

# Sluttrapport FROST-prosjektet

Inge Hoff, Elena Sciblia, Karlis Rieksts, Benoit Loranger, Arnstein Watn

Utgitt: Mai 2020



Foto: NTNU

## Forord

Rundt 2011 ble det registrert teleskader på flere nybygde motorveier på Østlandet. Dette utløste et ønske om bedre kunnskap om frostsikring av veg og bane og eventuelt behov for å vurdere eksisterende retningslinjer for frostsikring. Da Forskningsrådets program Transport 2025 startet ble prosjektet "Frost protection of roads and railways" (også kalt FROST-prosjektet) finansiert i første søknadsrunde.

Denne rapporten gir en oppsummering av arbeidet som er gjort i prosjektet, resultat med konklusjoner og tilrådinger til hvordan resultatene kan innarbeides i krav og retningslinjer for frostsikring.

Prosjektet ble utført i perioden 2015 til 2019. Forskningen som er gjennomført danner et godt grunnlag for forbedring av krav og beskrivelser for frostsikring av veger og jernbaner i Norge.

Det totale budsjettet var på litt over 10 millioner og med sju partnere var det et relativt stort prosjekt i norsk målestokk.

Prosjektet inkluderte to PhD-studier og flere mastergrader. Prosjektet omfattet laboratorieforsøk, feltforsøk og teoretisk modellering og dette var en viktig forutsetning for et vellykket prosjekt og for å komme fram til resultat som gir grunnlag for tilrådinger i forhold til krav og retningslinjer for frostsikring.

### Partnere:

- NTNU
- SINTEF
- University Laval, Canada
- Statens vegvesen
- Bane NOR
- Leca As
- Glasopor

### Prosjektleder:

Elena Scibilia/Inge Hoff



Elena var prosjektleder med assistanse fra Inge gjennom prosjektet.

### PhD-studies

Karlís Rieksts



PhD-stipendet for Karlís var finansiert av prosjektet og Karlís gjorde ferdig sin avhandling in prosjektet i 2018. Tittelen var: *"Heat transfer characteristics of crushed rock and lightweight aggregate materials."* (Rieksts 2018)

Benoit Loranger



Benoits arbeid var også finansiert gjennom prosjektet og han gjorde ferdig sin avhandling i 2020. Tittelen var: *"Laboratory investigation of frost susceptibility of crushed rock aggregates and field assessment of frost heave and frost depth"* (Loranger 2020)

## Vitenskapelig rådgivningsgruppe:

Jostein Aksnes	Statens vegvesen
Juan Barrera	Bane Nor
Geir Berntsen	Statens vegvesen
Thomas Bjørhusdal	Glasopor
Tore Bye	Glasopor
Jean Coté	Univ. Laval
Guy Doré	Univ. Laval
Svein W. Danielsen	
Jon Hauge	Leca Norge
Ole A. Haugum	Forset Grus
Inge Hoff	NTNU
Oddvar Hyrve	Leca Norge
Elena Scibilia	NTNU
Kjell A. Skoglund	SINTEF/Statens
vegvesen	
Arnstein Watn	NTNU

Rådgivningsgruppen møttes ca 2 – 3 ganger per år gjennom prosjektet for å vurdere framgang og gi råd til gjennomføringen.

Rådgivningsgruppen var ikke et styre for prosjektet og har ikke kvalitetssikret rapporter og andre publikasjoner.

Alle publikasjoner i prosjektet, inkludert denne, er utformet av de som står oppført som forfattere. Rådgivningsgruppene eller organisasjonene som er representert har fått innsyn i arbeidet og mulighet til å kommentere resultat og konklusjoner, men er ikke ansvarlige for innholdet i det som er publisert.

## Bakgrunn

---

Teleskader er et problem for alle områder som har vintre av en viss varighet med temperaturer under null. For veg og jernbane er det viktig å ta hensyn til frost og teleskader for å unngå skader som kan redusere levetiden og redusere komfort og sikkerhet for brukere.

Norsk vegbygging har forandret seg betydelig siden 70-tallet ved at vi har byttet ut knust grus med knust berg i de granulære lagene. Klassifisering av telefarlighet, termisk ledningsevne og en del andre parametere som brukes i dagens regelverk er i stor grad basert på prosjektet Frost i Jord (1970 - 1976) (Frost action in soils (Frost i Jord) 1976).

Dagens praksis for å dimensjonere mot frost varierer noe fra land til land. Hovedforskjellen er om en prøver å beregne (og sette krav til) maksimalt telehiv (som Sverige) eller om en prøver å beregne frostdybden og dimensjonere slik at frosten ikke trenger ned i telefarlig materiale (som Norge).

En ser som regel bort fra telehiving i bære-, forsterknings- og frostsikringslag fordi disse materialene i utgangspunktet ikke blir vurdert til å være telefarlige så lenge materialkravene er oppfylt. Analyse av varmestrøm og telehiv i vegkonstruksjoner krever kunnskap om termiske egenskaper for alle lagene i konstruksjonen, inkludert undergrunns-materialene. Det er flere viktige parametere, men termisk konduktivitet har størst betydning ved modellering av varmestrømning. Å utvikle nye dimensjoneringsregler for veger i kaldt klima er en komplisert oppgave. Vi må bestemme egenskapene til knust berg avhengig av gradering, vanninnhold og mineralogi og oppdatere materialeegenskaper for isolasjonsmaterialer i henhold til produktutvikling og nye undersøkelser. I tillegg vil det være nødvendig å tilpasse regelverket til de kommende klimaendringene. NTNU tok på denne bakgrunn initiativ til forskningsprosjektet «Frostsikring av veg og jernbane» (2015-2019). Målsetning var å øke kunnskapen om dette komplekse området og skaffe vitenskapelig grunnlag for endringer i dimensjoneringsreglene.

I tillegg til midlene fra Forskningsrådet og egeninnsats fra de deltagende universitetene, har prosjektet også fått finansiell støtte fra Statens vegvesen, Bane NOR, Leca®, Glasopor® og National Research Council Canada. En beskrivelse av målsettinger og plan for prosjektet i startfasen er gitt i prosjektplanen (Kuznetsova, Hoff et al. 2016).

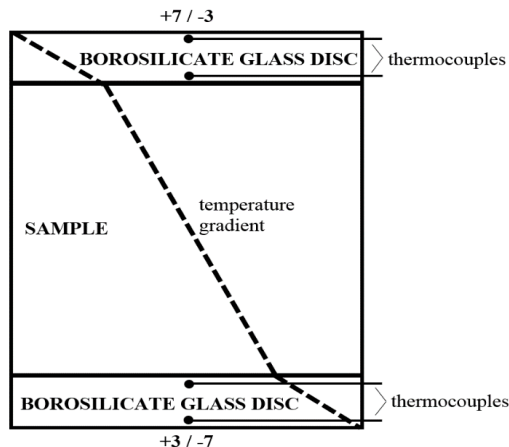
## Laboratorieforsøk

I denne delen av prosjektet har vi fokusert på å undersøke de frosttekniske egenskapene og telefarlighet for materialene. I tillegg er mekanisk styrke og stivhet viktig for at materialene skal oppføre seg som forutsatt i en vegkonstruksjon. De fysiske og mekaniske egenskapene både for naturlige materialer og frostisolasjonsmaterialer er imidlertid relativt godt kartlagt og dette ble derfor ikke prioritert i dette prosjektet.

### Konduktivitet (liten skala)

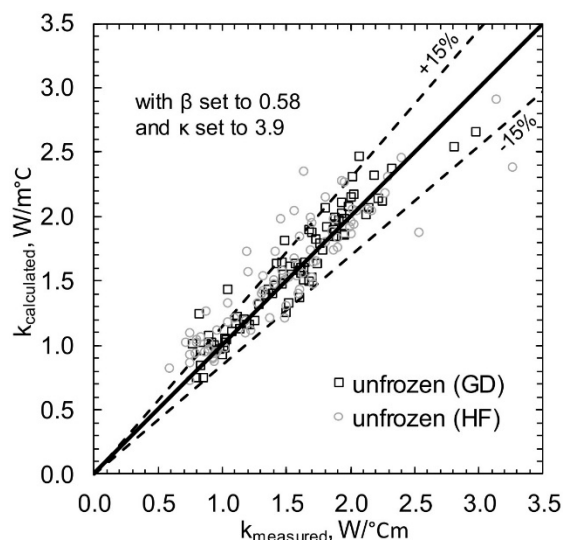
Termisk konduktivitet er den viktigste parameteren som må bestemmes for å kunne beregne varmestrøm og dermed hastighet og hvor dypt ned frosten kan trenge.

Hensikten med det forsøket er å måle termiske egenskaper hos materialet for å studere betydningen av mineralogi og finstoffinnhold. Dette forsøket kan teste materialer opp til 16 mm maksimum kornstørrelse. En prinsippskisse for forsøkene er vist i Figur 1.



Figur 1 Prinsippskisse av konduktivitetstest

Resultat fra forsøkene er vist i Figur 2.



Figur 2 resultat fra måling av konduktivitet

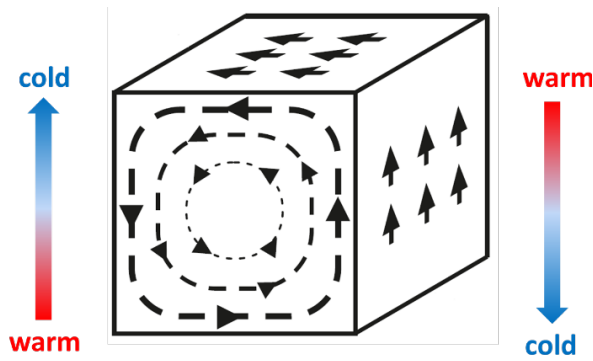
Resultatene fra forsøkene viser en god sammenheng med Côté-Konrads ligning (Côté and Konrad 2005) som kan brukes for å estimere konduktiviteten basert på mineralogien.

### Konveksjon

Bygging av veg og bane har i de siste årene benyttet større og grovere materialer basert på sprengt/knust berg i overbygningen. Disse massene har betydelig større hulrom enn de tradisjonelle naturlige massene og dette medfører at det kan oppstå konveksjon dersom temperaturgradienten blir stor nok. Naturlig konveksjon i materialer for veg og bane er ekstra ugunstig fordi det vil føre til stort varmetap om vinteren og økt motstand mot varmenedtrengning om sommeren.

Potensialet for konveksjon er undersøkt i storskala laborieforsøk.

Storskalaforsøket er en boks som er 1 x 1 x 1 m med mulighet for å kontrollere temperaturen i topp og bunn, Figur 3. Hensikten med dette eksperimentet er å studere mekanismene for varmestrøm gjennom grove steinmaterialer med steinstørrelse opp til 200 mm. Ved å forandre gradient og hvilken side som er varm/kald kan vi måle effekten av konveksjon alene eller i kombinasjon med ledning og stråling.

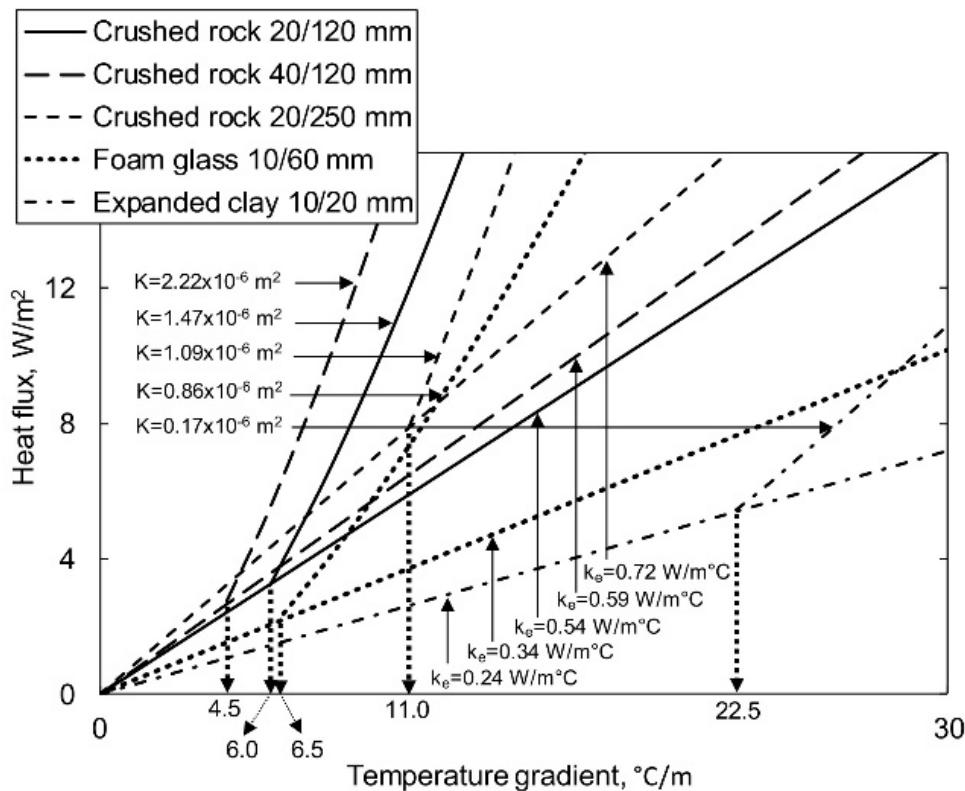


Figur 3 Prinsippkisse av varmestrøm i boksen

I en veg eller jernbane kan det oppstå store gradienter i perioder av året ( typisk i starten av vinteren -  $\nabla T > 20 \text{ }^\circ\text{C/m}$ ). Etter hvert vil gradientene normalt avta ( $\nabla T = 2 - 5 \text{ }^\circ\text{C/m}$ ).

Resultatene fra konveksjonstesten gjør det mulig å beregne permeabilitet for grove materialer. For disse materialene er det i praksis ikke mulig å måle permeabilitet med en standard geoteknisk metode. For å kunne modellere konveksjon er permeabiliteten nødvendig. Tabell 1 viser målt permeabilitet for noen materialer.

Et utvalg av resultatene fra konveksjonsforsøkene er vist i Figur 4.



Figur 4 Resultat fra konveksjonstest – knekkpunktene viser gradienten der konveksjon starter

Tabell 1 Permeabilitet for noen materialer med åpen gradering

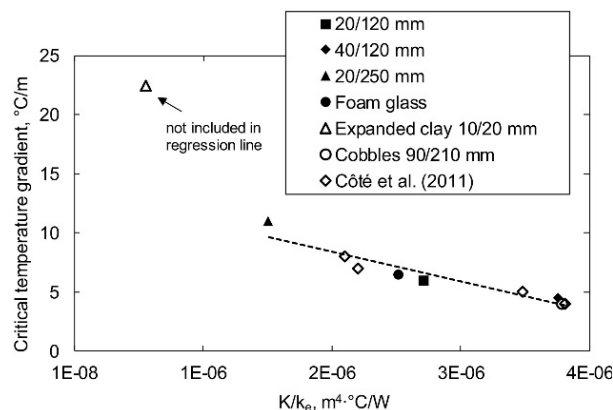
Material	Intrinsic permeability, $\text{m}^2$
Crushed rock 20/120	$1.47 \times 10^{-6}$
Crushed rock 40/120	$2.2 \times 10^{-6}$
Crushed rock 20/250	$1.09 \times 10^{-6}$
Foam glass 10/60	$0.86 \times 10^{-6}$
Expanded clay 10/20	$0.17 \times 10^{-6}$

Resultatene viser at det er mulig å provosere konveksjon ( $q_{\uparrow} > q_{\downarrow}$ ) i alle de undersøkte materialene, men temperaturgradienten som kreves er svært forskjellig. Som forventet er det de mest åpne materialene (40 – 120 mm) som viser konveksjon ved lavest temperaturgradient.

Permeabiliteten er den viktigste faktoren som avgjør om konveksjon vil oppstå i knust fjell. For isolasjonsmaterialer kan imidlertid også den lave termiske ledningsevnen føre til konveksjon fordi det vil gi en høy termisk gradient.

Både høy permeabilitet og lav ledningsevne vil føre til at grenseverdien for temperaturgradient som kan gi konveksjon ( $\nabla T_c$ ) vil bli lav. Isolasjonsmaterialene som har relativ lav permeabilitet kan likevel, på grunn av høy gradient, få konveksjon. Figur 5 viser  $\nabla T_c$  som funksjon av permeabilitet og effektiv termisk ledningsevne.

Flere detaljer finnes i (Rieksts, Hoff et al. 2019)



Figur 5 Grenseverdi for termisk gradient mot permeabilitet og effektiv termisk ledningsevne

## Teleforsøk

Tradisjonelt har vi i Norge vurdert telefarlighet basert på kornfordeling (egentlig andel korn mindre enn 20  $\mu m$ ).

Tabell 2 Krav til telefarlighet i håndbok N200

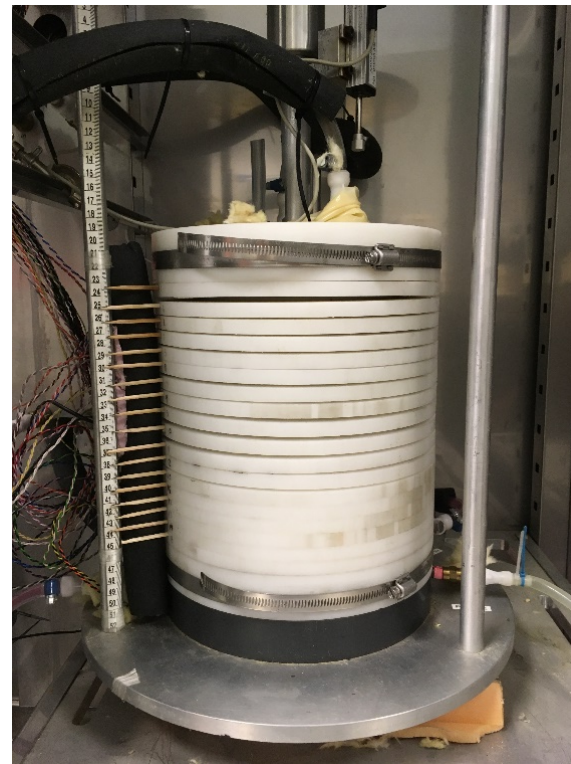
Telefarlighetsklassifisering			
Klasse	Masseprosent materiale < 22.4 mm		
	< 2 $\mu m$	< 20 $\mu m$	< 200 $\mu m$
Ikke telefarlig T1		< 3	
Litt telefarlig T2		3 – 12	
Middels telefarlig T3		> 12	< 50
Meget telefarlig T4	< 40	> 12	> 50

Flere forsøk har vist at det også er andre forhold som påvirker telefarligheten for materialene.

Segregasjonspotensialet (SP) er en indeks for å kvantifisere telefarlighet for et materiale. Det gir et lineært forhold mellom

vanninnstrømningshastighet og termisk gradient ved stabil tilstand (Konrad and Morgenstern 1981). Dette konseptet har blitt brukt i mer enn 30 år av vegmyndighetene i Quebec og i andre andre områder som Canada (Nixon 1982), U.S.A. (Rieke 1983) og Japan (Fukuda and Kinosita 1985)

Segregasjonspotensialet kan undersøkes ved å bruke en «frysecelle» med frose jord- og pukkmaterialer. I prosjektet ble det benyttet samme type frostcelle som ved Laval universitetet i Canada. Dette ble gjort for å kunne sammenligne resultatene med databasen som er bygd opp gjennom et stort antall forsøk i Canada. Hensikten med segregasjonspotensialet er å kunne gi et fornuftig estimat av telehiv for en konstruksjon til bruk ved dimensjonering. (Nixon, 1982; Konrad, 1994).



Figur 5 Teleforsøk apparat med prøve under klargjøring

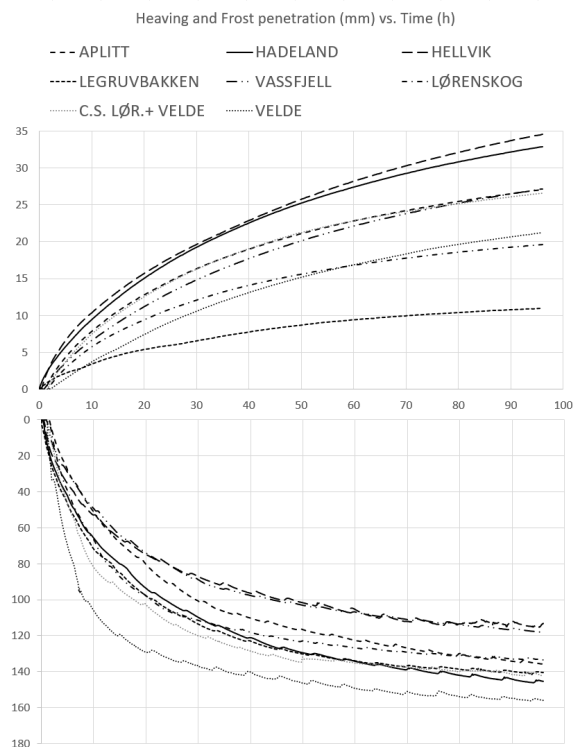
Segregasjonspotensialet (SP) har blitt undersøkt for en rekke typiske varianter av knust fjell.

Tabell 3 viser SP sammen med typiske verdier for telehiv

**Tabell 3** Klassifisering av resultat fra telehivforsøket

Frost susceptibility	SP, mm <sup>2</sup> /C°·d	Frost heave rate, mm/d	Frost heave ration $\Delta h/h_{\text{frozen}}$ (%)
Negligable	< 12	< 0.5	< 1
Low	12-35	0.5-2	1-4
Medium	35-75	2-4	4-8
High	75-200	4-8	8-20
Very high	> 200	>8	> 20

Telehivforsøk ble utført på fraksjon 0-4 mm, fra noen utvalgte norske pukkverk, se tabell 4.. Prøvene ble utsatt for et temperaturprofil fra topp til bunn på  $\approx +2/-4$  °C med mulighet til å trekke vann fra bunnen. Figur 6 viser frostnedtrengning og telehiv for de testede materialene. Mer detaljer i (Loranger, Doré et al. 2020).

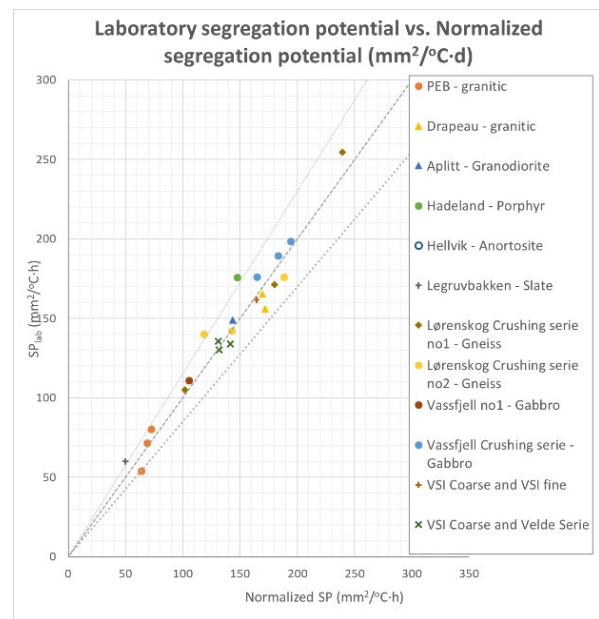


**Figur 6** Frostnedtrengning og telehiv i lab. forsøk

**Tabell 4** Segresjonspotensiale for utvalgte materialer

Quarry	rock type	<20 $\mu\text{m}$ %	SP °C·d
Aplitt	Granodiorite	7.4	149
Hadeland	Porphy	9.7	176
Hellvik	Anortosite	13.2	197
Legruvbakken	Slate	11.5	60
Vassfjell	Gabbro	14.8	111
Lørenskog	Gneiss	7.1	105
C.S. Lør.+ Velde	Gneiss/Granite	9.1	130
Velde	Gneiss/Granite	15.2	197

I tillegg til å teste SP direkte i telehivforsøket undersøkte vi om det var mulig å estimere SP ved hjelp av enklere rutinetester. Som vi ser fra figur 7, som viser data for et utvalg materialer, ser det ut som om denne metoden for å estimere SP fungerer relativt bra. (Loranger, 2020 – under publisering)



**Figur 7** Målt segresjonspotensial vs estimert segresjonspotensial

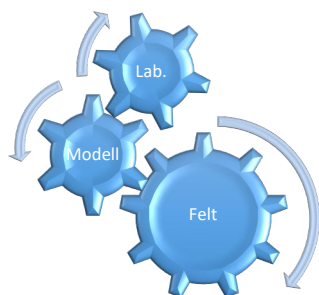
Det som trengs av målinger for denne metoden er  $d_{50}$  av finfraksjonen, vanninnhold(w), flytegrensen ( $w_L$ ), og spesifc overflateareal (Ss).

Alle disse parametrene kan finnes ved hjelp av vanlig og relativt enkelt labutstyr.



## Feltforsøk

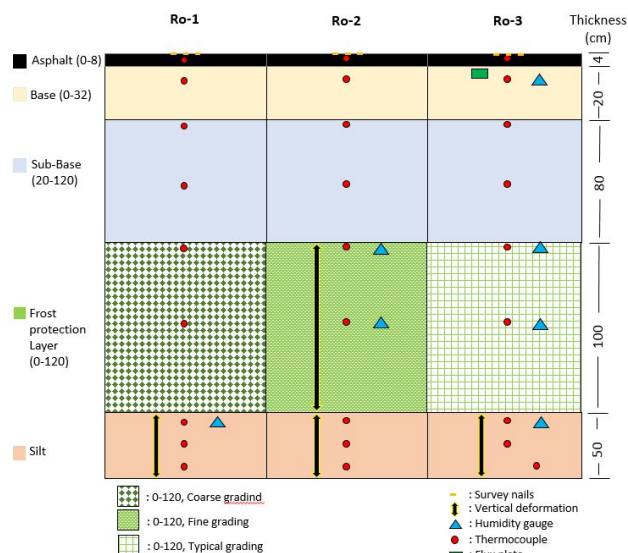
Feltforsøk er kostbare og det kan være utfordrende fordi det vil være flere usikre faktorer og variasjoner som kan påvirke resultatene. Likevel gir feltforsøk verdifulle resultater som kan brukes til å verifisere kunnskap fra andre kilder – som laboratorieforsøk og teoretiske modeller (se figur 8). Feltforsøkene gir direkte resultat som kan brukes frittstående men har størst betydning for å kunne kalibrere analysemodeller for å kunne gjøre resultatene generelt anvendbare.



Figur 8 Sammenheng mellom lab, modell og felt.

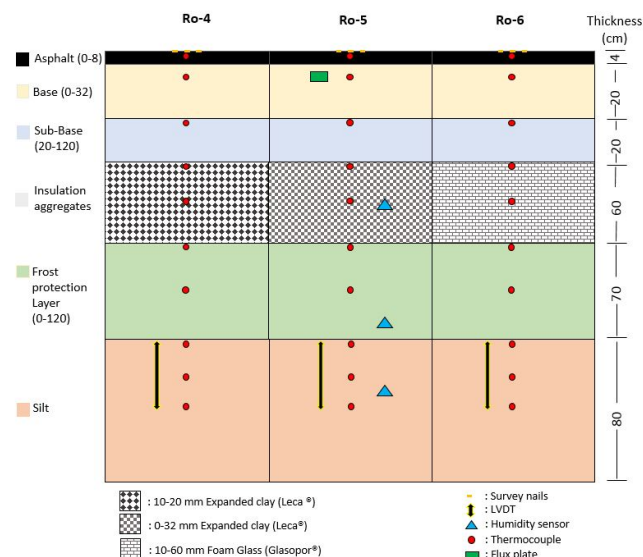
I løpet av september 2016 ble det bygget et forsøksfelt på Røros for å få data fra realistiske forhold. Ti ulike konstruksjoner ble bygget: Seks ulike oppbygginger for veg og fire for jernbane. Vegkonstruksjonene ble bygget med seks forskjellige frostsikringslag: tre med stein (figur 9), to med lettklinker og en med skumglass (figur 10). Jernbanekonstruksjonene ble bygget med samme ballast og frostsikringslag, men forskjellige materialer for forsterkningslag der vi hadde to varianter av steintype og to forskjellige graderinger (i praksis ble det mer forskjell i graderingene enn planlagt), Figur 11.

Tre forskjellige graderinger har blitt valgt til å vurdere effekten av ulike frostsikringslag innenfor krav i N200 når det ble bygd. A) grov gradering (40/120 mm), B) fin (0/32mm), og C) medium gradering (0/120mm). (Figur 9)

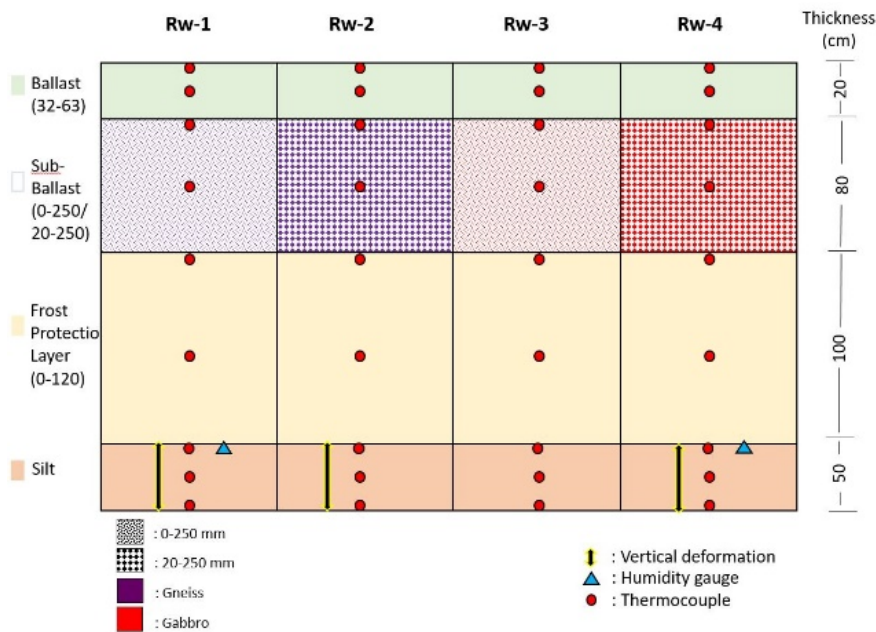


Figur 9 Stein som frostsikring Ro1 – Ro3

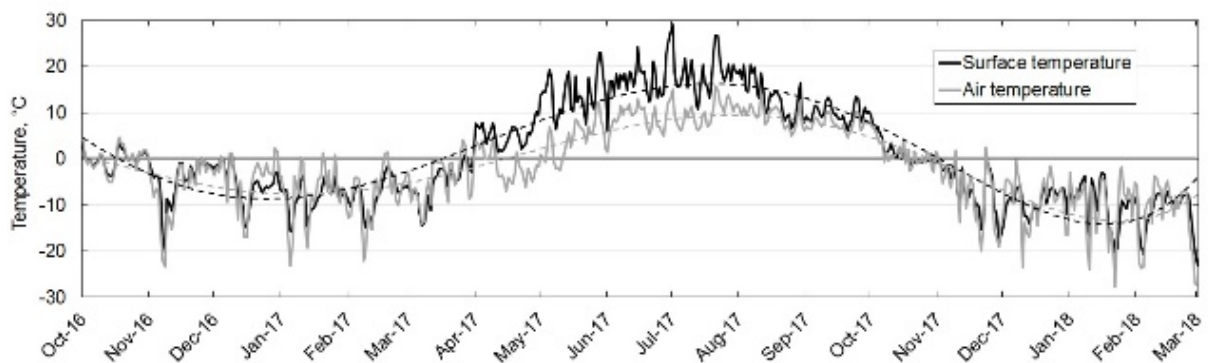
Det ble også etablert tre seksjoner med frostsikringsmaterialer, lettklinker og skumglass. Det ble brukt lettklinker fra Leca® og skumglass fra Glasopor®. Leca® materialet er en ekspandert leire; Glasopor® materialet er kubiske korn av skumglass. Vi brukte to forskjellige graderinger av ekspandert leire (10-20 og 0-32 mm) og en gradering av skumglass (10-60 mm). (Figur 10)



Figur 10 Isolerte konstruksjoner Ro4 – Ro6



Figur 11 Jernbane Rw 1 - Rw 4



Figur 12 Luft- og overflatetemperatur over to år

Alle konstruksjonene ble instrumentert for å måle temperatur, fuktinnhold, deformasjon og varmestrøm i hvert lag. I tillegg ble lufttemperatur og varmestråling målt. Figur 9 - 11 viser en oversikt over instrumentene som ble bygd inn. Til sammen er det plassert over 100 sensorer. Alle sensorene var koblet til dataloggere og en PC som sørget for lagring av data lokalt og i en skyløsning hvert 10. minutt.

2-3 temperatursensorer ble ødelagt under innbygging og deformasjonssensorene sluttet å virke etter den første vinteren. Til nå har det blitt registrert ca. 15 millioner enkeltmålinger.

## Resultater

Forsøksfeltet har til nå blitt fulgt gjennom tre vintre, men bare de to første har blitt grundig analysert.

Tabell 5 Frostmengde (i luft) for forsøksfeltet

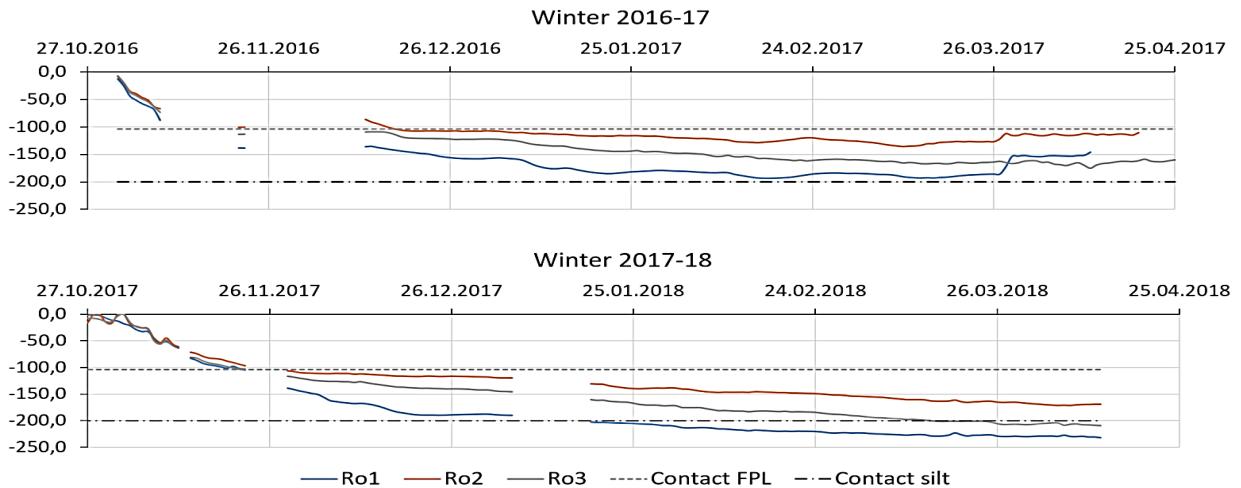
Vinter	Frostmengde (h°C)
2016 – 2017	22630
2017 – 2018	36683
2018 – 2019	(ikke analysert, men omtrent som første vinter)

Den kaldeste vinteren var vinteren 17/18 som tilsvarer ca. en 8-års vinter for Røros. For mer folkerike områder av Norge ville dette vært en spesielt kald vinter. Dimensjonerende frostmengde for en returperiode på 100 år for noen utvalgte steder er vist i Tabell 2.

**Tabell 6 Frostmengde for noen utvalgte byer**

By	F <sub>100</sub>
Oslo	21000
Bergen	4000
Trondheim	19000
Stavanger	4000
Tromsø	24000
Hamar	39000
Røros	61000

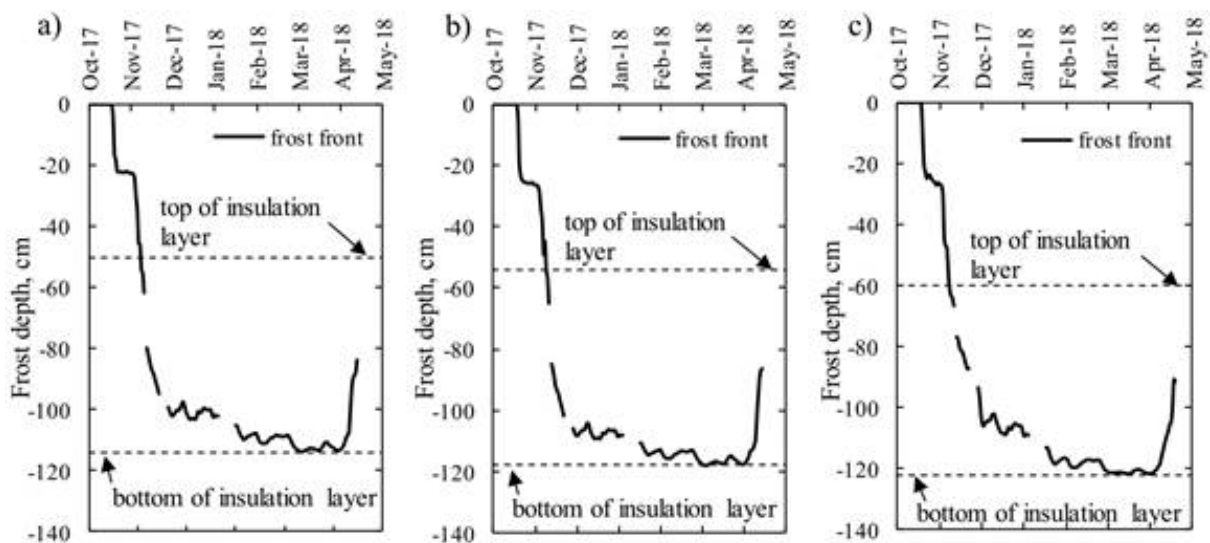
Figur 13 viser dybde for frysefronten gjennom vinteren for de ulike feltene med stein som frostsikring.

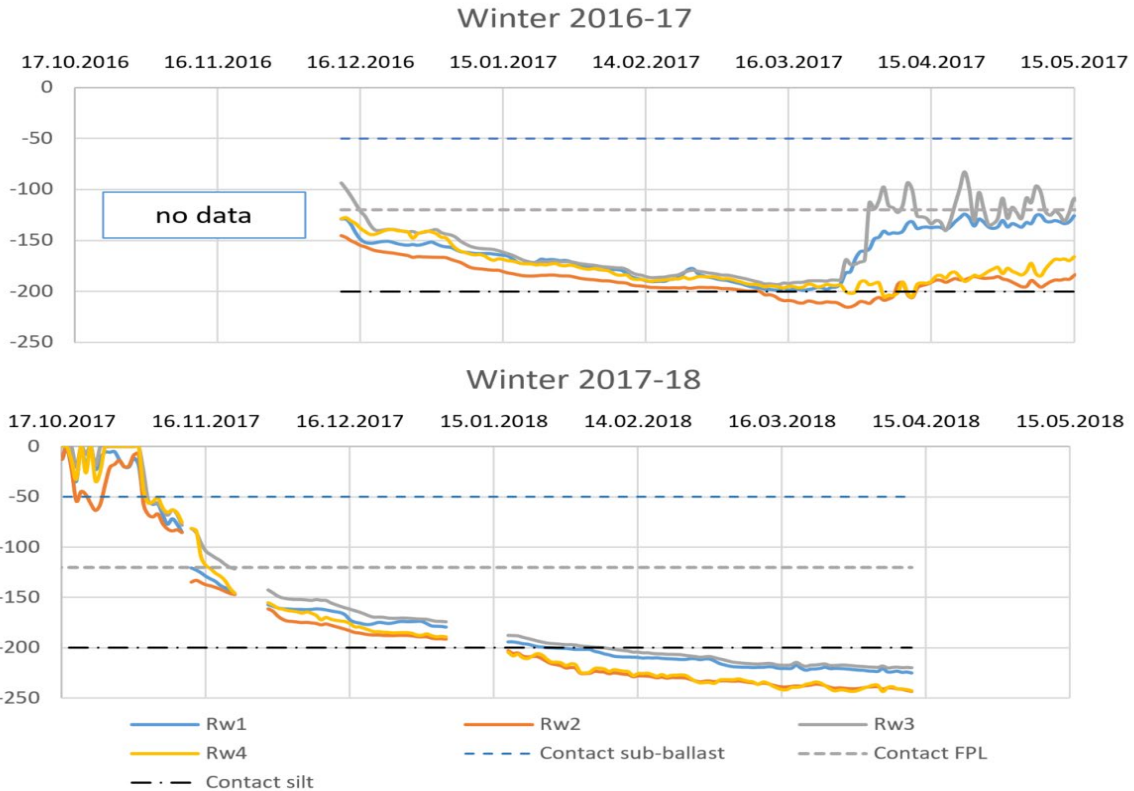


Det tok i gjennomsnitt 85, 443 and 253 h°C for frosten å trenge gjennom vegoverbygningen i henholdsvis felt 1, 2 og 3.

Det er en tydelig sammenheng mellom gradering og frostmotstand (Ro1, Ro2 og Ro3). For de grove, åpne materialene ser vi at frosten trenger vesentlig lettere gjennom.

Resultatene fra seksjonene med lettklinker og skumglass viser at isolasjonsevnen er praktisk talt lik for de de tre materialene (Figur 17). Alle frostisolasjonsmaterialene har hatt en god isolasjonseffekt. Frosten har ikke trent gjennom isolasjonen til de nedre frostsikringslaget i noen av vintrene. (Rieksts, Loranger et al. 2019)





**Figur 15 Temperaturutvikling i jernbanefeltene**

Resultatene fra jernbanekonstruksjonene var som forventet (figur 15). Materialet med mye kvarts og den mest åpne graderingen førte til raskest frostnedtrengning selv om forskjellene ikke er veldig store.

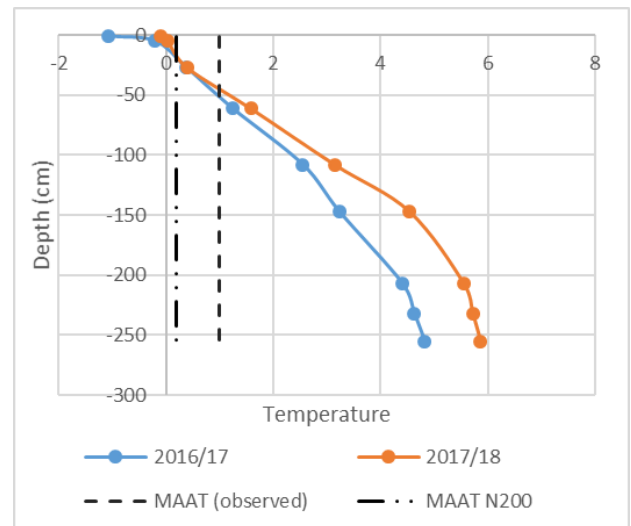
**Temperatur i grunnen før vinteren**

Temperaturen i forkant av vinteren er vesentlig for å dimensjonere frostsikringen på en god måte. Ved dimensjonering av frostsikring har det vært vanlig å ta utgangspunkt i årsmiddeltemperaturen. Målingene på Røros kan tyde på at dette kan være for konservativt og at temperaturen i konstruksjonen og et stykke ned i undergrunnen ved inngangen til frostperioden for dette området er betydelig høyere enn årsmiddeltemperaturen.

For begge de undersøkte vintrene var starten (dvs. når gjennomsnittlig døgnntemperatur er under 0) ca 1. november. For Røros er gjennomsnittlig årstemperatur gitt som 0,2 °C i

N200. Målt gjennomsnittlig lufttemperatur for begge årene var litt varmere (1°C)

Figur 16 viser målt temperaturprofil i starten av vinteren sammenlignet med målt snittemperatur og verdien fra N200.



**Figur 16 Temperaturprofil for Ro1 i begynnelsen av to vintre sammenlignet med snittemperaturen (MAAT)**

## Numeriske analyser

Numeriske analyser av frostnedtregning har blitt gjort i mange år og dagens dimensjoneringsregler er også basert på numeriske analyser. I dette prosjektet har vi:

- Utnyttet moderne beregningsverktøy med mindre behov for forenklinger.
- Inkludert effekt av konveksjon
- Studert effekten av variasjon i materialparametre
- Funnet gode metoder for å bestemme parametre
- Koblet sammen laboratoriemålinger av parametre med feltundersøkelser

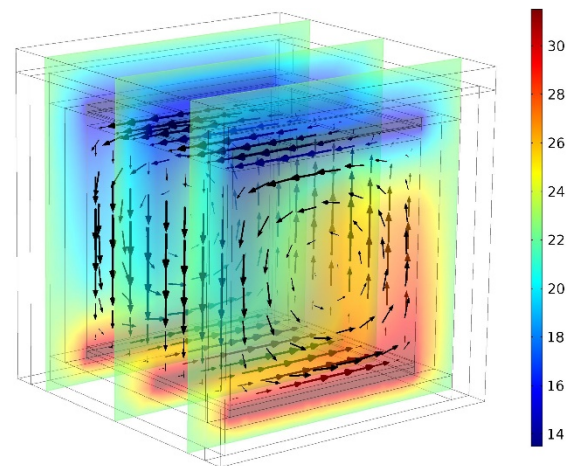
De numeriske analysene er basert på bruk av modelleringsverktøyet Comsol Multiphysics (COMSOL MP). COMSOL MP gir mulighet for å gjennomføre avanserte numeriske analyser som inkluderer faktorer og parametre som ikke er mulig med mer tradisjonelle metoder. Det gir mulighet for 2D eller 3D geometri, målte daglige temperaturvariasjoner, faseoverganger, variasjon i konduktivitet mellom frosset og ufrosset tilstand og ikke minst mulighet til å studere effekten av variasjon av de ulike parametrene. Det gir også mulighet for å inkludere strømning av vann i frostømfindtlige materialer og luftstrømning i materialer med mer åpen gradering.

En komplett termisk analyse av en vegkonstruksjon betinger kjennskap til de termiske parametrene. Disse parametrene kan være vanskelig å bestemme spesielt i en dimensjoneringsssituasjon der materialene som skal brukes ofte ikke er bestemt enda. Gjennom prosjektet har vi etablert metoder for å estimere disse parametrene, vurdere hvilken betydning de har samt vurdert typisk variasjonsområde. En kritisk informasjon som har stor betydning for flere parametre er vanninnhold.

## Konveksjon

Konveksjon kan modelleres indirekte ved å endre ledningsevnen nedover som en funksjon av temperaturgradient og porøsitet for de åpne materialene. Det er også mulig, men mer krevende, å lage en modell for luftstrømning i porøse medier ved hjelp av COMSOL MP. Som en del av dette prosjektet ble det utviklet en slik modell for å etterregne laboratorieforsøket og for å studere hvordan konveksjonen kan oppstå i felt.

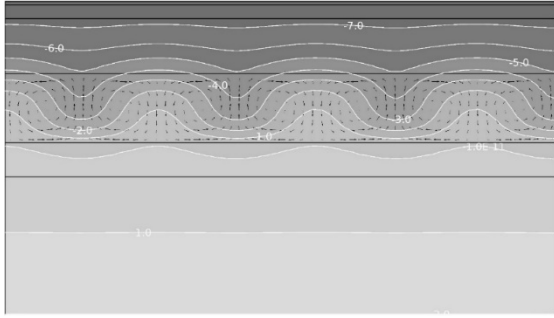
Det første steget for å modellere konveksjon var å bygge en numerisk modell av laboratorieforsøket. Dette gjorde det også mulig å studere feilkilder som horisontal varmestrøm gjennom veggene og dermed justere beregningen av for eksempel permeabilitet (Rieksts, Hoff et al. 2019)



**Figur 17** Modellert konveksjon i laboratorieforsøket

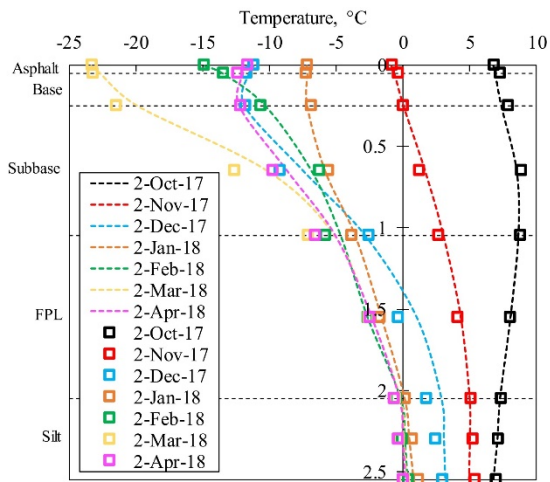
Neste steg var å modellere feltforsøket. Seksjoner Ro-1 og Ro-6 ble valgt fordi de hadde åpne materialer som hadde mulighet for konveksjon i deler av vinteren.

Figur 18 viser mulig fordeling av luftstrømmer i et åpent materiale. I virkeligheten vil naturlige variasjoner i materialene (eks porøsitet) styre luftstrømmene og det vil være praktisk umulig å forutsi om et område vil få en nedadgående eller oppadgående luftstrøm. Det innebærer også at feltmålinger av konveksjon i denne typen materialer vil ha en betydelig usikkerhet.



Figur 18 Konveksjon i åpent frostsikringslag

Etter modellering av seksjonene fra feltforsøket sammenlignet vi modell mot målinger. Dette betyr at vi måtte finne en løsning for stedvis variasjon når det er konveksjon (se figur 18). I felt ble temperaturen målt i en vertikal streng, derfor ble det regnet ut en gjennomsnittlig temperaturprofil også for de numeriske analysene. Som vi kan se fra figur 19 viser det en forholdsvis god sammenheng mellom feltmålinger og modell med de forenklingene som nevnt over.



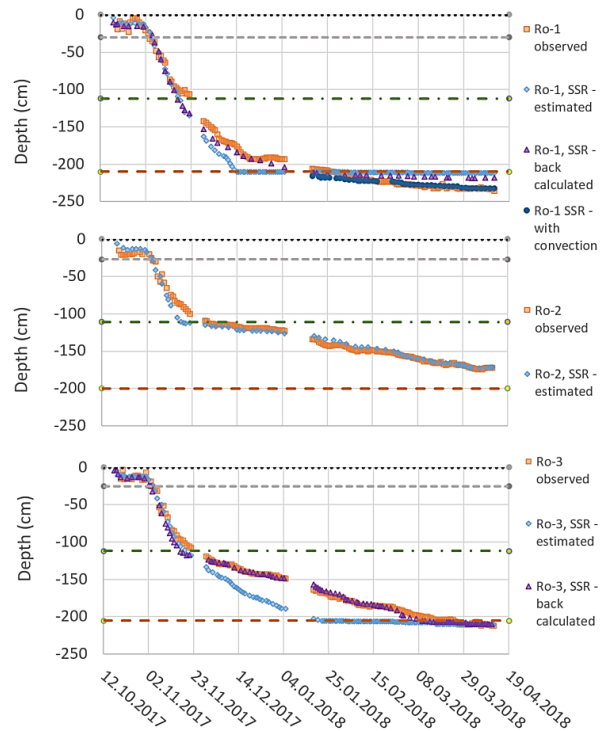
Figur 19 Sammenligning av feltmålinger og numerisk resultater for seksjon Ro-1

## SSR modell

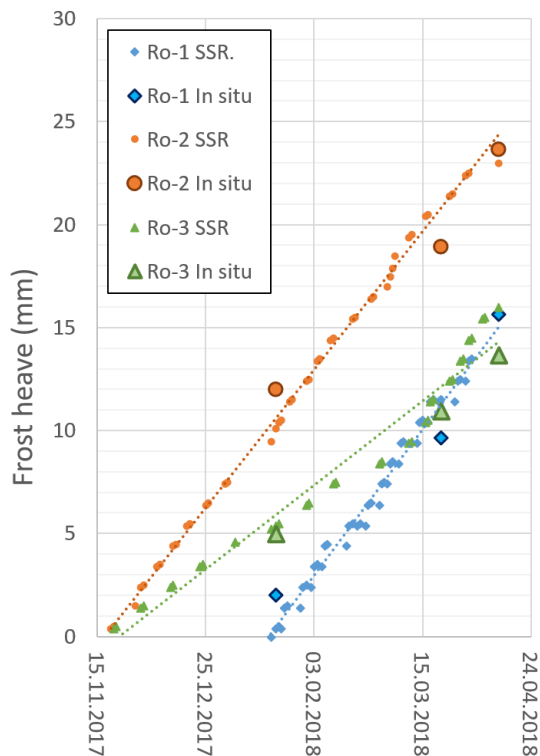
SSR modellen som er implementert i I3C-ME freeware ble brukt for å analysere feltforsøkene.

SSR modellen anvender en ligning for likevekt i varmestrøm for å beregne frostnedtrengning og telehiv i tidsinkrementer. Modellen er i bruk av vegadministrasjon i Quebec med godt resultat for relativt tynne konstruksjoner.

Røros feltforsøk vinteren 2017-18 (den kaldeste til nå) ble beregnet. Figur 20 og 21 viser resultat for SSR modell integrert i I3C-ME for veg-seksjon 1, 2 og 3.



Figur 20 Beregninger med SSR-modellen fra estimerte parametre, tilbakeregnete verdier og justert for konvekson (Ro-1)



**Figur 21 Målt telehiv sammenlignet med beregninger med SSR-modellen (vinter 17-18)**

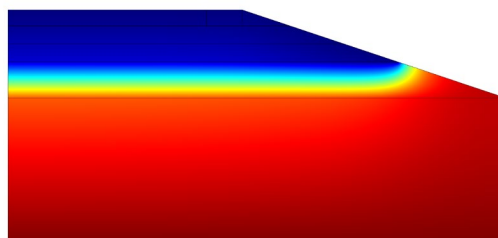
Fra feltforsøkene kan vi tilbakeregne forskjellige parametre som gir et godt grunnlag for å bruke SSR-modellen som verktøy i en analytisk dimensjoneringsystem. Programmet er beskrevet og tilgjengelig på web-siden<sup>1</sup>.

## Praktisk dimensjonering

For praktisk dimensjonering er det viktig å ha verktøy som er relativt enkle, men samtidig avanserte nok til å gi pålitelige beregninger. Mer avanserte verktøy har stor nytte dersom det er tilgang på et pålitelig datagrunnlag som gir sikre inngangsparametre. Det er også meget nyttig for å studere effekten av variasjon i egenskaper og rammebetingelser for å vurdere hva det er viktig å kartlegge for å kunne gjennomføre en god dimensjonering.

I tillegg er det oftere behov for mer avanserte analyser i forbindelse med avvik mellom plan og virkelighet der det er behov for å forutsi konsekvenser. Noen ganger er det spesielle forutsetninger som gjør det nødvendig å analysere mer nøyaktig.

For ny E6 gjennom Ringsaker var det et poeng å unngå for stor gravedybde for den nye vegen. Gjennom en analyse ble det vist at det var mulig å bygge en vesentlig tynnere konstruksjon ved hjelp av Leca eller skumglass med bedre sikkerhet for gjennomfrysing enn en konvensjonell løsning.



**Figur 22 Temperaturfordeling for alternativ E6 i Ringsaker**

<sup>1</sup> [https://i3c.gci.ulaval.ca/i3c-me/information et telechargement information and download/](https://i3c.gci.ulaval.ca/i3c-me/information-et-telechargement-informations-et-downloads/)



## Konklusjoner og anbefalinger for videre arbeid og implementering

---

Prosjektet har gitt ny kunnskap som vil være en nyttig basis for bygging og vedlikehold av veger og jernbane i Norge. Imidlertid er det nødvendig å ta kunnskapen fra prosjektet i bruk for at verdien av forskningen skal komme samfunnet til nytte.

I dette kapitlet har vi oppsummert de viktigste konklusjonene samt anbefalt hvordan vi kan gå videre for å implementere dem i verktøy og retningslinjer for praktisk dimensjonering.

### Utvikle verktøy for analyse av frostnedtrengning

Prosjektet har vist at eksisterende analyseverktøy kan benyttes for å kunne modellere frostnedtrengning, telehiv og effekt av frostisolering. Nyttien av å bruke mer avansert verktøy for praktisk dimensjonering avhenger imidlertid av at vi har godt nok datagrunnlag i form av opplysninger om grunnforhold og frostbelastning til at vi kan utnytte mulighetene som ligger i de avanserte verktøyene.

Etter vår vurdering bør det legges opp til en dimensjonering av frostsikring ut fra to tilnærminger:

- Avanserte numeriske analyser av frostnedtrengning, telehiv og nødvendig frostbeskyttelse der det er et godt grunnlag i form av gode data om grunnforhold, temperaturforhold og materialeegenskaper
- Enklere verktøy med bruk av standardverdier og metrologiske indeksverdier som frostmengde og høsttemperatur i grunnen som er forskjellig fra årsmiddeltemperatur der det ikke er mer detaljerte opplysninger. Overslagberegningene må ta sikte på å unngå skadelig store telehiv og det bør legges inn en viss sikkerhetsmargin for å ta høyde for variasjoner i materialeegenskaper, lokale temperaturvariasjoner og nøyaktighet under utførelse.

Flere eksisterende analyseverktøy kan brukes for å beregne frostmengden for begge nivå og selv om det kan være praktisk å lage et eget norsk prosedyre, bør det være åpent for alternative verktøy så lenge prosedyren er beskrevet og verifiserbar.

### Endre dimensjonering til å tillate gitt telehiv avhengig av vegtype og trafikk

Dagens dimensjoneringsystem er bygd opp på at vi skal hindre frosten å trenge ned til telefarlige materialer som vi deler i T2, T3 og T4 etter graden av telefarlighet. Samtidig er det klart at vi også for nybygde veier med lav trafikk eller i spesielt kalde områder ikke følger dette prinsippet fullt ut. Et system der vi karakteriserer materialene ved hjelp av Segregasjonsspotensialet og dermed gjør oss i stand til å estimere faktisk telehiv som vi så kan måle opp mot krav vil være et betydelig framskritt. Vi har studert noen vanlige norske materialer i dette prosjektet, men her gjenstår det noe arbeid før vi har et kvalitetssikret verktøy på plass.

### Vurdere å begrense bruken av åpne graderinger

Åpne materialer har en betydelig lavere motstand mot frostgjennomtrengning enn mer velgraderte materialer. Både lavere vanninnhold og faren for konveksjon gir en forklaring på denne observasjonen.

Ved å bruke mer velgraderte materialer i forsterknings- og frostsikringslagene vil vi kunne oppnå vesentlig bedre frostmotstand (ev. tynnere lag) for materialene med steinmaterialer.

En omlegging vil i en overgangsfase være krevende for entreprenørene som må legge om måten de behandler materialene for å hindre separasjon av fine og grove partikler. Imidlertid burde det være mulig å skaffe erfaring fra Sverige der denne typen gradering er mer vanlig.

Det bør gjøres en levetidsanalyse (LCC) for å vurdere de økonomiske sidene.

## Bedre utnyttelse av isolasjonsmaterialer

Basert på forskningsprosjektet mener vi det er grunnlag for å revidere retningslinjene for bruk av isolasjonsmaterialer i vegkonstruksjoner.

Analysene viser at bruk av frostisolasjon er vesentlig mer effektivt enn det dagens dimensjoneringsregler legger til grunn. En overgang til analytisk dimensjonering vil åpne for bedre utnyttelse, men det er en fordel med harmonisering av reglene slik at beregningene ikke framstår å være i konflikt med dagens regler.

En gunstig mulighet til å utnytte isolasjonsmaterialene bedre er å fjerne det nedre frostsikringslaget. Dette vil redusere gravedybden samtidig som det oppnås fullverdig isolasjon mot frostnedtregning. Forutsetningen er da at det er tilstrekkelig med jordvarme til stede slik at man ikke er avhengig av frysevarme for å unngå gjennomfrysing ned til telefarlig undergrunn. Feltnålingene og analysene tyder på at det er mer jordvarme til stede enn tidligere antatt.

## Referanser

---

Côté, J. and J.-M. Konrad (2005). "A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials." Canadian Journal of Geotechnics **42**: 443-458.

Frost action in soils (Frost i Jord) (1976). Sikring mot teleskader [prevention of frost damages] (In Norwegian).

Fukuda, M. and S. Kinosita (1985). "Field Frost Heave Prediction Related to Ice Segregation Processes During Soil Freezing." Annals of Glaciology **6**: 87-91.

Konrad, J. M. and N. R. Morgenstern (1981). "The segregation potential of a freezing soil." Canadian Geotechnical Journal(19): 494-505.

Kuznetsova, E., I. Hoff and S. W. Danielsen (2016). "FROST – Frost Protection of Roads and Railways." Mineralproduksjon **7**: B1-B8.

Loranger, B. (2020). Laboratory investigation of frost susceptibility of crushed rock aggregates and field assessment of frost heave and frost depth PhD, Norwegian University of Science and Technology (NTNU).

Loranger, B., G. Doré, I. Hoff and E. Scibilia (2020 ). "Assessing soil index parameters to determine the frost susceptibility of crushed rock aggregates " Cold Regions Science and Technology **Submitted**.

Nixon, J. F. (1982). "Field frost heave predictions using the segregation potential concept." Canadian Geotechnical Journal **19**(4): 526-529.

Rieke, R. D. (1983). The role of specific surface area and related index properties in the frost susceptibility of soils, Oregon State University.

Rieksts, K. (2018). Heat transfer characteristics of crushed rock and lightweight aggregate materials. PhD, Norwegian University of Science and Technology.

Rieksts, K., I. Hoff, E. Scibilia and J. Côté (2019). "Laboratory investigations into convective heat transfer in road construction materials." Canadian Geotechnical Journal: 1-15.

Rieksts, K., I. Hoff, E. Scibilia and J. Côté (2019). "Modelling the Nu-Ra relationship to establish the

intrinsic permeability of coarse open-graded materials from natural air convection tests in a 1 m<sup>3</sup> cell." International Journal of Heat and Mass Transfer **135**: 925-934.

Rieksts, K., B. Loranger, I. Hoff and E. Scibilia (2019). In Situ Thermal Performance of Lightweight Aggregates Expanded Clay and Foam Glass in Road Structures. Cold Regions Engineering **2019**: 440-446.

## Appendix

---

- Oversikt over publikasjoner
- Liste over oppfølgingsprosjekt

## Appendix 1 Liste over publikasjoner

---

### Tidsskrift, konferanser og rapporter<sup>2</sup>

Hoff, Inge; Watn, Arnstein. *Design of roads using frost insulation materials – case study new E6 in Hedmark, Norway*. Trondheim: Norges teknisk naturvitenskapelig universitet, NTNU 2019 14 s.

Loranger, Benoit; Hoff, Inge; Scibilia, Elena; Doré, Guy. *Frost Heave Laboratory Investigation on Crushed Rock Aggregates*. Cold Regions Engineering 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE) 2019 s. 83-91

Loranger, Benoit; Rieksts, Karlis; Hoff, Inge; Scibilia, Elena. *Frost Depth and Frost Protection Capacity of Crushed Rock Aggregates Based on Particle Size Distribution*. I: Cold Regions Engineering 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE) 2019 s. 169-176

Rieksts, Karlis; Hoff, Inge; Scibilia, Elena; Côté, Jean. *Laboratory investigations into convective heat transfer in road construction materials*. Canadian geotechnical journal (Print) 2019

Rieksts, Karlis; Hoff, Inge; Scibilia, Elena; Côté, Jean. *Modelling the Nu-Ra relationship to establish the intrinsic permeability of coarse open-graded materials from natural air convection tests in a 1 m<sup>3</sup> cell*. International Journal of Heat and Mass Transfer 2019 ;Volum 135. s. 925-934

Rieksts, Karlis; Loranger, Benoit; Hoff, Inge; Scibilia, Elena. *In Situ Thermal Performance of Lightweight Aggregates Expanded Clay and Foam Glass in Road Structures*. I: Cold Regions Engineering 2019. American Society of Civil

Engineers (ASCE) 2019 ISBN 9780784482599. s. 440-446

Grimstad, Gustav; Ghoreishian Amiri, Seyed Ali; Watn, Arnstein; Hoff, Inge. *Frost protection in roads using insulation materials*. AIC 2018 – Transportation Engineering Infrastructure in Cold Regions; 2018-05-01 - 2018-05-03

Rieksts, Karlis; Hoff, Inge; Scibilia, Elena; Côté, Jean. *Heat transfer mechanisms of crushed rock materials*. 5th European Conference on Permafrost; 2018-06-23 - 2018-07-01

Scibilia, Elena; Rieksts, Karlis; Loranger, Benoit; Hoff, Inge; Doré, Guy; Côté, Jean; Aksnes, Jostein. *Frost protection of roads and railways*. 5th European Conference on Permafrost; 2018-06-23 - 2018-07-01

Loranger, Benoit; Kuznetsova, Elena; Hoff, Inge; Aksnes, Jostein; Skoglund, Kjell Arne. *Evaluation of Norwegian gradation based regulation for frost susceptibility of crushed rock aggregates in roads and railways*. I: Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfield. CRC Press 2017 ISBN 9781138295957. s. 2077-2085

Loranger, Benoit; Kuznetsova, Elena; Rieksts, Karlis; Hoff, Inge. *Open graded crushed rock material and light weight aggregates thermal responses investigation at Røros experimental test site, Central Norway*. Arctic Change 2017; 2017-12-11 - 2017-12-15

Rieksts, Karlis; Hoff, Inge; Kuznetsova, Elena; Côté, Jean. *Laboratory investigations of thermal properties of crushed rock materials*. I: Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfield. CRC Press 2017 ISBN 9781138295957. s. 143-149

Rieksts, Karlis; Hoff, Inge; Kuznetsova, Elena; Côté, Jean. *Laboratory investigations on heat transfer of coarse unbound mineral materials*

---

<sup>2</sup> Elena forandret navn fra Kuznetsova til Scibilia i løpet av prosjektet

*used in road construction.* 29th International Baltic Road Conference; 2017-08-27 - 2017-08-29

Rieksts, Karlis; Hoff, Inge; Kuznetsova, Elena; Côté, Jean. *Laboratory investigations on heat transfer of coarse crushed rock materials.* GeoOttawa 2017; 2017-10-01 - 2017-10-04

Rieksts, Karlis; Kuznetsova, Elena; Hoff, Inge; Danielsen, Svein Willy; Wigum, Børge Johannes; Fladvad, Marit; Loranger, Benoit; Barbieri, Diego Maria.

*Combined research effort on aggregate road materials.* European Geosciences Union General Assembly 2017; 2017-04-23 - 2017-04-28

Kuznetsova, Elena; Hoff, Inge; Danielsen, Svein Willy. *FROST – Frost Protection of Roads and Railways.* Mineralproduksjon 2016 ;Volum 7. s. B1-B8

Kuznetsova, Elena; Skoglund, Kjell Arne; Aksnes, Jostein; Rieksts, Karlis; Hoff, Inge.

*Evaluation of the Norwegian gradation based regulations for frost susceptibility of aggregates in roads and railways.* ICOP2016; 2016-06-20 - 2016-06-24

Rieksts, Karlis; Hoff, Inge; Kuznetsova, Elena; Côté, Jean. *Laboratory investigations of thermal properties of crushed rock materials.* International Conference on Permafrost 2016; 2016-06-20 - 2016-06-24

Kuznetsova, Elena. *Effect of climate change and resource scarcity on road and railways infrastructure: Norwegian case study.* Arctic Science Summit Week ASSW2017; 2017-03-31 - 2017-04-07

Kuznetsova, Elena. *Thermal conductivity and the unfrozen water contents of volcanic ash deposits in cold climate conditions: A review.* Clays and clay minerals 2017 ;Volum 65.(3) s. 168-183

Kuznetsova, Elena. *Importance of the multidisciplinary approach in volcanic areas.*

International Conference on Permafrost ICOP2016; 2016-06-20 - 2016-06-24

Rieksts, Karlis. *Heat transfer characteristics of crushed rock and lightweight aggregate materials.* Trondheim: Norwegian University of Science and Technology 2018 (ISBN 978-82-326-3246-6) ;Volum 2018.207 s. Doktoravhandling ved NTNU

Rieksts, Karlis. *Heat Transfer Mechanisms of Crushed Rock Aggregates.* Mineralproduksjon 2018

## Medieoppslag, foredrag og populærvitenskap

Hoff, Inge; Watn, Arnstein; Homleid, Ådne.  
*Anbefaler å endre retningslinjene for veibygging.*  
Byggeindustrien [Fagblad] 2019-06-20

Hoff, Inge. *Frost protection of roads and railways.*  
WS on Sustainable cold climate engineering;  
2018-08-14 - 2018-08-14

Hoff, Inge. *Diskusjon om frostsikring av ny E6 i Hedemark.* NRK1 [TV] 2017-03-06

Hoff, Inge. *Diskusjon om frostsikring av ny E6 i Hedemark.* NRK2 Nyhetsmorgen [Radio] 2017-03-06

Kuznetsova, Elena; Hoff, Inge. *FROST-prosjekt: Nye harde og kalde fakta.* Våre veger 2017 (2) s. 62-66

Kuznetsova, Elena; Hoff, Inge; Smedås, Inge Morten. *Frostforskere håper på sprengkulde.* Arbeidets Rett [Avis] 2017-09-22

Hoff, Inge; Kuznetsova, Elena.  
*Historisk satsning på steinforskning.* Våre veger 2016 (2) s. 80-82

Kuznetsova, Elena; Hoff, Inge.  
*Her leter NTNU etter teleløsning.* Arbeidets rett [Avis] 2016-09-10

Kuznetsova, Elena. *Frost protection of roads and railways: laboratory research.* NADim seminar 2017; 2017-12-30

Kuznetsova, Elena. *Steinforskning på NTNU - Er det behov for å endre noen krav og beskrivelser?* Stein i veg 2017; 2017-03-01 - 2017-03-03

Kuznetsova, Elena.  
Frost protection of roads and Railways, overview. FROST workshop; 2016-01-15  
NTNU

Kuznetsova, Elena. *Steinforskning på NTNU.* Stein i vei; 2016-03-03 - 2016-03-04

Rieksts, Karlis. *Convection and radiation in road construction materials.* Frostsikring av løsmasser; 2018-02-07 - 2018-02-08

Rieksts, Karlis. *Natural air convection in road construction materials.* Nordiskt vägforum - yearly meeting; 2018-05-27 - 2018-05-29

Loranger, Benoit. *Fine particles shape and frost heave: hypothesis on possible effects.* Workshop for "MiKS"-project Characterisation, properties and utilisation of aggregate fines; 2017-12-22 - 2017-12-23

Loranger, Benoit. *Frost protection of roads and railways: field investigations at Røros.* NADim seminar 2017; 2017-11-30

Loranger, Benoit. *New data from the field observations in road and railway construction – Røros.* FROSTdagen; 2017-12-04  
NTNU

## Appendix 2 Nye prosjekter

---

### Nye prosjekter som har kommet i tilknytning

**Frozen Canoes** er et samarbeidsprosjekt innen internasjonalisering av utdanning. Prosjektet er ledet fra UNIS, med NTNU og to Canadiske universitet som deltagere. Finansiert fra Norges forskningsråd. Det viktigste arbeidet i prosjektet er utvikling og gjennomføring av internasjonale kurs på master/PhD-nivå.

**RuNoCore** er et samarbeidsprosjekt innen internasjonalisering av utdanning. Prosjektet er ledet av NTNU med Moscow state university (MSU) som partner. Den viktigst aktiviteten har vært studentutveksling fra Norge til Russland og motsatt vei.

**DynKap** er et prosjekt med flere aktører fra norsk kraftbransje. Det er ledet av REN med SINTEF Energi som administrator. Hoveddelen av arbeidet består i å utvikle en modell for temperaturforholdene rundt nedgravde strømkabler med varierende belastning.

**0-4 mm prosjektet** er et prosjekt for å se på frosttekniske og mekaniske egenskaper for 0/4 mm fraksjonen som det finnes et overskudd av i norske pukkverk. Prosjektet er finansiert av norske byggherrer og norsk bergindustri.

**Oppfølging av instrumentering av E6** sør for Trondheim. Statens vegvesen har i samarbeid med NTNU instrumentert flere seksjoner med ulik frostsikring. Innhenting av data og modellering blir fulgt opp.

**Instrumentering av Djupvik jernbanetunnel** ved Narvik. Flere tverrsnitt i tunnelen med temperatursensorer både i luft og i ballast/forsterkningslag er installert for å vurdere behovet for frostsikring innover i tunnelen.