tverrsnittet) vil ha en tendens til å lukke seg når ved utjevning av temperaturdifferansene. Riss som skyldes ytre fastholding (fastholdt dilatasjon pga. temperaturforskjeller mellom støpeavsnitt eller mellom støpeavsnitt og fast underlag) er gjennomgående, ofte vannførende og som regel permanente. Slike riss har naturlig nok størst innvirkning på konstruksjonens funksjon og bestandighet, spesielt i et koridholdig miljø.

Med utgangspunkt i Skanskas erfaring fra Operatunnelen i Bjørvika /2/, og andre prosjekter var vi av den oppfatning at tiltakene på byggeplassen primært burde være fokusert på faren for opprissing pga. ytre fastholdingseffekter. I en del situasjoner vil det kunne oppstå en konflikt mellom kravene til temperaturdifferanser over tverrsnitt, og temperaturdifferanser. Et vanlig, og ofte beskrevet tiltak for å redusere temperaturdifferanser over tverrsnitt er å bruke isolasjonsmatter på betongoverflatene. Dette gir god effekt, men vil samtidig øke maksimaltemperaturen, og dermed temperaturforskjellen mot forrige støpeavsnitt eller underlaget. Samme tiltak kan altså i prinsipp gi redusert tendens til opprissing pga. indre fastholding, og samtidig økt tendens til opprissing pga. ytre fastholding.

I oppstarten av betongarbeidene på Rv. 150 Fellesprosjektet Granfosstunnelen la Skanska derfor frem et forslag om å vurdere risikoen for termisk opprissing gjennom analyse av den resulterende strekkspenningen som skyldes fastholdt termisk og autogent dilatasjon i herdefasen. Rissrisikoen ble foreslått kvantifisert for et utvalg støpeavsnitt ved beregning av rissindeksen gjennom herdeforløpet, dvs. forholdet mellom største opptredende strekkspenning og betongens enaksiale strekkfasthet. Analysen dekker både effektene av indre og ytre fastholding. Resultatene fra disse analysene ble foreslått å danne grunnlag for valg av betongsammensetning og andre relevante tiltak for å unngå opprissing.

Byggherren godtok denne tilnærmingen, og det ble besluttet gjennomført analyser av de ulike tverrsnittene på prosjektet, med fortsatt kontroll av samsvar mellom beregnede og oppnådde temperaturer, men med mindre fokus på temperaturkravene i kontrakten.

Beregningene ble gjennomført i det spesialiserte spenningsbaserte FEM-programmet CrackTeSt COIN. Målsetningen var å velge betongsammensetning og herdetiltak slik at rissindeksen til enhver tid var mindre enn 0,75, dvs. maksimalt 75% utnyttelse av betongens strekkfasthet i herdefasen. Dette tilsvarer det kravet som også ble brukt ved produksjon av betongseksjonene i Operatunnelen.

4.2 Materialalternativer

Et av de mest effektive tiltakene for å redusere risikoen for riss fra herdefasen, er å redusere herdetemperaturen. Dette kan gjøre på ulike måter, det mest effektive og også det mest vanlige tiltaket er

bruk av lavvarmebetong. I lavvarmebetong erstattes deler av bindemiddelet med tilsetningsmaterialer, normalt flygeaske (FA) eller slagg, slik at den totale varmeutviklingen for bindemiddelet reduseres.

I kontrakten på Rv. 150 Fellesprosjektet Granfosstunnelen var det beskrevet bruk av flygeaske som virkemiddel for å utvikle en lavvarmebetong tilsvarende SV-40 kvalitet. Materialspesifikasjonen beskrev et bindemiddel med 30-40 % flygeaske, masseforhold 0,40, samt bruk av virkningsfaktor $k=1$ for flygeaske tilsatt utover innholdet av flygeaske i sementproduktet. For dette prosjektet ble det valgt en sementtype uten flygeaske tilsatt fra sementfabrikk, dvs. Aalborg Rapid, som er en CEM I iht. NS-EN 197-1.

Bruk av flygeaske gir mer langsom egenskapsutvikling, i tillegg til redusert herdevarme. Optimal flygeaskedosering vil derfor være en mengde som gir tilstrekkelig sikkerhet mot ukontrollert opprissing, men samtidig begrenset slik at betongens egenskapsutvikling er tilstrekkelig rask til å kunne tilfredsstillende krav og ønsker til framdrift.

For vegger og takplater var det beskrevet bruk av polypropylenfibre (PP-fiber) i betongen av hensyn til brannsikkerheten. Bruk av slik fiber krever et større bindemiddelinhold i betongen for å opprettholde nødvendig støpelighet. Dette gir et større sementforbruk, og dermed også økt herdevarme og maksimal herdetemperatur. Bruken av brannfiber kommer dermed delvis i konflikt med kravet om begrenset risstendens og bruken av lavvarmebetong. Brannfiberen gir ingen vesentlig påvirkning på betongens strekkfasthet og E-modul, og bidrar dermed ikke til større motstand mot de strekkpåkjenningene som følger av fastholdt termisk dilatasjon.

Hensikten med de spenningsanalysene som ble utført var å kunne finne riktig betongsammensetning for alle aktuelle konstruksjonselementer og støpeavsnitt i betongkølverten ved Mustad, slik at kravene og målsetningene om opprissingstendens og framdrift kunne tilfredsstilles samtidig. Det ble utført analyser for stripefundamenter, bunnplater, vegger og dekker, for ulike værforhold, og med ulike herdetiltak.

I samarbeid med betongleverandøren ble det utviklet to ulike betongresepter som tilfredsstillende kontraktens krav til lavvarmebetong med PP-fiber (modifisert B45 SV40), dvs. med bindemidler med henholdsvis 30 % og 40 % FA. I tillegg til flygeasken bestod bindemiddelet av Aalborg Rapid sement og 5 % silikastøv. Total bindemiddelmengde var ca. 390 kg/m^3 for betongen med 40 % FA, og ca. 400 kg/m^3 for betongen med 30 % FA. Densitetsforskjellen mellom sement og FA fører til at bindemiddelvolumet er omtrent det samme for de to betongene.

All spenningsanalyse ble gjennomført med data som enten ble prøvd og dokumentert for disse to betongene, eller som ble tatt fra datasett som ble antatt å være tilstrekkelig representative for betongene.

4.3 Dokumentasjon av lavvarmebetong

Kontrakten omfattet ikke prisbærende poster for måling og dokumentasjon av materialdata til bruk i spenningsanalyse. Slik prøving ble derfor begrenset til måling av varmeutvikling og trykkfasthetsutvikling.

Varmeutviklingen til betongtypen med 40% FA ble målt og dokumentert ved hjelp av herdekasseforsøk. I dette tilfellet ble det brukt en tilnærmet kubisk finerkasse med innvendig isolasjon av 100 mm XPS. Betongvolumet var 1 m^3 . Målt temperaturutvikling i herdekassen regnes om til total varmeutvikling ved bruk av modenhetsprinsippet, og ved å kompensere for varmetapet fra kassen gjennom herdeforløpet.

Prinsippet er beskrevet i /2/ og /3/. Den resulterende totale varmeutviklingen kan deretter brukes som inputdata i analyseprogrammet CrackTest COIN. Data for varmeutvikling for betongen med 30 % FA ble hentet fra tidligere Skanskaprosjekter med samme type bindemiddel.

Trykkfasthetsutviklingen ble dokumentert ved prøving ved 7 d, 28 d, 56 d og 90 døgns alder. Resultatene fra de to siste terminene gir også mulighet til å vurdere langsiktig fasthetstilvekst, se avsnitt 7.3. Trykkfasthetsdataene inngår ikke direkte i spenningsanalysen eller beregningen av rissindekser, men gir grunnlag for tilpasning av de funksjonene i CrackTeSt COIN som brukes for å simulere egenskapsutviklingen til betongen (utvikling av strekkfasthet og E-modul). Strekkfasthetsutvikling og E-modulusutvikling ble ikke målt direkte for betongene i dette byggeprosjektet.

Data for strekkfasthetsutvikling ble basert på data fra spaltestrekkeforsøk på lignende betongresepter fra andre prosjekter, og på data og resultater fra laboratoriearbeidet i COIN og DaCS.

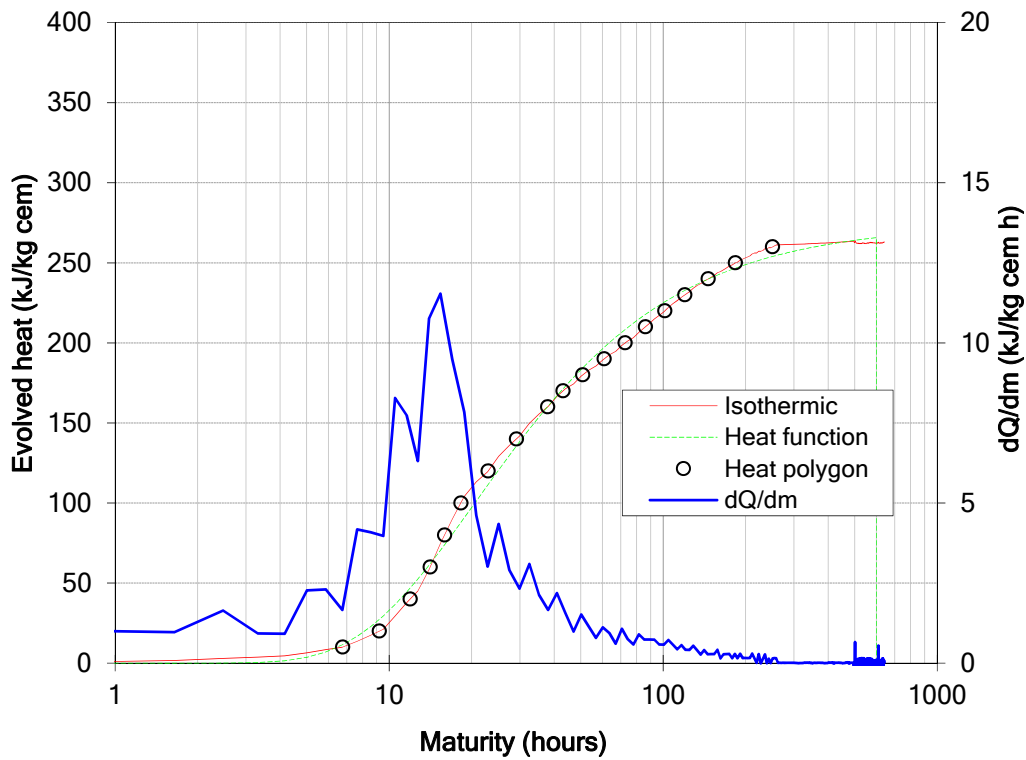
E-modulusutvikling ble basert på FIB – modellen som ligger i CrackTeSt COIN, justert for oppnådd trykkfasthetsutvikling, og for stivhetsbidraget fra den tilslagstypen som ble benyttet i betongene. Tilslaget stivhetsbidrag har vist seg å ha en viss sammenheng med deklart LA-verdi, dette er dokumentert i en rapport av Bård Pedersen /4/. Dette ga mulighet til å gi et brukbart estimat på E-modulen ved 28 døgns alder, og dermed en god tilpasning av FIB-modellen i programmet.

Alle andre inputdata i analysen, som f.eks. autogent svinn ble hentet fra materialdatabasen i CrackTeSt COIN, supplert med relevante data og resultater fra laboratoriearbeidet i COIN og DaCS.

Totalt sett hefter det betydelig usikkerhet med datasettet, og dette påvirker påliteligheten av spenningsanalysen. Ideelt sett burde det vært gjennomført et mer omfattende prøvingsprogram, spesielt av de sentrale egenskapene strekkfasthets- og E- modulusutvikling.

4.4 Målt varmeutvikling i lavvarmebetongen med 40 % FA

Figur 3 viser isoterm varmeutvikling for lavvarmebetongen med 40 % FA og 2 kg PP-fiber etter omregning fra temperaturforløpet i herdekassen. Total varmemengde er ca. 260 kJ/kg bindemiddel etter herding i 300 modenhetstimer. Tilsvarende varmemengde i betongen med 30 % FA er ca. 285 kJ/kg. Denne forskjellen i varmemengde gir en praktisk forskjell i maksimal herdetemperatur på ca. 4°C i et massivt tverrsnitt.



Figur 2. Isoterm varmeutvikling fra herdekasseforsøk med B45 SV40 med 40 % FA ($k=1$) og 2 kg PP fiber gjennomført 2015

4.5 Kalibrering av analysen

Spenningsanalysen i forkant av betongarbeidene i prosjektet ble et viktig hjelpemiddel for å treffe gode beslutninger for hvilke tiltak som skulle benyttes. Samtidig ble den faktiske temperaturutviklingen i betongen målt som forutsatt i kontrakten. Dette ga gode forutsetninger for løpende kalibrering av beregningene, og dermed redusert usikkerhet i resultatene.

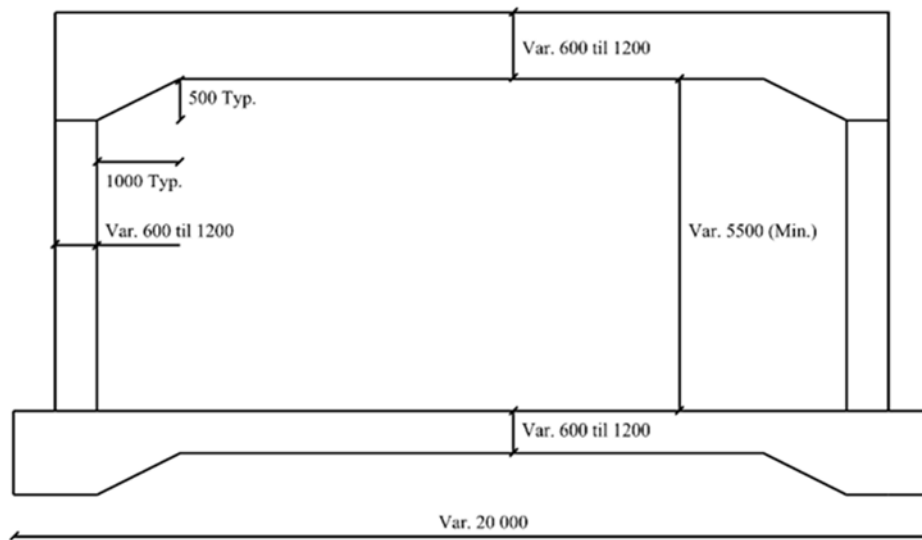
I Granfossprosjektet ble analysene første gang kalibrert på basis av resultatene fra prøvestøpene med de to betongreseptene. De faktiske temperaturforløpene i prøvestøpen ble gjenskapt i beregningsprogrammet ved å legge inn faktiske vær- og vindforhold, herdebetingelser, fersk betongtemperatur osv. Tilfredsstillende samsvar ble oppnådd ved å tilpasse verdiene for betongegenskaper som varmekonduktivitet og varmekapasitet, som ellers ikke er målt spesifikt i prosjektet.

Mindre avvik mellom målt og beregnet temperaturforløp ble videre korrigert fortløpende, for å sikre minst mulig usikkerhet i beregningen av høyeste rissindeks i hver enkelt konstruksjonsdel.

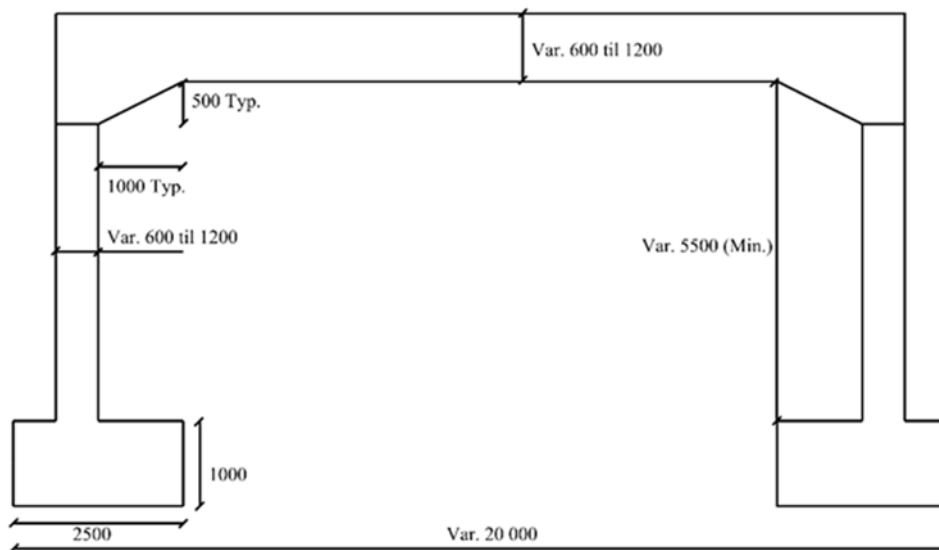
Utover denne kalibreringen i starten blir temperaturen logget i hver konstruksjonsdel utsatt for ytre fastholding. Dette gjør at det er enkelt å følge opp beregningene i etterkant, og justere beregningene ved behov.

5 Konstruksjonsgeometri i prosjektet

Betongkulverten som er bygd gjennom tidligere dagsone har typisk tverrsnitt som vist i figur 2a og figur 2b nedenfor. Den består av to stripefundamenter eller bunnplate med to vegger og en takplate. Både bunnplaten, veggene og takplaten har varierende tykkelser gjennom hele profilet. Det er i alt i overkant av 30 ulike tverrsnitt, som har varierende tykkelse, fall, lengde, høyde og bredde.



Figur 2a. Typisk tverrsnitt med bunnplate



Figur 2b. Typisk tverrsnitt med stripefundamenter

Fastholdingseffekten mellom støpeavsnitt er i hovedsak styrt av stivhetsrelasjonen mellom den konstruksjonen som støpes og den konstruksjonen som det støpes mot. Størst grad av fastholding får man når f. eks. en slank vegg støpes på en massiv bunnplate. Faren for opprissing er dermed styrt både av temperaturforskjellen mellom konstruksjonselementene, og av fastholdingen, som er gitt av konstruksjonens geometri. Totalbildet er relativt uoversiktlig.

Dersom vi f. eks. øker veggtykkelsen uten å endre dimensjonen på bunnplatene vil vi få to effekter:

- Temperaturdifferansen øker fordi gjennomsnittstemperaturen i veggen øker. Dette gir økt resulterende strekkspenning i veggen (og dermed økt rissindeks).
- Fastholdingen avtar, fordi veggen har større stivhet sammenlignet med bunnplaten. Dette gir redusert resulterende strekkspenning i veggen (og dermed redusert rissindeks).

Totaleffekten kan bare vurderes gjennom en analyse som inkluderer både geometri, betongegenskaper og randbetingelser. På generell basis kan vi likevel gjøre noen praktiske vurderinger av effekten av fastholdingsforhold, som åpenbart vil ha betydning for valg av betongtype for de ulike konstruksjonsdelene.

Største temperaturforskjell mellom takplate og vegg under herding av takplatene er minst like stor som temperaturforskjellen mellom vegg og bunnplate ved herding av veggene. Faren for opprissing i takplaten er likevel generelt mindre enn i veggene, fordi takplaten er svært stiv og stivhetsrelasjonen dermed er mer gunstig, slik at fastholdingsgraden blir mindre.

Av samme grunn er faren for opprissing i veggene generelt mindre ved støp mot stripefundamenter enn mot massiv bunnplate.

Økt veggtykkelse følges normalt av økte dimensjoner på bunnplate eller fundament, slik at fastholdingsgraden bibeholdes, samtidig som temperaturdifferansen øker. I praksis vil vi derfor som regel oppleve at risstendensen øker med økende veggtykkelse.

6 Analysearbeidet

6.1 Utvalg av tverrsnitt

Av de i overkant 30 ulike tverrsnittene i prosjektet, ble i alt 17 ulike variasjoner i tverrsnittet analysert. Variasjon i tverrsnittets fallretning, høyde og bredde påvirker resultatet fra analysen i mindre grad. Det ble derfor valgt å gjøre analyser av alle kombinasjoner av veggtykkelser og bunnplate eller fundament som var i prosjektet, uten hensyn til eventuelt tverrfall, og med representativ totalbredde og -høyde. Kombinasjonene er vist i tabell 1.

Tabellen gjelder gjennomførte innledende spenningsanalyser for vegg. Det er i tillegg utført en innledende analyse for takplate, og en rekke supplerende analyser for vegg og takplate ved avvikende temperaturresultater, og ved spesielle værforhold.

Tabell 1. Valgte kombinasjoner av veggtykkelser på bunnplate og fundament

Vegg (mm)	Stripe-fundament (mm)	Bunnplate (mm)
600	-	600
600	-	700
600	1000	-
700	-	700
700	-	1000
750	-	800
750	-	1000
750	-	1200
750	1000	-
800	-	800
800	-	1000
800	1000	-
900	-	900
900	-	1100
900	-	1200
900	1000	-
1200	-	1100

6.2 Valg av beregningsforutsetninger og randbetingelser

Det er i praksis ikke mulig å dekke opp alle mulige kombinasjoner av randbetingelser gjennom byggeprosessen ved analyser av denne typen. Det er derfor valgt å bruke et sett med randbetingelser som representerer relativt ugunstige værforhold. Hensikten var som tidligere poengtert å danne et analytisk grunnlag for valg av riktig betongtype til hvert enkelt støpeavsnitt. Ved endelig valg av betongtype på basis av oppnådde rissindekser ble det lagt på en ekstra sikkerhet, for å ta høyde for mer ugunstige randbetingelser enn det som er brukt i analysen. Det ble også gjennomført supplerende beregninger før støp under spesielt krevende forhold, og i noen tilfeller ble også betongtypen endret som en følge av resultatet fra disse supplerende analysene.

Spenningsanalysene ble i hovedsak gjort med følgende beregningsforutsetninger og randbetingelser:

- Fersk betongtemperatur: 20°C.
- Omgivelsestemperatur (luft, grunn, herdet betong): 0°C
- Flygeaskedoseringer: 20%, 30% og 40% (alle med virkningsfaktor $k=1$ for hele FA-mengden)
- Vindhastighet 1 m/s
- Avforskaling etter 3 døgn. Evt. senere tildekking med plast eller herdemembran vil påvirke spenningsberegningene i liten grad, og ble derfor utelatt i analysene.

Resept- og materialdata ble brukt som vist i avsnitt 4.3.

6.3 Resultater fra spenningsanalysene

Tabell 2 viser beregnet maksimal rissindeks, r , og tilhørende maksimal herdetemperatur i vegg for de aktuelle kombinasjonene av tverrsnittstykkelser for bunnplate/ stripefundament og vegg. $r = 1,0$ indikerer full utnyttelse av strekkapasiteten i betongmaterialet, og høy sannsynlighet for opprissing. Akseptkriteriet $r < 0,75$ indikerer akseptabel risiko for gjennomgående opprissing. Reduksjonen fra 1,0 til 0,75 er lagt inn for å ta høyde for variasjon og usikkerhet i beregningsmodell, materialdata og randbetingelser

I tabellen er rissindeks høyere enn 0,75 markert med rød bakgrunnsfarge, mens rissindekser lavere enn 0,75 har grønn bakgrunnsfarge. Tabellen viser at betongen med 30 % FA generelt gir for høy rissindeks i vegg støpt på kontinuerlig bunnplate, men gir akseptable resultater for vegg støpt på stripefundament. Dette er et utslag av ulike stivhetsrelasjoner og dermed ulik fastholdingsgrad, som diskutert i avsnitt 5.

Betongen med 40 % FA gir akseptable rissindekser for alle tverrsnittskombinasjoner.

Tabell 2. Resultater fra spenningsanalysen for de aktuelle kombinasjonene av betongtype, veggtykkelser og tykkelse på bunnplate / stripefundament.

Vegg	Stripe-fundament (mm)	Bunnplate (mm)	30 % FA		40 % FA	
			Rissindeks	Maks. temp. (°C)	Rissindeks	Maks. temp. (°C)
600	-	600	0,76	41	0,61	35
600	-	700	0,77	41	0,61	36
600	1000	-	0,64	41	-	-
700	-	700	0,80	44	0,64	39
700	-	1000	0,81	44	0,68	39
750	-	800	0,83	46	0,67	41
750	-	1000	0,81	46	0,66	40
750	-	1200	0,84	46	0,68	41
750	1000	-	0,67	46	-	-
800	-	800	0,83	47	0,68	42
800	-	1000	0,83	47	0,68	42
800	1000	-	0,67	47	-	-
900	-	900	0,86	49	0,72	44
900	-	1100	0,86	49	0,71	43
900	-	1200	0,87	49	0,72	43
900	1000	-	0,68	49	-	-
1200	-	1100	0,89	55	0,75	49

7 Bruk av analyseresultatene

7.1 Valg av betong

Resultatene fra spenningsanalysen ga grunnlag for å velge betongtyper til de ulike konstruksjonsdelene i betongkultverten i dagsonen. Hovedprinsippet er vist i tabell 3. I praksis ble det gjort en rekke tilpasninger underveis, f. eks ved spesielle værforhold, eller der temperaturmålingene viste tendens til endrete bindemiddelegenskaper. De fleste tilpasningene ble basert på supplerende temperatur- og spenningsanalyser.

Legg merke til at betongene med tilsatt FA har beholdt betegnelsene etter NS-EN206 og SVV Håndbok R762, selv om k-verdi og FA-innhold tildels fraviker standarden og prosesskodens regler. Denne tilpasningen ble gjennomført både i beskrivelsesteksten på tegningsunderlaget.

Tabell 3. Valg av betongtyper

Konstruksjonsdel	Betongkvalitet	PP-fiber	FA-andel k=1
Bunnplater	B45 MF40 SV40	-	20 %
Stripefundamener	B45 MF40 SV40	-	20 %
Vegger på bunnplater	B45 MF40 SV40	2 kg	40 %
Vegger på stripefundamenter	B45 MF40 SV40	2 kg	30 %
Takplater	B45 MF40 SV40	2 kg	30 %

I bunnplate og stripefundamenter ble det brukt ordinær SV40 – kvalitet, dvs. ikke lavvarmebetong. Bindemidlet hadde her et FA-innhold på 20 %. Disse konstruksjonsdelene er ikke utsatt for fastholdingseffekter, og lavvarmebetong (30% eller 40% FA) ble bare benyttet i enkelttilfeller under værforhold der vi fikk utfordringer med kravet til maksimal herdetemperatur.

7.2 Sammenligning av beregnede og målte temperaturer med kontraktens temperaturkrav

Kontrakten ga følgende generelle temperaturkrav. Legg merke til at kravet om temperaturdifferanse mellom støpeavsnitt (<15°), slik det er gitt i Prosesskode II (2012) ikke er gjengitt i kontrakten.

- Maksimal temperatur under herding skal ikke overstige 65 °C.
- Tilstøtende betong skal holde en temperatur på minimum 10 °C.
- Temperaturdifferansene i betongtverrsnittet skal ikke overskride 20 °C.

Maksimal herdetemperatur ble dokumentert ved å logge temperaturen i et punkt identifisert gjennom den innledende temperaturanalysen. Kravet til maksimal herdetemperatur ga generelt få utfordringer. I de varmeste periodene ble de tykkeste takplatene støpt med betongresepten med 40 % FA for å tilfredsstille dette kravet.

I vinterhalvåret ble det i støpt inn varmekabler i bunnplate, stripefundament og topp vegg der analysene tilsa at vi kunne få problemer med kravet til temperatur i tilstøtende betong ved bruk av ordinære tiltak som tildekking og bruk av gassfyring.

Kravet til maksimal tillatt temperaturdifferanse på 20°C i betongtverrsnittet ga en del utfordringer, spesielt ved støp av bunnplater og takplater i vinterhalvåret, selv om det på generell basis ble brukt ethafoammatter på alle uforskalte flater under vinterforhold.

Beregnet akseptabel maksimal rissindeks i området 0,60-0,75, slik det er gjengitt i tabell 2, ga en beregnet maksimal temperaturdifferanse mellom bunnplate /stripefundament og vegg (beregnete gjennomsnittstemperaturer i seksjonene) på 21-28 °C. Denne differansen er vesentlig høyere enn det generelle kravet på 15 °C i Prosesskode II. I praksis ville det ikke vært mulig å tilfredsstille dette temperaturkravet uten kombinert bruk av lavvarmebetong med 40% FA, og samtidig bruk av varmekabler i stripefundament/bunnplate og kjølerør i veggene. Det generelle kravet er frafalt i den aktuelle kontrakten.

7.3 Observert risstendens

Omfanget av opprissing pga. fastholdt termisk og autogen dilatasjon var generelt lite i prosjektet. Vi har konkludert at prinsippet med valg av betongtyper og herdetiltak basert på en innledende spenningsanalyse har fungert tilfredsstillende. De rissene som har oppstått kan i all hovedsak tilbakeføres til spesielle omstendigheter:

- Variasjonen i bindemiddelets, og spesielt sementens varmeproduksjon var større enn forutsatt. Vi ble først oppmerksom på dette da enkelte temperaturmålinger ga uforholdsmessige store avvik fra de innledende analysene. Kalibrerte analyser ga i noen av disse tilfellene rissindeks opp mot 1,0, og dermed høy sannsynlighet for opprissing.
- En del av betongarbeidene ble gjennomført under værforhold som var vesentlig mer ugunstige enn det som var lagt inn i de innledende analysene. Her ble det gjennomført supplerende analyser, som viste at vi ikke ville klare kravet til maksimalt tillatt rissindeks, selv ved bruk av ekstraordinære tiltak som oppvarming av fundamentene med varmekabel.
- Risstendensen er også litt høyere enn forventet i enkelte seksjoner der varmemengden og temperaturforholdene er som forutsatt i analysene. Dette indikerer og bekrefter antagelsen om for stor usikkerhet i bestemmelsen av mekaniske parametre som strekkfasthets- og E-modulsutvikling.

I etterkant innser vi at det også burde vært gjennomført flere herdekasseforsøk gjennom prosjektet, for å avdekke den normale variasjonen i varmeutvikling fra de aktuelle bindemiddelsammensetningene. Vi burde sannsynligvis også gjennomført forsøk for å bestemme reell strekkfasthets- og E-modulsutvikling for lavvarmebetongene, og dermed redusere usikkerheten i analyseresultatene. Som nevnt ga ikke kontrakten kostnadsdekning for slik prøving.

To-dimensjonal analyse gir i seg selv også en viss usikkerhet, spesielt der geometrien gir et tre-dimensjonalt spenningsbilde. Dette gjelder f. eks ved vertikale støpeskjøter i kulvertvegger. Crack TeSt Coin gir en mulighet til å definere delvis fastholding mot translasjon og rotasjon i slike situasjoner, men dette gir svært usikre resultater.

7.4 Lavvarmebetongens produksjonsegenskaper og fasthetsutvikling

Lavvarmebetongene hadde generelt meget gode støpelighetsegenskaper, helt på nivå med tilsvarende ordinær konstruksjonsbetong mht. pumpbarhet, fyllingsevne og komprimerbarhet. Betong med 2% PP-fiber er generelt uegnet som SKB-betong. Vi ville sannsynligvis valgt SKB-betong til veggstøp uten krav til brannmotstand, eller med redusert krav til mengde PP-fiber.

Lavvarmebetong og andre betongtyper med høy andel tilsetningsmaterialer har treg egenskapsutvikling. Dette betyr at en vesentlig del av fasthetsutviklingen vil skje etter 28 døgns herding, som definerer samsvarskriteriet for oppnådd trykkfasthet for hver enkelt fasthetsklasse. Prosjekteringsstandarden NS-EN 1992-1-1 forutsetter en viss fasthetstilvekst etter 28 døgn, for lavvarmebetonger er denne tilveksten normalt vesentlig større enn for ordinær konstruksjonsbetong. Det kan derfor være naturlig å flytte samsvarskriteriet til 56 døgns herding for lavvarmebetong.

I Rv. 150 Fellesprosjektet Granfosstunnelen ble det valgt å søke om bruk av styringsfasthet iht. reglene i SVV Håndbok R762, Prosesskode II fra 2015. Prinsippet går ut på å flytte samsvarskriteriet for fasthetsklassene fra 28 til 56 døgn, og samtidig dokumentere forholdet mellom oppnådde trykkfastheter ved 28 og 56 døgns alder. Dette blir så brukt til å etablere et nytt samsvarskriterium ved 28 døgns alder. Dette kriteriet kalles «styringsfasthet». Søknaden ble godkjent av byggherren.

Lavvarmebetong med PP-fiber ga betydelige problemer med å oppnå stabilt luftinnhold i betongen. Dette problemet er primært knyttet til PP-fiberen og ikke lavvarmebetongen i seg selv, og vil ikke bli videre omtalt her.

8 Håndbok R762 Prosesskode II, 2015

SVV Håndbok R762, Prosesskode II «Standard beskrivelsestekster for broer og kaier» kom i ny versjon i 2015 (oppdatert på nytt i 2018). Håndboken innfører en ny betongkvalitet, SV-lavvarme, som skal kunne beskrives og benyttes i massive betongkonstruksjoner.

SV-Lavvarme skal tilfredsstillende bestandighetsklasse MF45 iht. NS-EN 206, og skal ellers tilfredsstillende følgende krav:

- Sement skal være blant de godkjente sementproduktene i Prosesskode II.
- Innholdet av silikastøv skal være 3 – 5 %.
- For flygeaske tilsatt som separat delmateriale ved blanding av betong regnes $k = 0,7$
- Summen av totalt flygeaskeinnhold og eventuelt slagginnhold i sement skal ikke overstige 40 %
- Ekstra slagg tilsatt på blandeverk aksepteres ikke.

Det spesielle med SV-Lavvarme er at betongspesifikasjonen gir et funksjonskrav til maksimal tillatt temperaturstigning i en definert herdekasse, og med definert omgivelsestemperatur. Selve herdekassen er lik den Skanska lenge har benyttet, dvs. en kubisk finerkasse foret innvendig med 100 mm XPS, totalt innvendig volum 1m^3 . Kravet til maksimal temperaturstigning er gitt i tabell 4.

Tabell 1. Krav til maksimal temperaturøkning i herdekasse avhengig av omgivelsestemperaturen

Gjennomsnittlig omgivelsestemperatur, T_{snitt}	Krav til maksimum temperaturøkning i herdekassen, ΔT
25 °C	36 °C
20 °C	35 °C
15 °C	34 °C
10 °C	33 °C
5 °C	32 °C
0 °C	31 °C
-5 °C	30 °C

Lavvarmebetongen med 40 % flygeaske og 2 kg PP-fiber i Granfossprosjektet hadde en maksimaltemperatur i herdekassen på 51 °C. Utgangstemperaturen var 16 °C, dette gir en temperaturøkning på 35 °C. Omgivelsestemperaturen i luften varierte mellom 0 °C og 10 °C under herdekasseforsøket. Denne betongen tilfredsstiller derfor ikke funksjonskravet til SV Lavvarme, som i dette tilfellet er maksimal temperaturstigning 32°C.

Dette skyldes primært at to bruken av PP-fiber nødvendiggjør et noe høyere bindemiddelinnhold, og forårsaker dermed noe høyere varmeutvikling. I dette tilfellet har den økte sementmengden gitt en økning i maksimal temperatur i herdekassen på omtrent 3 °C.

Prosess 84.56 *Beregning og styring av herdetempertur og rissrisiko* er en ny post i Prosesskode II fra 2015. Prosessen omfatter simuleringsberegninger av herdetemperatur og vurdering av risiko for opprissing. Denne posten tilsvarer i prinsipp de tiltakene som er gjennomført i Granfossprosjektet. I posten ligger kartlegging av nødvendige tiltak, gjennomføring av tiltakene, samt kontroll og styring av utførelsen i samsvar med beregningsresultatene.

Simuleringsberegningene skal utføres ved bruk av et anerkjent 2D eller 3D herdeteknologiprogram, og det er beskrevet at rissindeksen ikke skal overstige 0,75. Rissindeksen er som tidligere definert forholdet mellom største opptredende strekkspenning og betongens enaksiale strekkfasthet på samme tidspunkt.

I tillegg er det satt opp en egen prisbærende post for kartlegging av nødvendig inndata til å gjennomføre spenningsanalyser, post 84.57 *Kartlegging av herdeteknologiske parameter for betong*.

Som et minimum omfatter en slik kartlegging:

- Varmeutvikling
- Termisk utvidelseskoeffisient
- Autogent svinn
- Utvikling av E-modul
- Enaksial strekkfasthetsutvikling
- Kryputvikling (verdier kan hentes fra erfaringsdata/litteratur)

Omfanget av materialprøving er altså forutsatt å være vesentlig større enn det som ble gjennomført i Granfossprosjektet, der bare varmeutviklingen ble spesifikt prøvd for lavvarmebetongen.

9 Oppsummering

I Rv. 150 Fellesprosjektet Granfosstunnelen er det gjennomført spenningsanalyser for å kunne optimalisere bruken av lavvarmebetong og nødvendige herdetiltak, og dermed minimalisere faren for opprissing pga. fastholdt termisk og autogen dilatasjon. Analysene, planlagte og gjennomførte herdetiltak, samt dokumentasjonsarbeid på byggeplass har delvis erstattet kontraktskrav rettet mot temperaturdifferanser i betongkonstruksjonene under herding.

Kravene i kontrakten var opprinnelig fokusert på temperaturnivå og temperaturdifferanser over tverrsnittet. Faren for gjennomgående opprissing pga. fastholdt termisk og autogen dilatasjon var dermed ikke godt nok ivaretatt. Det kontroll- og prøvingsregimet som ble avtalt etter kontraktsinngåelse hadde som mål å ivareta alle sider ved termiske effekter i byggefasen.

Kartlegging av materialdata, spesielt betongens varmeutvikling, er nødvendig for å redusere usikkerheten i innledende analyser. Andre parametere som har stor betydning for resultatet, slik som strekkfasthetsutvikling, E-modulusutvikling og autogent svinn er bestemt med utgangspunkt i data fra pågående FoU-prosjekter og byggeprosjekter med tilsvarende betongsammensetning. Erfaringen fra Granfossprosjektet tilsier at en del sentrale mekaniske egenskaper bør prøves for den spesifikke materialsammensetningen dersom spenningsanalysene skal brukes for å styre materialvalg og herdetiltak slik det er gjort her. Dette er også i tråd med reglene i gjeldende SVV Håndbok R762, Prosesskode II «Standard beskrivelsestekster for broer og kaier».

Det er samtidig helt nødvendig at analysene kalibreres ved å sammenstille målte og beregnet temperaturforløp i konstruksjonene, og tilpasse analysen til de faktiske forholdene. Temperaturforløpet kan oppfattes som det viktigste lastbidraget i spenningsanalysen, og feil i dette forløpet gir direkte feil i beregningen av rissrisiko.

Den siste utgaven av Prosesskode 2 har poster for beskrivelse, prising og gjennomføring av spenningsanalyser i prosjekter. Dette er et viktig bidrag for å sikre økt kvalitet i framtidige prosjekter, og samtidig øke kompetansen hos byggherre, beskrivende og utførende ledd i byggeprosessen.

Referanser

1. Bjøntegaard, Ø. (2009). *Volumendringer og risstendens i betong*. Statens Vegvesen Vegdirektoratet
2. Smeplass, S., Bjøntegaard, Ø., Kompen, R., & Haram, E. (2010). *Senketunnelen i Bjørvika, erfaringsrapport. Kontroll med opprissing i betongens herdefase*. Rapport nr. 2580, Statens Vegvesen, Vegdirektoratet
3. Statens Vegvesen (2015). *Håndbok R762 Prosesskode 2 Standard Beskrivelse for bruer og kaier Hovedprosess 8*.
4. Pedersen, B. (2013). *Trykkfasthet og E-modul for SV-40 betong - En studie av tilslagetets betydning*. Statens Vegvesens rapporter, Nr. 177

