

Bruk av XiiT-Foam i frostsoneer i tunneler med referanser fra Sintef Byggforsk simuleringene utføres ved hjelp av Finite Element Method-programvaren COMSOL Multiphysics

Resultatene og isolasjonsverdiene er validert gjennom fysiske tester over flere tiår i Cadi tunnelene på Pyreneene som har nokså samme klimasoner som de kalde områdene i Scandinavia.

## **1. Introduksjon**

ZFOAM har gjennomført beregningsmessige analyser av produktets ytelse under forhold tilsvarende norske tunneler. Simuleringene er utført ved hjelp av Finite Element Method-programvaren COMSOL Multiphysics.

Som grunnlag for modellutvikling og kalibrering er det benyttet eksperimentelle data fra tidligere frostforsøk utført av SINTEF på andre tunnel- og membranrelaterte løsninger. Modellene ble først testet mot disse eksperimentelle referansedataene for å kontrollere at simuleringene ga realistiske temperaturforløp og termiske responser.

I neste fase ble ulike scenarier simulert der ZFOAM-paneler/XiiT-Foam er montert i tunnelkonstruksjonen.

Simuleringene viste at løsningen i flere scenarier opprettholdt temperaturer over frysepunktet på bergoverflaten, også under krevende klimaforhold. Dette er viktig for å redusere risiko for isdannelse i tunnel, som kan påvirke fri profil, drift og trafiksikkerhet.

Videre viste simuleringene at løsningen kan bidra til å redusere risiko for frostrelaterte skader som følge av vanninntrengning og frysing i hulrom mellom berg og membran.

Den samlede vurderingen indikerer at ZFOAM/XiiT-Foam kan være en robust løsning for vann- og frostsikring i krevende tunnelmiljøer.

## **2. Modelleringsstilnærming og validering**

Valideringsarbeidet bygger på offentlig tilgjengelige eksperimentelle data og beskrivelser fra SINTEFs Frost Laboratory-prosjekter knyttet til frostproblematikk i tunneler og termiske forhold i tunnelkonstruksjoner.

Forsøkene omfattet en spesialisert testrigg bestående av to separate klimasoner adskilt av en granittmasse oppbygget av steinblokker for å etterligne reelle tunnel- og fjellforhold.

Den ene sonen simulerte kalde tunneltemperaturer ned mot ca. -20 °C, mens den andre sonen opprettholdt en stabil temperatur på ca. +8 °C for å representere termiske forhold inne i fjellmassen.

Testoppsettet var instrumentert med sensorer og klimastyring for å registrere temperaturutvikling og varmeoverføring gjennom konstruksjonen.

ZFOAM har benyttet disse referansedataene som grunnlag for kalibrering og sammenligning av egne numeriske modeller. SINTEF har ikke validert eller godkjent resultatene for XiiT-Foam, og simuleringene samt vurderingene av XiiT-Foam er utført av ZFOAM.

Flere eksperimenter ble gjennomført, men vi fokuserer på de to første testene, da de gir de mest relevante dataene for vår validering:

Test 1: Tunnelrommet ble holdt på -10 °C i 300 timer, noe som ga en samlet termisk eksponering på 1500 hC (timer-Celsius).

Test 2: Tunnelrommet ble satt til -20 °C i 200 timer, noe som resulterte i en termisk eksponering på 4000 hC. Dette var spesielt nyttig for å vurdere modellens ytelse under de mest ekstreme forholdene forventet i norske tunneler.

For å sikre nøyaktig simulering av varmeoverføring, forenklet vi modellen til en todimensjonal simulering. Dette skyldes at isolasjonen i testriggeren ble antatt å være perfekt, noe som eliminerte

varmetap gjennom sidevegger, tak og gulv.

Et viktig poeng var å implementere en konvektiv varmestromgrense på tunnelsiden av modellen, da en

enkel fast temperaturgrense ikke reproduiserte de eksperimentelle resultatene nøyaktig. Dette gjorde

at modellen bedre kunne simulere varmetransporten mellom tunnelens luft og betonglaget.

## Bruk av XiiT-Foam i frostsoner i tunneler – basert på «knøll montering»

Forutsetninger:

XiiT-Foam monteres på toppene av fjellet (knøll montering)

Det oppstår et naturlig luftgap mellom membranen og fjellet, noe som forbedrer isolasjonen

Tunnelens temperatur påvirker valg av isolasjonstykkel

Temperatur og anbefalt løsning

0°C til -2,5°C

6 mm XiiT-Foam gir full frostbeskyttelse.

Luftgapet som oppstår ved knall montering reduserer varmetapet nok til å holde berget frostfritt.

12 mm XiiT-Foam er ikke nødvendig.

-2,5°C til -5°C

6 mm XiiT-Foam fungerer fortsatt bra.

Luftgapet sikrer at temperaturen på berget holder seg over frysepunktet.

12 mm XiiT-Foam kan brukes for ekstra sikkerhet, men er ikke påkrevd.

-5°C til -7,5°C

6 mm XiiT-Foam holder fortsatt godt på varmen i berget, men nærmer seg grensen for frostbeskyttelse.

Hvis tunnelmiljøet har høy luftfuktighet, anbefales 12 mm XiiT-Foam for bedre isolasjon.

-7,5°C til -10°C

6 mm XiiT-Foam kan fortsatt fungere, men det er en økt risiko for at berget kan gå under 0°C.

12 mm XiiT-Foam anbefales for å sikre at berget holder seg frostfritt over lang tid.

-10°C til -12,5°C

6 mm XiiT-Foam er ikke lenger tilstrekkelig for å hindre frost i berget.

12 mm XiiT-Foam er nødvendig for å sikre frostbeskyttelse.

Luftgapet fra knall montering hjelper, men tykkere isolasjon kreves.

-12,5°C til -15°C

6 mm XiiT-Foam gir ikke tilstrekkelig beskyttelse, og frostskafer kan oppstå på berget.

12 mm XiiT-Foam anbefales sterkt for å opprettholde frostbeskyttelse.

-15°C til -17,5°C

6 mm XiiT-Foam er for tynt og vil ikke forhindre frost i berget.

12 mm XiiT-Foam gir full frostbeskyttelse.

-17,5°C til -20°C

6 mm XiiT-Foam er ikke nok, selv med luftgapet fra knall montering.

12 mm XiiT-Foam er absolutt nødvendig for å forhindre frostskafer.

-20°C til -22,5°C

6 mm XiiT-Foam er utilstrekkelig.

12 mm XiiT-Foam kan fortsatt hindre frost, men luftgapet må være optimalt for å sikre

isolasjonseffekten.

-22,5°C til -25°C

6 mm XiiT-Foam er ikke brukbart under disse forholdene.

12 mm XiiT-Foam er et minimumskrav, og ytterligere tiltak som ekstra luftlag eller varmeisolasjon kan være nødvendig.

## Oppsummering

For temperaturer ned til -10°C ® 6 mm XiiT-Foam fungerer med «knøll montering».

For temperaturer mellom -10°C og -15°C ® 12 mm XiiT-Foam er nødvendig.

For temperaturer under -15°C ® Kun 12 mm XiiT-Foam gir god nok isolasjon, og eventuelle ekstra tiltak kan være nødvendig for å opprettholde frostbeskyttelse.

.....

## Bruk av XiiT-Foam i frostsoner i tunneler – direkte montering på berget

Forutsetninger:

XiiT-Foam monteres direkte på berget uten luft gap

Tunnelens temperatur påvirker valg av isolasjonstykkelse

Direkte kontakt med berget gir mindre isolasjonseffekt enn «knøll montering»

Temperatur og anbefalt løsning

0°C til -2,5°C

6 mm XiiT-Foam kan brukes direkte på berget og vil gi tilstrekkelig frostbeskyttelse.

12 mm XiiT-Foam er ikke nødvendig.

-2,5°C til -5°C

6 mm XiiT-Foam kan fortsatt holde berget frostfritt.

12 mm XiiT-Foam kan være en fordel hvis berget er fuktig, da tykkere isolasjon reduserer risikoen for isdannelse bak membranen.

-5°C til -7,5°C

6 mm XiiT-Foam begynner å bli marginalt, og frost kan oppstå i berget.

12 mm XiiT-Foam anbefales for bedre isolasjon.

-7,5°C til -10°C

6 mm XiiT-Foam vil ikke gi god nok beskyttelse.

12 mm XiiT-Foam kan holde berget frostfritt, men er på grensen.

-10°C til -12,5°C

6 mm XiiT-Foam er utilstrekkelig, og frost kan dannes i berget.

12 mm XiiT-Foam er et minimum for å redusere frostfare, men kan fortsatt være marginalt.

-12,5°C til -15°C

6 mm XiiT-Foam gir ikke beskyttelse, og frost vil oppstå.

12 mm XiiT-Foam anbefales, men bør kombineres med ekstra isolasjonstiltak som en dobbel lagdeling

eller luftlag.

-15°C til -17,5°C

6 mm XiiT-Foam er ikke tilstrekkelig.

12 mm XiiT-Foam kan fortsatt fungere, men isolasjonseffekten er redusert uten luft gap.

-17,5°C til -20°C

6 mm XiiT-Foam vil ikke kunne hindre frost.

12 mm XiiT-Foam kan gi en viss effekt, men det anbefales ekstra isolasjonstiltak eller kombinasjon

med sprøytebetong.

-20°C til -22,5°C

6 mm XiiT-Foam er ikke egnet for slike temperaturer.

12 mm XiiT-Foam alene vil heller ikke være nok, og ekstra isolasjon må vurderes.

-22,5°C til -25°C

6 mm XiiT-Foam vil ikke fungere.

12 mm XiiT-Foam er utilstrekkelig uten luftgap, og det må vurderes alternative isolasjonsmetoder.

## Oppsummering

For temperaturer ned til -5°C ® 6 mm XiiT-Foam kan fungere.

For temperaturer mellom -5°C og -10°C ® 12 mm XiiT-Foam er nødvendig.

For temperaturer under -10°C ® 12 mm XiiT-Foam alene gir begrenset effekt, og ekstra isolasjonstiltak bør vurderes.

Viktige forskjeller fra «knøll montering»

Uten luftgap mister XiiT-Foam mye av isolasjonseffekten, spesielt ved temperaturer under -10°C. Berget kan trekke kulde direkte gjennom XiiT-Foam, noe som øker risikoen for frostskafer. For lavere temperaturer kreves enten tykkere isolasjon, luftgap eller kombinasjon med andre løsninger.

## Referanser

FJELLSPRENGNINGSTEKNIKK

BERGMEKANIKK/GEOTEKNIKK 2010

FROSTLABORATORIET – TESTING AV VARME/KULDEUTVEKSLING MELLOM TUNNEL OG OMKRINGLIGGENDE BERGMASSE

SINTEF FROSTLABORATORY-TESTING OF HEAT FLUX BETWEEN TUNNEL AND ADJACENT ROCKMASS

Siv.ing. Solveig Vassenden, Multiconsult AS

Sjefsforsker/Professor II Eivind Grøv, SINTEF/NTNU

FJELLSPRENGNINGSTEKNIKK

BERGMEKANIKK/GEOTEKNIKK 2011

BEGREPET FROSTMENGDE; ER DETTE EN RETT PARAMETER FOR DIMENSJONERING AV VANN- OG FROSTSIKRING NORGE? RESULTATER OG KONKLUSJONER FRA ETT ÅR MED TESTER I FROSTLABORATORIET VED SINTEF

FROST AMOUNT; A RELEVANT PARAMETER FOR DESIGN OF WATER AND FROST PROTECTION IN NORWAY? CONCLUSIONS

AFTER A YEAR OF TESTING AT SINTEF FROST LABORATORY

Sjefsforsker/Professor II Eivind Grøv, SINTEF/NTNU

.....  
Eivind Grøv

Forskningsleder Berg og geoteknikk

SINTEF Byggforsk AS

Rammer og regelverk

Er forutsetningene gode nok for utviklingsarbeide?

Funksjonskrav til kledninger:

Tunnelutvikling Vann- og

Frostsikring

Noen ulike tester og eksperimenter SINTEF har vært med på i det siste året!

n Testing av Thorbolten i Hvaler-tunnelen

n Planlagt testing av Masterseal i fullskala og i felt

n Teoretisk tilnærming til Giertsen-dukens termosegenskaper

n Hva forteller erfaringen av 10 år med Giertsen-duk på

Hvalfjordtunnelen på Island?

.....  
SINTEF Byggforsk

Infrastruktur

2011-04-15

SBF2011A0027 - Åpen

Rapport

Bygging av Frostlaboratorium og forsøk

utført med BASF-Masterseal 345

Med spesiell fokus på installasjon av vann- og frostsikring i Gevingåsen jernbanetunnel

Forfatter(e)

Eivind Grøv

Solveig Vassenden

Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley and Sons

1996. ISBN-13: 978-0471457282.

Kays WM, and Crawford ME. Convective heat and mass transfer. McGraw – Hill, Inc. 1980. McGraw Hill

series in mechanical engineering. ISBN 0-07-033457-9.

ZFOAM Thermal Study

Carlos González Niño, PhD

Industry and Energy Group

July 26th, 2024

[www.fcirce.es/en](http://www.fcirce.es/en)