



Statens vegvesen

Frost i Jord 2007

Frost in Ground 2007

PUBLIKASJON

Teknologiavdelingen

nr. 109



Frost i Jord 2007

Frost in Ground 2007

Redaktør/Editor: Øystein Myhre



Trykk: Grøset
Opplag: 800
Forsidebilde: Longyearbyen, 2007 (Foto: Roald Aabøe)

Innhold

Contents

Ivar Horvli	Forord	4
	<i>Preface</i>	5
Børresen, Marion H. Rike, Anne Gunn	Fryse-tine sykluser og deres innvirkning på biologisk nedbrytning av olje i jord ved lav temperatur	7
	<i>Freeze-thaw cycles and their effect on biological degradation of oil in soil at low temperatures</i>	7
Kitterød, Nils-Otto	Fokusert infiltrasjon i frossen grunn øker faren for transport av forurensning til grunnvannet	15
	<i>Focused flow in frozen ground increases contamination risk of ground water resources</i>	15
Kvernø, Sigrun H.	Freezing and thawing effects on aggregate stability	25
	<i>Effekter av frysing og tining på aggregatstabilitet</i>	25
French, Helen Wike, Kjersti Flesjø, Kristine Riise, Gunnhild	Frost og effekter på vanntransport og saltspredning fra veg, modellering og feltstudier på Gardermoen	31
	<i>Frost and influence on water transport and the spreading of salt from roads, modelling and field studies at Gardermoen</i>	31
Nerland, Ørjan	Pelebelastningsforsøk i salt permafrost, Longyearbyen	41
	<i>Pile load test in saline permafrost, Longyearbyen</i>	41
Kääb, Andreas	Remote sensing of permafrost hazards in mountains	51
	<i>Fjernmåling av faremomenter ved permafrost i høyfjellsområder</i>	51
Côté, Jean Konrad, Jean-Marie	Protection against differential icing on insulated pavements: Applying the Quebec approach to Scandinavia	59
	<i>Beskyttelse mot økt ising på isolerte vegoverbygninger: Anvendelse av Quebec-metoden for skandinaviske forhold</i>	59
Øiseth, Even Aabøe, Roald Hoff, Inge	Feltforsøk med sammenligning av frostsikringsmaterialer anvendt i vegbygging	65
	<i>Field studies of frost protection materials used in road constructions</i>	65
Haugødegård, Torleif	Telehivmålinger med laserutstyr	71
	<i>Measuring frost heave using laser device</i>	71
Horvli, Ivar Aursand, Per Otto	Frosttekniske egenskaper til knust betong i vegbygging	77
	<i>Frost susceptibility and durability of demolished concrete under frost action</i>	77
Uthus, Lillian Uthus, Nils Sigurd	Telefarlighet eller vannfølsomhet – hva er viktig?	85
	<i>Frost susceptibility or water sensitivity – what is important?</i>	85
Berggren, Anne-Lise	Introduksjon til kunstig grunnfrysing og Berggrens krypmodell	95
	<i>Introduction to artificial ground freezing and the Berggren creep model</i>	95
Hygen, Hans Olav Lisø, Kim Robert	Nye klimaindekser for bygningsfysisk prosjektering	105
	<i>New climate indices for building envelope design</i>	105
Eide, Harald	Norske standarder for varme- og frostisolering	111
	<i>Norwegian standards for heat and frost insulation</i>	111
Horvli, Ivar	Norges forskningsråds nordområdestrategi	117
	<i>Research strategy for the northern areas</i>	117
Myhre, Øystein	Konferanseoversikt og nettsted	119
	<i>Conferences, meeting calendars and websites</i>	119
Vedlegg 1: <i>Appendix 1:</i>	Oversikt "Frost i Jord"-komitéens medlemmer, mandat, arbeidsområde	121
	<i>Overview Frost in Ground committee members, mandate, topics, products</i>	121
Vedlegg 2: <i>Appendix 2:</i>	Oversikt – publikasjoner "Frost i Jord"	122
	<i>Publications from Frost in Ground</i>	122
Vedlegg 3: <i>Appendix 3:</i>	Oversikt – publikasjoner fra Vegdirektoratet, Teknologivdelingen	125
	<i>Overview Publications from the Technology Division</i>	125

Forord

Fagkomitéen Frost i Jord, tilknyttet Norsk Geoteknisk Forening, har ved utgangen av 2006 vært i virksomhet halvannet års tid. Årlig utgivelse av publikasjonen *Frost i Jord* er et hovedmål for komitéen. Det har vært upåklagelig stofftilgang. En stor del av publikasjonen er viet til artikler med bakgrunn i tema som ble belyst under *5th International Conference on Contaminants in Freezing Ground* i Oslo våren 2006 (forurensingsproblematikk i kalde strøk). En annen del av publikasjonen omhandler permafrost, delvis som en videreføring av en av artiklene i publikasjonen fra 2005.

Frosttekniske egenskaper for noen materialer til vegbygging er et annet hovedemne i årets publikasjon. En feltstudie om frostsikring er også inkludert. Det er også en artikkel om nye klimadata for bruk i frosttekniske beregninger, og en oversikt over nye beregningsstandarder innenfor dette fagområdet.

Oppdatering av sentralt fagstoff, spesielt av boka "Sikring mot teleskader" (Frost i Jord-publikasjon nr. 17, 1976), er et langsiktig hovedmål for komitéen. Utredning av aktuelle endringer i forbindelse med dette er så vidt starta opp. Et annet mål er å initiere et større forskningsprosjekt innen infrastruktur i nordlige områder.

Komitéen Frost i Jord vil med dette takke alle som har bidratt med artikler og annet stoff til årets publikasjon. Vi håper at stoffet fanger interessen hos en større leserkrets, og at vi med dette har bidratt til å skaffe mer oversikt over aktiviteter og resultater innenfor frostreletert forskning. En spesiell takk rettes til Statens vegvesen for støtte som har gjort denne utgivelsen mulig.

Ivar Horvli

Trondheim, 20. november 2007

Preface

The Frost in Ground Committee, affiliated to the Norwegian Geotechnical Society, was established in 2005. The annual issue of the publication *Frost in Ground* is one of the main goals. Many authors have submitted contributions. Articles related to presentations at the *5th International Conference on Contaminants in Freezing Ground* in Oslo, spring 2006, account for a substantial part of the publication. Another topic is permafrost, covered by two articles. One of those goes into further details on a project which was outlined in the 2005 issue.

Frost susceptibility of several materials in road construction is another main topic this year including a field study of various materials for frost protection of roads. One article is dealing with new climate data for use in frost calculations. An overview of new European standards for calculation of heat and frost insulation is also given.

Future work for the committee will include the start-up of a major upgrading of the textbook "Sikring mot teleskader" (Frost Protection, published by the previous Frost in Ground Committee in 1976, publication no. 17). Another important task will be to initiate a major research project on infrastructure in cold climate areas.

The Frost in Ground Committee acknowledges all who have contributed to this year's issue of the publication. We hope and believe that the various articles will catch on with a lot of readers. We also hope this publication will contribute substantially to a better overview of current research and developments within these topics. In particular we would like to acknowledge the Norwegian Public Roads Administration for sponsoring this publication.

Ivar Horvli

Trondheim, November 20, 2007

Fryse-tine sykluser og deres innvirkning på biologisk nedbrytning av olje i jord ved lav temperatur

Freeze-thaw cycles and their effect on biological degradation of oil in soil at low temperatures

Marion H. Børresen, Norges Geotekniske Institutt (marion.borresen@ngi.no)

Anne Gunn Rike, Norges Geotekniske Institutt (anne.gunn.rike@ngi.no)

Summary

For optimizing in situ biodegradation of hydrocarbon contaminated sites in the Arctic, it is important to identify factors influencing efficient bioremediation at low temperatures. In this work Arctic soil samples were experimentally subjected to stable temperature regimes at +5°C and -5°C, and to freeze-thaw cycles between +5°C and -5°C to investigate how the microorganisms' ability to mineralize oil contamination are affected by temperature fluctuations. The mineralization was monitored in oil contaminated soil microcosms spiked with radiolabelled hexadecane. Both fertilized and non-fertilized soils were used. Mineralization of the radiolabelled compound was demonstrated in all treatments.

In soil kept stable at -5°C the hydrocarbon mineralization was low, but detectable, both in fertilized and non-fertilized soil. Maximum mineralization rates were measured in fertilized soil samples kept stable at +5°C where the mineralization rates of hexadecane in the exponential mineralization period reached 48 mg/kg/day. The freeze-thaw cycles seemed to stimulate mineralization of hexadecane compared to hexadecane mineralization in soil microcosms kept stable at +5°C. The freeze-thaw cycles did not seem to affect the microbial populations in the soil in a negative way, and the total number of cultivable heterotrophs increased during the experimental period. The results demonstrate that mineralization of hexadecane is occurring in soils underlain seasonal temperature fluctuations, both above and below freezing temperatures.

Sammendrag

For å optimalisere in situ biologisk nedbrytning av hydrokarbonforurenset jord i arktiske strøk, er det viktig å identifisere faktorer som er viktige for bioremediering ved lav temperatur. For å undersøke til

hvilken grad temperaturfluktuasjoner over og under frysepunktet påvirker mikroorganismenes evne til å bryte ned oljeforurensninger i jord, ble det utført laboratorieforsøk hvor arktiske jordprøver ble utsatt for tre forskjellige temperaturregimer: stabil temperatur på +5 °C, stabil temperatur på -5 °C, og fryse-tine sykluser mellom +5 °C og -5 °C. Den biologiske nedbrytningen av olje ble målt i oljeforurenset jord tilsatt radiomerket heksadekan. Både jord tilsatt næringsstoffer og jord ikke tilsatt næringsstoffer ble anvendt i forsøket. Biologisk nedbrytning av den radiomerkede komponenten ble påvist i alle jordprøver. I jordprøvene holdt stabilt på -5 °C var hydrokarbonmineraliseringen lav, men påvisbar, både i jord tilsatt og ikke tilsatt næringsstoffer. Maksimal nedbrytningsrate ble målt i jordprøvene tilsatt næringsstoffer ved +5 °C. Nedbrytningsraten var 48 mg heksadekan per kg jord per dag, målt i den eksponentiale nedbrytningsfasen. Fryse-tine syklusene så ut til å virke stimulerende for heksadekanmineraliseringen, sammenlignet med mineraliseringen i jordprøvene holdt stabilt på +5 °C. Fryse-tine syklusene så ikke ut til å påvirke de mikrobielle populasjonene i jorda på en negativ måte, og det totale antallet av dyrkbare heterotrofe bakterier økte i løpet av forsøksperioden.

Resultatene fra arbeidet viser at biologisk nedbrytning av hydrokarboner i arktisk jord skjer ved lav temperatur, og at mikroorganismene i jorda er tilpasset lave temperaturer. Fryse-tine syklusene fører til en omrøring av jordpartiklene med en påfølgende frigjøring av næringsstoffer, og virker derfor stimulerende for biologisk nedbrytning av hydrokarboner i jord med et lavt innhold av næringsstoffer. Nedbrytningsforsøkene viste at en tilstrekkelig tilgang av næringsstoffer er avgjørende for en effektiv biologisk nedbrytning av oljekomponenter. Ved en større oljelekkasje vil det derfor være nødvendig med tilstrekkelig tilgang av

næringsstoffer og oksygen for å oppnå optimale nedbrytningsforhold.

Introduksjon

Det arktiske miljøet er ansett å være lite forurenset sammenlignet med andre deler av verden, men er likevel utsatt for oljeforurensinger fra et vidt spekter av menneskelig aktiviteter. Biologisk nedbrytning av petroleum hydrokarboner av de naturlig tilstedeværende mikroorganismene i jorda er en ofte anvendt opprenskningsmetode av oljeforurenset grunn. Arktiske jordmiljø skiller seg fra andre jordmiljø på flere måter som kan påvirke den biologiske nedbrytningen av oljeforurensinger. De viktigste faktorene er temperaturregimet og tilgjengeligheten av næringsstoffer og vann. I store deler av Arktis er grunnen frosset i størstedelen av året, grunnet negative gjennomsnittstemperaturer. Om sommeren når temperaturene stiger vil det øverste laget av grunnen, også kalt det aktive laget, tine. Om våren og høsten vil temperaturene i dette laget variere over og under frysepunktet, noe som fører til hyppig frysing og tining.

Fryse- og tinesykluser påvirker fysiske, kjemiske og mikrobielle parametere i grunnen. Effekten på jordas parametere er avhengig av forskjellige faktorer slik som hyppigheten av frysingen og tiningen, temperaturvariasjoner, vanninnholdet i jorda, jordas tetthet og antall sykluser (Herrmann and Witter, 2002). Frysing og tining av en jordart vil føre til utvikling av forskjellige typer mikrostrukturer, slik som partikkelsortering, akkumulering og gruppering av mineralkorn og partikkelsammenklumpning. Forsøk har vist at frysetine sykluser fører til økt hydraulisk konduktivitet og porøsitet i leire og silt (White and Williams, 1999). Frysing og tining av en jordart kan videre føre til en forandring av porevannssammensetningen (Walworth, 1992), forandre den mikrobielle tilgjengeligheten av utskiftbare ioner (bl.a. NH_4^+ og K^+) (Hinman, 1970) og frigjøre næringsstoffer fra organisk materiale (løv, gress o.l.) (Taylor and Parkinson, 1988).

I dette arbeidet ble arktiske jordprøver utsatt for flere fryse-tine sykluser fra +5 til -5 °C for å studere hvordan temperaturfluktuasjoner over og under frysepunktet påvirker den biologiske nedbrytningen av hydrokarboner i jord fra et kaldt klima. Temperaturbegrensninger i kaldt klima-jordarter gjør det ønskelig å optimalisere andre parametere, bortsett fra temperaturfluktuasjoner, som er viktige for hydrokarbonbiodegradering. Laboratorieforskningene ble utført under aerobe forhold for å sikre oksygentilgang for aerob mineralisering av karbonkildene. Innledende eksperiment hvor forskjellig mengde av næringsstoffene ammonium og fosfat ble tilsatt ved konstant temperatur, ble utført for å estimere optimale næringsinnhold

i jorda for nedbrytning av hydrokarboner før jorda ble utsatt for fryse-tine syklusene.

METODER

Beskrivelse av lokalitetene

Jordprøver ble tatt fra det aktive laget ved 0,2-0,4 m dybde fra det tidligere brannøvingsfeltet ved Longyearbyen flyplass, Svalbard (78°15'N, 15°30'Ø). Som en følge av brannøvingsaktiviteten som fant sted fra 1974 til 2000, ble en ukjent mengde forskjellige hydrokarbonprodukt og brannslukningskemikalier spilt ut i grunnen. Årlig gjennomsnittstemperatur på Longyearbyen flyplass er -6,7 °C (Norwegian Meteorological Institute, 2005). Det er permafrost i grunnen, og det aktive laget strekker seg ned til ca 2 m dybde på sensommeren (Rike et al., 2003).

Mineralisering av heksadekan i jord

Biologisk nedbrytning av hydrokarbonet heksadekan i jord ble målt ved bruk av radiorespirometri. Førti jordprøver ble plassert i en 250 ml biometerflaske med sidearm og tilsatt n -[1- ^{14}C] heksadekan til en endelig konsentrasjon på 5000 mg heksadekan/kg jord. Radiomerket karbondioksid ($^{14}\text{CO}_2$) som ble utviklet ved nedbrytningen av de ^{14}C merkede komponentene ble fanget opp i en lutfelle (10 ml 1 M KOH) i sidearmen til biometerflaska. Det ble regelmessig tatt ut lutprøver og mengden $^{14}\text{CO}_2$ i lutene ble målt ved bruk av "liquid scintillation spectrometry" som tellinger per minutt (cpm). Mengden av mineralisert heksadekan ble deretter beregnet ut fra talletallene, korrigert for bakgrunn og quenching med eksterne standarder. Sterile kontrollprøver ble inkludert for å sette tall på abiotisk nedbrytning av de radiomerkede komponentene. Alle prøvene ble inkubert i mørket ved forskjellige temperaturer og tidsperioder. For en mer detaljert metodebeskrivelse henvises det til Børresen et al. (2003).

Fryse-tine sykluser

Jordprøvene ble utsatt for fryse-tine sykluser (FTC) som varierte mellom +5 og -5 °C for å studere hvordan mineraliseringen av hydrokarboner i jordprøver tilsatt næringsstoffer og jordprøver med naturlig næringsinnhold blir påvirket. Jordprøvene ble utsatt for fryse-tine sykluser på 4, 8 og 16 dager. Syklusene besto henholdsvis av 2, 4 og 8 dager ved +5 °C fulgt av 2, 4 og 8 dager ved -5 °C. Eksperimentet gikk i 48 dager, noe som totalt ga 12, 6 og 3 sykluser (figur 1). Jordprøver holdt ved en stabil temperatur på +5 eller -5 °C ble

inkludert som kontroller. En næringsstoffløsning ble tilsatt for å oppnå konsentrasjoner av 200 mg NH₄-N og 20 mg PO₃-P/kg jord. Tilsetning av løsningen økte vanninnholdet til 15 %. Heksadekanmineralisering i jord

Tabell 1. Karakterisering av jordprøvene

	Longyearbyen
MPN/g acetat	4.2 × 10 ⁶
MPN/g diesel	2.5 × 10 ⁵
CFU/g	5.5 × 10 ⁷
Total Petroleum Hydrocarbons (C ₁₀ -C ₃₆) (mg/kg)	5224
NO ₃ -N (mg/kg)	<0.5
NO ₂ -N (mg/kg)	<0.1
NH ₄ -N (mg/kg)	<0.5
PO ₃ -N (mg/kg)	0.7
Total organisk C (%)	2.3
Total N (%)	<0.05
C:N forhold	-
Vanninnhold (%)	11.2
pH	5.6
Elektrisk ledningsevne (µS/cm)	101
Kornfordeling	
Grus (%)	16.8
Sand (%)	71.3
Silt (%)	11.9
Leire (%)	0

med naturlig næringsinnhold ble studert ved å sette til sterilisert vann til tilsvarende vanninnhold (15 %). Jordprøvene ble analysert for innhold på NH₄-N, NO₃-N og PO₃-P ved start (etter tilsetning av næringsstoffer/sterilt vann) og etter 16, 32 og 48 dager for å følge ekstraherbart innhold av næringsstoffer og eventuell produksjon av nitrat. Ekstraksjon og fortynning av jordprøver for mikrobiell antallsbestemmelse ble utført samme dag som næringsstoffekstraksjonene.

RESULTATER OG DISKUSJON

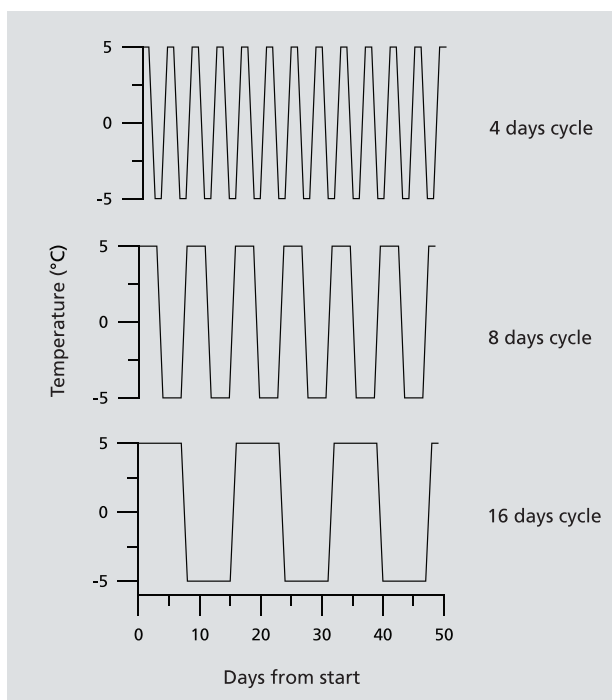
Karakterisering av jordprøvene

Resultater fra karakteriseringen av jordprøven er gitt i tabell 1. Kornfordelingskurvene viser at den har et lavt leire- og siltinnhold, og kan klassifiseres som sand. Elektrisk ledningsevne er lav og indikerer et lavt saltinnhold. Vanninnhold og pH er på nivåer som er antatt å være optimale for mikrobiell aktivitet i den umettede sonen (King et al., 1992). Jordprøven er forurenset med hydrokarboner og har et lavt naturlig innhold av næringsstoffer. Mikrobiell antallsbestemmelse (CFU) viser at antallet mikroorganismer i jorda er betydelig og antas å ikke være begrensende for biologisk nedbrytning av oljekomponentene. MPN-analyse med acetat og diesel som karbonkilde viser at det har foregått en anrikning av oljedegraderende mikroorganismer i jorda. Dette indikerer at mikroorganismene er i stand til å tilpasse seg hydrokarbonforurenset miljø og tar oljekomponenter i bruk som nærings- og energikilde, også ved lav temperatur.

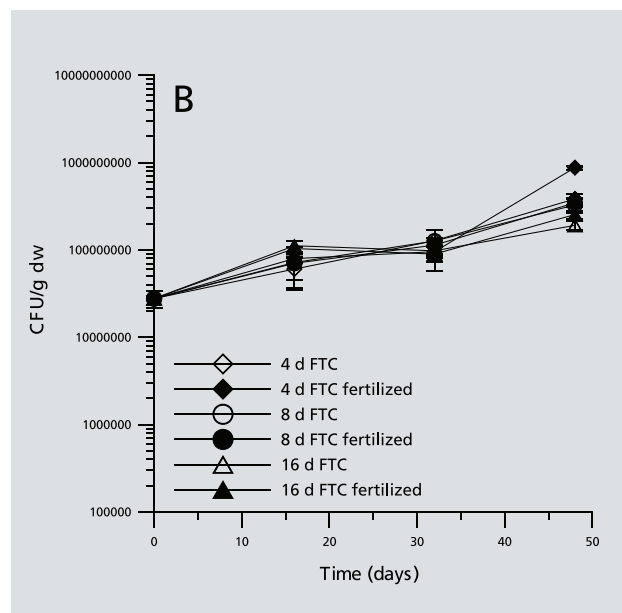
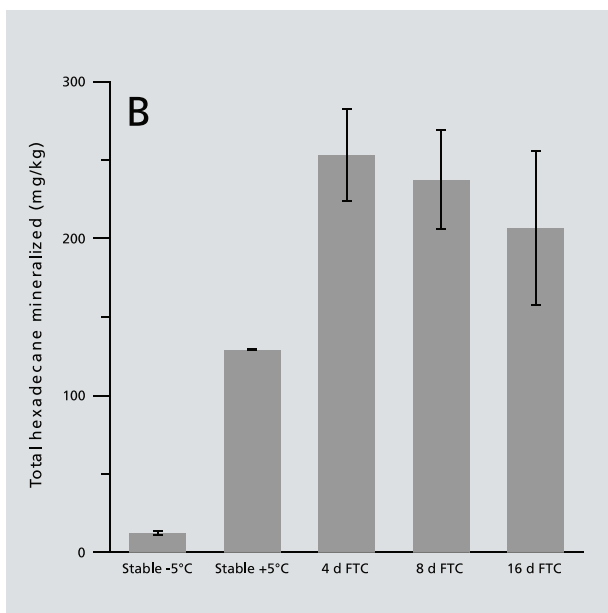
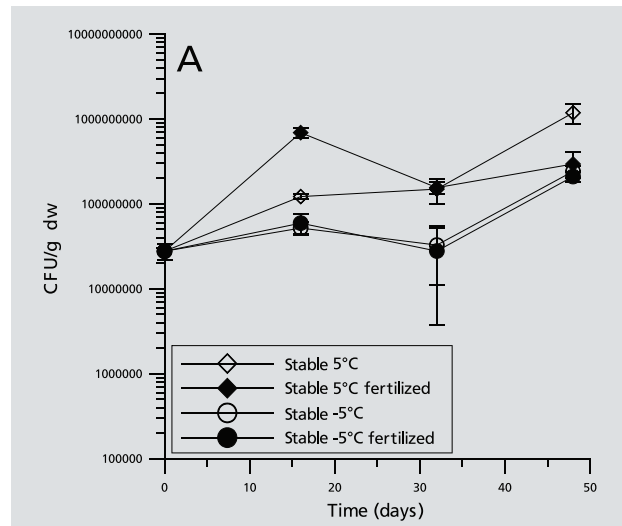
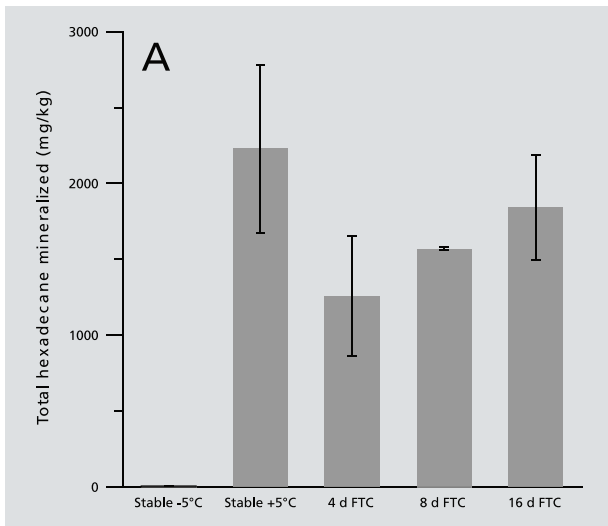
Mineralisering av heksadekan i jord fra Longyearbyen utsatt for fryse-tine sykluser

Fryse-tineforsøket besto av 4, 8 og 16 dagers sykluser med temperaturer som varierte mellom +5 °C og -5 °C, samt kontroller med stabile temperaturer (+5 °C og -5 °C). Forsøket ble kjørt over en tidsperiode på 48 dager. Mikrobiell mineralisering av den radiomerkede komponenten (heksadekan) ble påvist i alle jordprøvene, både de tilsatt og ikke tilsatt næringsstoffer, inkludert prøver holdt ved stabil temperatur på +5 °C og -5 °C. I alle jordprøvene oppbevart ved -5 °C var det en lav, med likevel detekterbar mikrobiell aktivitet. Den totale heksadekanmineraliseringen var henholdsvis 8 og 12 mg/kg jord ved slutten av forsøket i prøver tilsatt og ikke tilsatt næringsstoffer. Dette tilsvarer en reduksjon på 0,2 % av utgangskonsentrasjonen på 5000 mg heksadekan/kg. I de steriliserte kontrollene var reduksjonen under 1 mg/kg i alle prøver, noe som tilsvarer under 0,02 % av den opprinnelige utgangskonsentrasjonen.

Som forventet var den høyeste mineraliseringen



Figur 1. Temperaturregimet under fryse-tineforsøket



Figur 2. Total heksadekan mineralisering etter 48 dager i Longyearbyen jord utsatt for 4, 8 og 16 dagers fryse-tine sykluser, i jord tilsatt (A) og ikke tilsatt (B) næringsstoffer

Figur 3. Antall mikroorganismer (CFU/g) i jord fra Longyearbyen fra stabilt temperaturregime (+5 °C og -5 °C) (A) og utsatt for 4, 8 og 16 dagers fryse-tine sykluser (B)

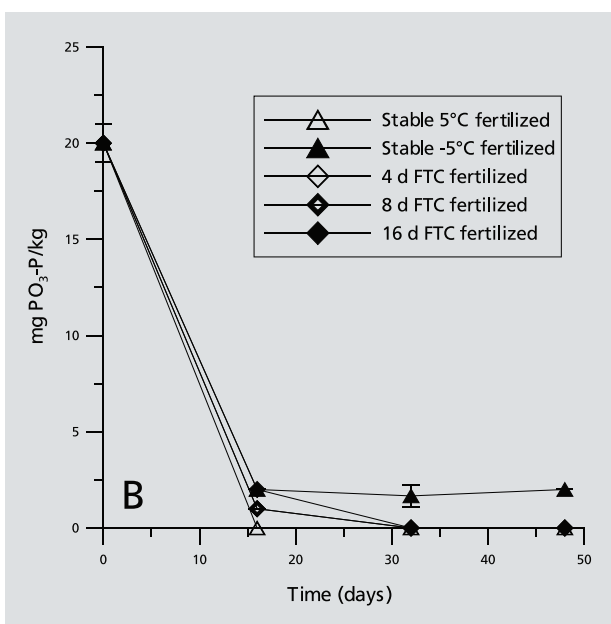
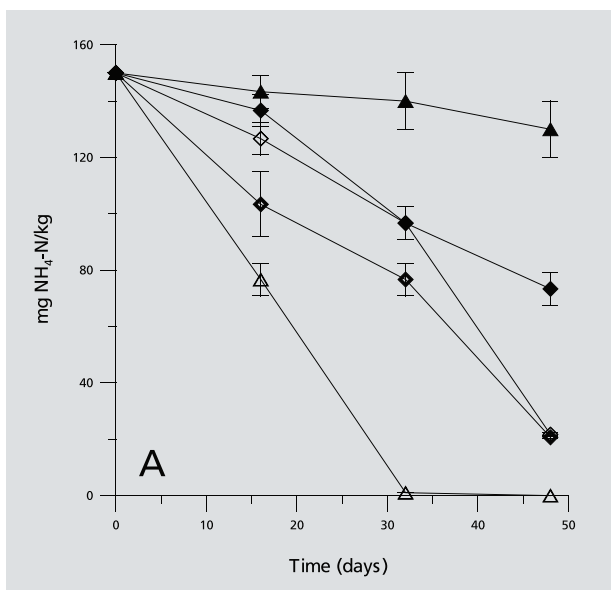
målt i jord tilsatt næringsstoffer og oppbevart ved +5 °C, hvor 2229 mg heksadekan/kg jord var mineralisert ved slutten av forsøket (tilsvarer en reduksjon på 44,6 % av opprinnelig heksadekankonsentrasjon). Betydelig mineralisering ble også påvist i jord tilsatt næringsstoffer og utsatt for fryse-tine sykluser (figur 2A). Den totale mineraliseringen kan bli relatert til frekvensen til fryse-tine syklusene: Jo lengre og færre sykluser, desto høyere total mineralisering. Resultatet var 1258 mg heksadekan/kg for 4 dagers sykluser (12 sykluser totalt), 1570 mg/kg for 8 dagers sykluser (6 sykluser totalt) og 1842 mg/kg for 16 dagers sykluser (3 sykluser totalt). Om man ser på tidligere forskning som har vist at ett fryse-tine syklus kan drepe opp til 50 % av den mikrobielle massen (Soulides and Allison,

1961), er heksadekanmineraliseringen i jorda utsatt for fryse-tine sykluser overraskende høy. Hvis man tar med i betraktningen at jorda har tilbrakt halve tida ved -5 °C hvor ingen eller veldig lav mineralisering finner sted, ville teoretisk sett den totale mineraliseringen maksimum nå opp til halvparten av den i jorda holdt stabilt ved +5 °C (tilsvarer 1115 heksadekan mg/kg). Den totale mineraliseringen i jordprøvene tilsatt næringsstoffer og utsatt for fryse-tine sykluser er 1258 eller høyere. Dette indikerer at fryse-tine syklusene har en stimulerende effekt på mineraliseringen av heksadekan i jord.

I jordprøvene med naturlig innhold av næringsstoffer var mineraliseringsmønsteret forskjellig fra jorda tilsatt næringsstoffer. Høyest total mineralisering

ble målt i prøver utsatt for fryse-tine sykluser, etterfulgt av prøver holdt stabilt ved +5 og -5 °C (figur 2B). Mineraliseringen kan også her relateres til frekvensen av fryse-tine syklusene, men i omvendt rekkefølge: Jo kortere og flere fryse-tine sykluser, desto høyere mineralisering. Den totale heksadekanmineraliseringen var 206 mg/kg for 16 dagers syklus, 237 mg/kg for 8 dagers syklus og 253 for 4 dagers syklus. For jorda holdt stabilt ved +5 °C var mineraliseringen 129 mg/kg. Dette indikerer at fryse-tine sykluser har en stimulerende effekt på heksadekanmineralisering også på jordprøver som har et naturlig lavt innhold av næringsstoffer og som ikke er tilsatt næringsstoffer.

Antallet heterotrofe mikroorganismer i jord ble talt



Figur 4. Innhold av ekstraherbart NH₄-N (A) og PO₃-P (B) i jord ved forskjellig tid i fryse-tine forsøkene med jord fra Longyearbyen

etter 0, 16, 32 og 48 dager ved hjelp av CFU-metoden. I alle jordprøvene var antallet mikroorganismer høyere ved slutten av forsøket, sammenlignet med starten (figur 3). Det var ingen signifikant forskjell i CFU-antallet relatert til næringsstofftilsetning, frekvens av fryse-tine forsøkene eller temperaturregimet. Økningen i CFU-antallet kunne heller ikke settes i sammenheng med total heksadekan mineralisering eller konsentrasjonen av tilgjengelige næringsstoffer. Jordprøvene utsatt for fryse-tine sykluser viste en jevn økning i antall mikroorganismer fra $2,8 \times 10^7$ CFU/g ved start til mellom $1,9 \times 10^8$ og $8,8 \times 10^8$ CFU/g etter 48 dager. Det ser ikke ut til at frysing og tining har en negativ innvirkning på mikroorganismene i jorda. Økningen i det mikrobielle antallet kan skyldes tilsetningen av heksadekan som viker som en ny karbonkilde i jorda.

Jordprøvene ble analysert for innhold på nitrogen som ammonium (NH₄-N) og nitrat (NO₃-N), og for fosfor som fosfat (PO₃-P) til samme tid som den mikrobielle antallsbestemmelsen (figur 4). Analysene ble utført for å få en indikasjon på innholdet av tilgjengelige næringsstoffer til forskjellig tid. Av de 200 mg NH₄-N og 20 mg PO₃-P som ble tilsatt per kg jord i begynnelsen av forsøket, var mengden ekstraherbart ammonium og fosfat 150 mg NH₄-N og 20 mg PO₃-P/kg jord ved dag 0. Nitrat ble ikke påvist i noen av prøvene over deteksjonsgrensa (<10 mg NO₃-N/kg). Ingen næringsstoffer ble påvist i jordprøvene som ikke ble tilsatt næringsstoffer (deteksjonsgrensene var <1 mg NH₄-N/kg og <1 mg PO₃-P/kg). Mengden ekstraherbart NO₃-N og PO₃-P i prøvene tilsatt næringsstoffer avtok raskt. Konsentrasjonen av fosfat avtok fra 20 til 2 mg PO₃-P/kg eller lavere i alle prøver innen 16 dager. I prøven oppbevart ved -5 °C holdt konsentrasjonen seg på 2 mg PO₃-P/kg fra den sekstende dagen og ut forsøket, mens det i de andre jordprøvene sank til under deteksjonsgrensa. Nedgangen i ammoniuminnholdet var noe svakere, og det var bare i prøvene oppbevart ved +5 °C at innholdet sank til deteksjonsgrensa eller under. Nedgangen var svakest i prøver holdt ved -5 °C, hvor konsentrasjonen sank fra 150 mg NH₄-N/kg ved start til 130 mg NH₄-N/kg ved slutten av forsøket. Innholdet av ammonium i prøvene utsatt for fryse-tine sykluser sank til en endelig konsentrasjon mellom 21 og 73 mg NH₄-N/kg. Det lave nitratinnholdet i jorda indikerer at ingen store mengder nitrogen tilsatt som ammonium ble omdannet til nitrat ved mikrobielle prosesser.

Forbruket av næringsstoffer uttrykt som nedgangen i ekstraherbare næringsstoffer (spesielt NH₄-N innholdet) kan relateres til den totale heksadekanmineraliseringen: Jo høyere forbruk av næringsstoffer, desto høyere total heksadekanmineralisering. Høyest mineralisering ble målt i jordprøvene tilsatt næringsstoffer og oppbevart ved +5 °C. Ved slutten av forsøket var næringsstoffinnholdet i disse prøvene under deteksjonsgrensa. Prøvene som var oppbevart ved -5 °C

hadde lavest mineralisering og ga den høyeste konsentrasjonen med ekstraherbare næringsstoffer etter 48 dager. I prøvene utsatt for fryse-tine sykluser var den totale heksadekanmineraliseringen i mellom resultatene for prøvene med stabile temperaturer. Dette ble gjenspeilet i mengden ekstraherbare næringsstoffer som også var i mellom næringsstoffverdiene for prøvene med stabile temperaturer. Konsentrasjonen av ekstraherbare næringsstoffer avtok i alle jordprøvene i løpet av forsøketiden, noe som viser at tilgjengeligheten av ammonium og fosfat avtar med tid, både ved temperatursvingninger og stabile temperaturer.

Fryse-tine syklusene kan ha ført til en mobilisering og økning i tilgjengelige næringsstoffer i jorda, men denne mulige frigjøringen var for liten til å bli målt med den anvendte ekstraksjonsmetoden. Forandringen i antallet mikroorganismer i jord fra $2,8 \times 10^7$ til $8,8 \times 10^8$ CFU/g tilsvarer en økning på $8,5 \times 10^{11}$ CFU/kg jord. Omregning av dette tallet til biomasse ved å bruke en gjennomsnittlig mikrobiell cellevekt på 1×10^{-12} g/celle (Madigan et al., 2000), gir en økning i den mikrobielle massen på 848 mg/kg jord. Hvis vi videre antar at forholdet mellom karbon, nitrogen og fosfor (C:N:P-forholdet) i mikrobiell cellemasse er 100:10:2 (Alexander, 1999) vil økningen i massen kreve 76 mg N og 15 mg P/kg. Denne mengden næringsstoffer er teoretisk tilgjengelig fra tilsatt $\text{NH}_4\text{-N}$ og $\text{PO}_3\text{-P}$, og tilgangen på næringsstoffer for mikroorganismene i jorda skal derfor ikke være begrensende for bakteriell vekst i løpet av forsøket.

Resultatene fra dette forsøket viser at fryse-tine sykluser påvirker hydrokarbonmineralisering på en positiv måte sammenlignet med jord utsatt for et stabilt temperaturregime. For prøver med et naturlig næringsstoffinnhold hvor næringsstoffer ikke er blitt tilsatt kan denne positive effekten forklares med at frysing og tining fører til at enkelte bakterier dør og på denne måten frigjøres næringsstoffer til de gjenværende mikroorganismene i jorda. Naturlig utvelging fører til en anrikning av oljedegraderende mikroorganismer som overlever temperatursvingninger rundt frysepunktet. Fryse-tine hendelsene virker også inn på mobiliteten, biotilgjengeligheten og turnoverhastigheten for næringsstoffene i jorda, og gjør dem mer tilgjengelige for mikroorganismene. Den økte totale heksadekanmineraliseringen med økt hyppighet på fryse-tine syklusene støtter denne påstanden.

Hvis man tar i betraktning både naturlige og tilsatte mengde hydrokarboner og næringsstoffer vil C:N:P-forholdet i jord tilsatt næringsstoffer være 100:2:0,9, en mengde som teoretisk er tilstrekkelig for å opprettholde mineralisering av alle hydrokarbonene i jorda. Hvis man tar dette i betraktning vil redistribuering og frigjøring av de naturlig forekommende næringsstoffene grunnet fryse-tine hendelsene ha liten betydning for den totale heksadekanmineraliseringen i jord tilsatt næringsstoffer. Med unntak av jordprøven holdt

stabilt ved -5°C var mineraliseringen høy i alle prøver tilsatt næringsstoffer. Det at lenger fryse-tine sykluser gir høyere heksadekanmineralisering i jord tilsatt næringsstoffer, indikerer at mikroorganismer foretrekker lange, uforstyrrede perioder ved $+5^\circ\text{C}$ for å oppnå høy degraderingsaktivitet.

Konklusjoner

Fryse-tine eksperimentet viser at det å utsette jordas mikroorganismer for fryse-tine sykluser mellom $+5$ og -5°C ikke har en negativ effekt på mikroorganismene. Antallet kultiverbare mikroorganismer var høyere på slutten av forsøket enn ved begynnelsen, både for jord tilsatt og ikke tilsatt næringsstoffer. Økningen var antakelig relatert til tilsetningen av en ny karbonkilde til jorda. I jordprøver tilsatt næringsstoffer avtok konsentrasjonen av ekstraherbare næringsstoffer med tid, og nedgangen var relatert til den totale heksadekanmineraliseringen i jorda. Frekvensen av fryse-tine syklusene hadde en merkbart effekt på den totale mineraliseringen både i jord tilsatt næringsstoffer og jord med naturlig innhold av næringsstoffer, sammenlignet med jordprøver oppbevart ved en stabil temperatur på $+5$ og -5°C . I jord med et naturlig næringsstoffinnhold var heksadekanmineraliseringen høyere desto kortere fryse-tine syklusen var. Dette resultatet indikerer at fryse-tine hendelsene påvirker mobiliteten og bio-tilgjengeligheten av næringsstoffer i jorda og gjør dem mer tilgjengelige for mikroorganismene. Denne effekten var markert i jorda tilsatt næringsstoffer, hvor tilgangen på næringsstoffer ikke var begrensende for hydrokarbonnedbrytningen. Mikroorganismer i næringsrike omgivelser foretrekker lange, uforstyrrede perioder ved $+5^\circ\text{C}$ for å opprettholde en høy degraderingsaktivitet. Mineraliseringen stanset ikke opp når temperaturen ble forandret til -5°C , men var mye lavere sammenlignet med mineraliseringen ved $+5^\circ\text{C}$.

Resultatene fra arbeidet viser at biologisk nedbrytning av hydrokarboner i arktisk jord skjer ved lav temperatur, og at mikroorganismene i jorda er tilpasset lave temperaturer. Nedbrytningsforsøkene viste at en tilstrekkelig tilgang av næringsstoffer er avgjørende for en effektiv biologisk nedbrytning av oljekomponenter.

Denne artikkelen beskriver en del av en doktorgradsavhandling utført av Marion H. Børresen. Avhandlingen har tittelen "Biodegradation of hydrocarbons in Arctic soils at low temperature" og ble forsvart ved Institutt for geofag ved Universitetet i Oslo i 2005.

Referanser

Alexander, M., 1999. Biodegradation and bioremediation. Academic Press, San Diego.

Børresen, M., Breedveld, G.D., and Rike, A.G., 2003. Assessment of the biodegradation potential of hydrocarbons in contaminated soil from a permafrost site. *Cold Regions Science and Technology*, 37: 137-149.

Herrmann, A. and Witter, E., 2002. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 34(10): 1495-1505.

Hinman, W.C., 1970. Effects of freezing and thawing on some chemical properties of three soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 50(2): 179.

King, R.B., Long, G.M., and Sheldon, J.K., 1992. Practical environment bioremediation. Lewis publishers, Boca Raton.

Madigan, M.T., Martinko, J.M., and Parker, J., 2000. Brock biology of microorganisms. Prentice Hall International, New Jersey.

Norwegian Meteorological Institute, 2005. Mean annual air temperatures at Svalbard. Oslo.

Rike, A.G., Haugen, K.B., Børresen, M., Engene, B., and Kolstad, P., 2003. In situ biodegradation of petroleum hydrocarbons in frozen arctic soils. *Cold Regions Science and Technology*, 37(2): 97-120.

Soulides, D.A. and Allison, F.E., 1961. Effects of drying and freezing soil on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation and bacterial population. *Soil Science*, 91: 291-298.

Taylor, B.R. and Parkinson, D., 1988. Does repeated freezing and thawing accelerate decay of leaf litter. *Soil Biology & Biochemistry*, 20(5): 657-665.

Walworth, J.L., 1992. Soil drying and rewetting, or freezing and thawing, affects soil solution composition. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2): 433-437.

White, T.L. and Williams, P.J., 1999. The influence of soil microstructure on hydraulic properties of hydrocarbon-contaminated freezing ground. *Polar Record*, 35(192): 25-32.

Fokusert infiltrasjon i frossen grunn øker faren for transport av forurensning til grunnvannet

Focused flow in frozen ground increases contamination risk of ground water resources

Nils-Otto Kitterød, Bioforsk Jord og Miljø (nils-otto.kitterod@bioforsk.no)

Summary

Snowmelt during spring occurs normally through repeated cycles of daytime melting and night time freezing. This repetitive melting and freezing of snow gives rise to a solid layer of frozen ground below the snow cover. Frozen ground reduces infiltration capacities and may lead to ponding in local depressions. At the end of the snowmelt period when the frozen soil finally is thawing, the infiltration intensities may be extremely high because of the accumulated volume of water. Surface ponding represents therefore a hazard to the groundwater quality if the area is exposed to pollution. Contaminated surface water may reach the groundwater for two reasons: Firstly, the remediation capacity in the vadose zone is reduced by low temperature. Secondly, because of high infiltration intensity the contaminants in the water may be transported faster than they are degraded.

Sammendrag

Normal snøsmelting om våren skjer ved delvis smelting om dagen med påfølgende innfrysing om natten. Slike gjentagende smelte- og fryseprosesser kan resultere i mer eller mindre sammenhengende islag under snødekket. Et slikt islag reduserer infiltrasjonskapasiteten i jorda og er årsaken til dannelsen av overflatedammer i forsenkninger i åpent terreng eller på dyrka mark. Når telen går, kan det oppstå situasjoner med svært høye infiltrasjonshastigheter. Dette representerer en forurensningsrisiko dersom vannet i dammene er kontaminert. Med normale infiltrasjonshastigheter vil som regel fysiske, kjemiske og biologiske prosesser i jorda holde forurensningen tilbake og bryte ned mesteparten før det når grunnvannet. Lave temperaturer i infiltrasjonsvannet gjør at nedbrytningsprosesser i jorda går langsommere enn normalt. Kom-

binert med høye infiltrasjonshastigheter, vil risikoen øke for at grunnvann og nærliggende vassdrag blir forurenset.

Innledning

Forurensning av grunnvann er på mange måter et paradoks: Grunnvann i både fjell og løsmasser er som regel beskyttet av det mest robuste filteret vi kjenner til, nemlig jord. Produksjon av organisk avfall fra naturen selv er i størrelsesorden 1 kg pr. m² (Bakken med fl., 1999). Likevel er naturlig grunnvann i praksis fritt for organiske forbindelser. Årsaken er den unike kombinasjon av fysiske, kjemiske og biologiske prosesser i jorda. Normalt sørger disse beskyttelsesmekanismene for at grunnvannet forblir en trygg vannkilde. Likevel forurenses grunnvannet fra tid til annen.

I denne artikkelen vil jeg ta for meg et fenomen som er spesielt interessant i vårt klima, nemlig infiltrasjon i forbindelse med snøsmeltingen om våren. Enkelte vintre dannes det overflatedammer i åpent terreng. Dette fenomenet ser vi ofte i forsenkninger på dyrket mark, men i denne artikkelen tar jeg utgangspunkt i observasjoner fra Gardermoen. Enkelte vintre dannes relativt store overflatedammer i nærheten av rullebanen. Dette vannet inneholder avisningskjemikalier som ikke bør kontaminere grunnvannsressursene under flyplassen. Flyplassmyndighetene har gjort en stor innsats for å minimalisere dette problemet, og det er resultater fra deler av dette arbeidet jeg vil trekke fram i denne artikkelen. Hvorfor får vi overflatedammer enkelte år mens andre år er de så godt som fraværende? Hva skjer når dammene forsvinner? Hvilke infiltrasjonshastigheter kan vi regne med? Kan infiltrasjonshastigheten bli forsterket av barrierer i undergrunnen,

eller vil porøsiteten i undergrunnen spre fuktigheten og dermed dempe strømningshastighetene? Disse spørsmålene har vært gjenstand for akademisk interesse i lang tid, og i denne artikkelen vil jeg oppsummere noen resultater fra denne forskningen.

Stadig vekk blir forskere overrasket over hvor dypt ned i jordprofilen man finner sporstoff og forurensning. Like ofte overraskes vi over hvor raskt dette skjer. Disse erfaringene har ført til begreper som "foretrukne strømningsveier" (Kung, 1990a; 1990b; Flury med fl., 1994), eller "traktstrømning" (Kung, 1993; Walter med fl., 2000). Et annet beslektet fenomen, som vi ofte observerer i typisk nordisk moreneterrang, er den korte responstiden mellom kraftige infiltrasjonshendelser og økt vannføring i bekker og nærliggende vassdrag (Grip og Rhode, 1988). Zheng med fl. (2001a; 2001b) gjorde infiltrasjonsforsøk på frossen mark i Kina. De påviste en klar sammenheng mellom infiltrasjonshastigheter og teledyp. I denne sammenhengen er det interessant å merke seg at de estimerte infiltrasjonshastigheter på opp mot 350 mm/dag i forbindelse med teleløsningen. Frost og tele reduserer infiltrasjonskapasiteten (Stadler med fl., 2000). Dette er et stort problem i forbindelse med erosjon og avrenning av pesticider og næringsstoffer fra landbruket, men det er også et problem i forbindelse med moderne flyplassdrift som vi skal se litt nærmere på i denne artikkelen.

Hvorfor dannes overflatedammer?

Det er enkelt å forstå at dannelsen av overflatedammer skyldes redusert infiltrasjonskapasitet i jorda, men hvilke hydrologiske prosesser er det som styrer infiltrasjonskapasiteten i perioder med frost? Stoeckeler og Weitzman (1960) undersøkte *fuktighetsforholdene* i jorda før frysing. Lavt fuktighetsinnhold gir enten kornet eller porøs frostdannelse. Under slike forhold er sjansen for overflatedammer liten. Høyt fuktighetsinnhold derimot kan gi et sammenhengende frostlag. Dette reduserer infiltrasjonskapasiteten betraktelig og sjansen for damdannelse øker. En annen viktig faktor er *snøsmeltingen*. En sammenhengende snøsmelting fører sjelden til damdannelse. Med større snømengder vil bare deler av vannet smelte i løpet av dagen. I vårt klima er det vanlig med nattefrost om våren. Da fryser smeltevannet. I begynnelsen skjer innfrysningen i snølaget, men etterhvert som snøen mettes, kan vannet også fryse i jorda og etterhvert også på jordoverflaten. Desto lengre denne fryse-tine prosessen gjentas, desto mer blir infiltrasjonskapasiteten redusert. Den tredje faktoren er at *telefronten suger* til seg vann. På grenseflaten mellom is og vann oppstår det et kraftig sug. Det er beregnet teoretiske spenninger langs telefronten på 160 MPa tilsvarende ca. 16 km vannsøyle (Schenk, 1968). Fordi telen suger til seg vann nedenfra, blir frostlaget mer sammenhengende samtidig som jorda

under telefronten blir uttørket. Samtidig vet vi at den hydrauliske ledningsevnen er en funksjon av vanninnholdet. Desto mer fuktighet det er i jorda, jo større er ledningsevnen. Når jorda tørkes ut, minsker den hydrauliske ledningsevnen betraktelig (Hansson med fl., 2004).

Hva skjer når dammene forsvinner?

Redusert infiltrasjonskapasitet er et generelt fenomen som forekommer i alle typer terrang. Hvis terrenget har sammenhengende fall til nærliggende grøfter og vassdrag får vi overflateavrenning. I ekstreme situasjoner fører dette til erosjon og utvasking av næringsstoffer. De største overflatedammene finner vi imidlertid i forsenkninger i terrenget. Er det grove løsmasser på overflaten kan disse dammene forsvinne fort når telen først slipper taket. De som kjenner avsetningen på Gardermoen vet at det er mye sand og grus på overflaten, og spørsmålet meldte seg derfor om dammene som ligger nærmest rullebanen representerer en risiko for grunnvannskvaliteten. I disse dammene vil det alltid være rester etter avisningskjemikalier som er brukt gjennom vinteren. Disse avisningskjemikalierne er organiske forbindelser som normalt brytes ned i løpet av noen få dager i jorda. Nedbrytningsstudier som er gjennomført på Gardermoen, gir halveringstider fra 7 til 50 dager avhengig av: Initial konsentrasjon; temperaturen i bakken; om feltet er jomfruelig eller om det har vært utsatt for lignende belastninger tidligere (French og Bakken med fl., 2002). Nedbrytningshastighetene er også avhengig av hvilke stoffer som brytes ned. I denne sammenhengen er det formeat, acetat og glykol som har blitt studert.

For å beregne vannets oppholdstid fra overflaten og ned til grunnvannspeilet er det først og fremst to faktorer som må være kjent. Det ene er infiltrasjonskapasiteten (I) som vi har diskutert ovenfor, det andre er infiltrasjonshastigheten (U). Infiltrasjonshastigheten U [lengde/tid] er et uttrykk for vannets strømningshastighet gjennom jordoverflaten. Etter at telen har gått, er U den mest kritiske faktoren. Dersom U er større enn I , får vi overflateavrenning. I grove masser er som regel alltid I større enn U , og vannet vil infiltrere i løsmassene. I finkornede masser som vi særlig finner nedenfor marin grense i vårt land, kan infiltrasjonskapasiteten være overraskende høy i vårløsningen. Det kan skyldes frostsprengning som kan gi mikrosprekker i jord-aggregatene, eller tørkesprekker forårsaket av telesuget. Begge deler bidrar til dramatisk økning av I . Dersom I er større enn U , vil altså infiltrasjonshastigheten være avgjørende for transport av forurensning.

Området mellom jordoverflaten og grunnvannspeilet blir ofte kalt umettet sone. Som navnet tilsier, er porene i denne sonen bare delvis fylt av vann.

Vanninnhold (θ) i umettet sone kan måles ved indirekte målemetoder. Dypet L [lengde] til grunnvannspeilet er enkelt å måle i peilebrønner, og L blir målt kontinuerlig i en rekke peilebrønner på Gardermoen. I punkter hvor det ikke er observasjoner, kan L beregnes med god nøyaktighet. Hvis infiltrasjonskapasiteten I , er større enn infiltrasjonshastigheten U , kan vi beregne gjennomsnittlig oppholdstid i umettet sone dersom U er kjent. For å få et overslag over oppholdstiden kan vi i første omgang forutsette at gjennomsnittlig vanninnhold i umettet sone ikke endres. Selvsagt er dette en forenkling som vi skal utdype nærmere nedenfor. Likevel kan det være interessant å se hvordan vi kan benytte generell informasjon og enkle regnestykker for å få en pekepinn om oppholdstider i jorda.

Hvis alt vannet i umettet sone byttes ut, er gjennomsnittlig oppholdstid gitt ved:

$$(1) \quad T = \theta L / U.$$

Infiltrasjonshastigheten U kan man estimere ved vannbalanseberegninger. Problemet med slike vannbalanseberegninger er at usikkerheten øker desto kortere tid man tar et gjennomsnitt over. Tar man et gjennomsnitt over et lengre tidsrom derimot, minker usikkerheten. Spørsmålet er bare hvor interessant en gjennomsnittlig U er når man skal studere transport av forurensning. For å illustrere hvor misvisende slike gjennomsnittlige U verdier kan være, vil jeg gjøre en enkel vannbalanseberegning for løsmassene på Gardermoen i den perioden det foreligger observasjoner av nedbør og avrenning. Arealet på disse løsmassene er ca. 80 km², og vannbalansen nedenfor blir gjort som gjennomsnitt over dette arealet. Enhetene i dette regnestykket er spesifikk avrenning [volum/tid/areal], som er identisk med flukshastigheten [lengde/tid]. Vannfluksen gjennom umettet sone er til enhver tid lik nedbøren (P) minus det som fordampes (E) på overflaten og det vannet som forbrukes av vegetasjonen (t), såkalt transpirasjon. De to siste leddene slås gjerne sammen til evapotranspirasjon (Et). U kan dermed uttrykkes som:

$$(2) \quad U = P - Et.$$

Nedbøren (P) er relativt enkel å måle, men evapotranspirasjonen (Et) derimot, er langt mer komplisert. Heldigvis kan U også beregnes på en annen måte. Hvis totalavrenningen (R) fra nedbørsområdet A er målt, og samtidig endring i de ulike vannmagasinene (ΔS) i samme område er kjent, kan U alternativt uttrykkes som:

$$(3) \quad U = R - \Delta S.$$

De viktigste magasinleddene (ΔS) på Gardermoen er vannet som kan lagres i umettet sone; i grunnvannsreservoaret, i innsjøer, i biomassen eller andre tekni-

ske installasjoner (grøfter, drensrør, dammer, etc). Problemet med (3) er at ΔS kan være svært vanskelig å måle nøyaktig.

Setter vi (2) og (3) sammen kjenner vi igjen den klassiske vannbalanselikningen:

$$(4) \quad P - Et - R = \Delta S.$$

Foreløpig har vi ikke sagt noe om hvor lang tid vi tar gjennomsnitt over. Hvis vi tar gjennomsnitt over en lang tidsperiode, vil ΔS bli svært liten i forhold til de andre leddene i likningen. Matematisk uttrykt kan vi si at hvis tiden går mot uendelig, går ΔS mot null. Nedbørsmålinger viser at gjennomsnittlig nedbør på Gardermoen er ca. 800 mm/år. Avrenningen som også er målt gjennom en årrekke, gir gjennomsnittlig avrenning på ca. 400 mm/år. Halvparten av nedbøren på Gardermoen går altså tilbake til atmosfæren uten å bidra til grunnvannsdannelse og avrenning.

Denne enkle betraktningen gir altså en gjennomsnittlig infiltrasjonshastighet U på ca. 400 mm/år, eller i overkant av 1 mm/dag. Som en tommelfingerregel kan vi gå ut fra at vanninnholdet i de grove massene på Gardermoen i gjennomsnitt er ca. 10 %, dvs. $\theta = 0,1$. Innenfor flyplassområdet varierer dyp til grunnvannspeilet (L) fra ca. 4 m i sør-vest til ca. 11 m i nord-øst. Setter vi inn disse tallene i (1) får vi gjennomsnittlige oppholdstider i umettet sone på ca. 1 år i sør-vest og ca. 3 år i nord-øst. Sammenholder vi dette med halveringstiden til avisningskjemikalier som varierer fra 7 til 50 dager (French og Bakken med fl., 2002), blir avisningskjemikalier brutt ned på vei til grunnvannet. I dette regnestykket har vi vel og merke brukt gjennomsnittsverdier for infiltrasjonshastigheten U . Spørsmålet er hvor store infiltrasjonshastighetene er under overflatedammene når de forsvinner om våren. Tuttle (2001) beregnet volumet på dammene og sammenholdt dette med hvor raskt dammene infiltrerte. Han kom fram til at U kan variere fra 80 til 200 mm/dag under overflatedammene. Bruker vi disse infiltrasjonshastighetene i (1) får vi oppholdstider mellom 2 og 5 dager i sør-vestre deler av flyplassområdet, og mellom 6 og 14 dager i nord-vest. Med disse oppholdstidene øker sjansene for at avisningskjemikalier blir transportert til grunnvannspeilet. Dette viser først og fremst hvor misvisende gjennomsnittsberegninger kan være når man skal beregne oppholdstider i umettet sone. Dersom forurensningen transporteres i løpet av noen få dager med store infiltrasjonshastigheter, er det uinteressant å beregne hva som skjer i gjennomsnitt resten av året.

Sporstoff-forsøk på Gardermoen

For å verifisere oppholdstider må det gjøres sporstoff-forsøk. I medier som er tilgjengelig for direkte

observasjoner som i luft eller innsjøer, er dette i prinsippet enkelt. Man starter med et sporstoff med kjent konsentrasjon (c_0) på et sted (x_0) ved et bestemt tidspunkt (t_0), og observerer konsentrasjon (c) på steder (x_i) dit sporstoffet er transportert etter en viss tid (t_i). Resultatet kan man fremstille i gjennombruddskurver som er funksjoner som varierer i tid og rom:

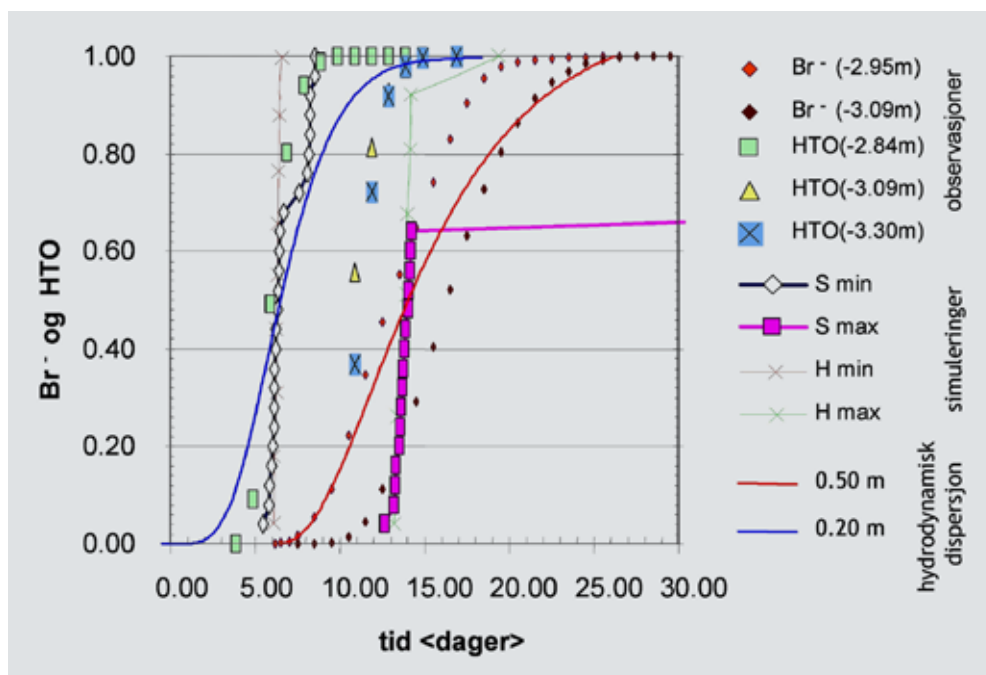
$$(5) \quad c(t,x) = c(t_i - t_0, x_i - x_0) - c_0$$

Under bakken er slike forsøk mer ressurskrevende først og fremst fordi strukturene i jordlaget gjør transportveiene vanskelig å forutsi. Det må derfor installeres en rekke prøvepunkter i undergrunnen for å fange opp så mye som mulig av sporstoffet. Samtidig må man unngå at selve prøvetakingen påvirker strømningsbildet. Dette kan man gjøre ved å grave såkalte lysimetergroper. Lysimetergroperne gjør det mulig å sette inn horisontale prøvetakere. Dermed unngår man at vannet transporteres vertikalt langs prøvetakerne. Vest for rullebanen på Gardermoen er det et forsøksfelt hvor det er anlagt to slike lysimetergroper. En annen praktisk utfordring i umettet sone er kapillærkreftene. Disse kreftene gjør at vannet holdes tilbake. For å få registrert konsentrasjonen av sporstoffet, må det derfor påføres et trykk som er lavere enn en atmosfære. Sporstoffet må med andre ord suges ut. Som vist ovenfor varierer transporthastigheten med infiltrasjonshastigheten. Selv om det er interessant å følge sporstoffets naturlige strømningshastighet, slik det for eksempel er under overflatedammer, blir usikkerheten i disse hastighetene for store. I praksis må man derfor lage et infiltrasjonsanlegg hvor innstrømningshastighetene kan

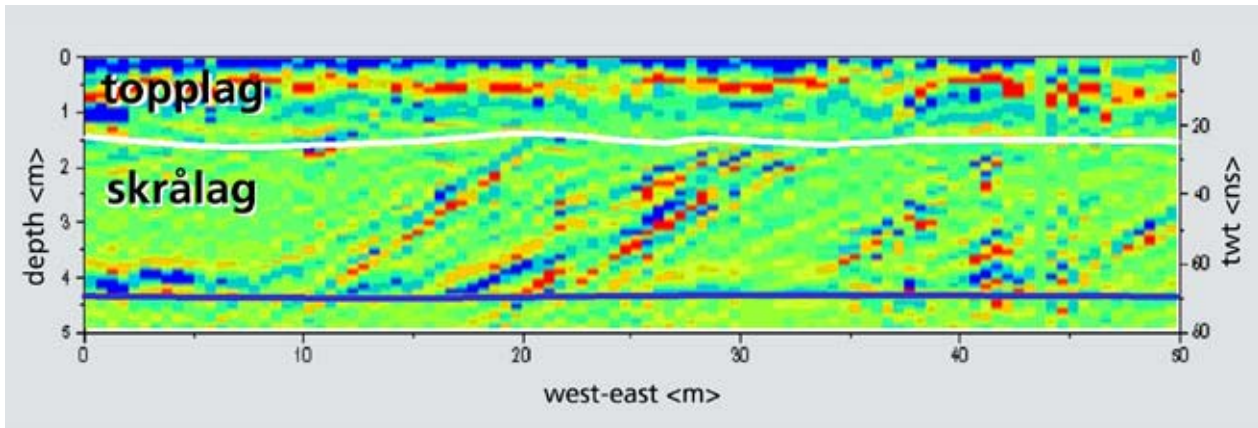
bestemmes. Den største utfordringen er den naturlige variasjonen i jordas hydrauliske egenskaper. Det er gjennomført flere sporstoff-forsøk på Moreppen, både med konservative sporstoff, med avisningskjemikalier og hydrokarboner. Et forsøk med kontrollert infiltrasjonshastighet ble gjennomført av Søvik og Alfnes med fl. (2002). De fuktet først opp feltet med en konstant irrigasjon på 30 mm pr. dag i 7 dager. Deretter ble bromid (Br^-) tilsatt i 3 m lange dryppslanger over tre dager i pulser på 25 liter vann med bromidkonsentrasjon på 1000 mg/liter. Disse pulsene ble repetert hver annen time. Da sporstofftilsetningen begynte ble bakgrunnsirrigasjonen økt til 48 mm/dag. Trekker vi fra evapotranspirasjonen tilsvarer dette en infiltrasjonshastighet på omlag 42 mm/dag. Tredje dag ble en puls på 18,5 MBq/ml i 25 liter vann med tritert vann (HTO) tilsatt. Dette tilsvarer en dose på 44400dpm/ml. I figur 1 er de akkumulerte gjennombruddskurvene for $[Br^-]$ og HTO plottet relativt til den totale mengden sporstoff som ble ekstrahert fra hvert observasjonspunkt. Resultater fra numeriske simuleringer er vist i samme figur. Før de numeriske simuleringene blir forklart nærmere, er det nødvendig å si litt om løsmassene på Gardermoen.

Løsmassene på Gardermoen er et breelv-delta

Løsmassene på Gardermoen er et breelv-delta som ble avsatt da den skandinaviske innlandsisen smeltet. Dette skjedde for ca. 9 500 år siden. Tuttle (1997) målte tverrsnittet av tilførselskanalene og sammenholdt



Figur 1. Resultater fra sporstoff-forsøk i umettet sone (Søvik og Alfnes m.fl., 2002), vist sammen med uavhengige numeriske simuleringer. Observasjoner av bromid (Br^-) og tritert vann (HTO) er plottet som relative akkumulerte konsentrasjoner. S indikerer simuleringer med siltlag i skrålagerne, mens H tilsvarer simuleringer med homogen sand. Min og max er h.h.v. min. og maks. resultater av simuleringene. Simuleringer med hydrodynamisk dispersjon er også vist. Simuleringene reproducerer ikke detaljene i sporstoff-forsøket, men de omslutter tilnærmet alle observasjonene.

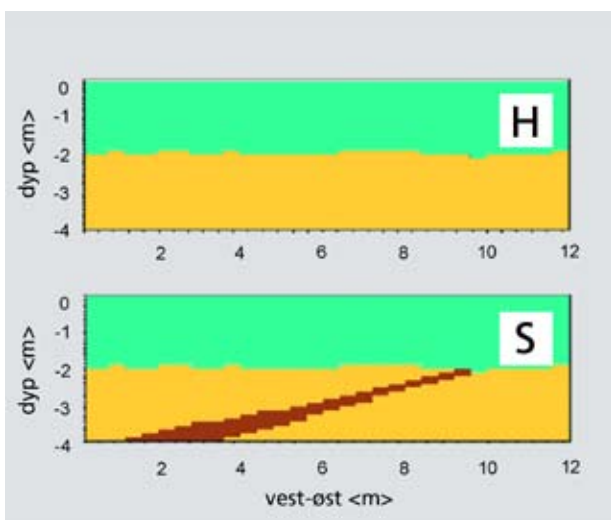


Figur 2. Georadarprofil fra Moreppen på Gardermoen. Profilet viser grensen mellom deltaskrålag og deltaskrålag. Grunnvannspeilet er indikert med blå linje. Det glasi-fluviale topplaget er heterogent, mens skrålaget består av lag som faller mot vest. Mesteparten av skrålagene er fin sand (grønnfarget). De røde og blå refleksorene er siltige lag med høyt fuktighetsinnhold.

dette med empiriske beregninger av vannføring og sedimenttransport og fant ut at løsmassene på Gardermoen ble avsatt i en periode på ca. 70 år. Da vekten av innlandsisen var borte, steg hele den skandinaviske jordskorpa. På Gardermoen hevet landet seg ca. 200 meter. Det betyr at løsmassene på Gardermoen ble avsatt i en fjord som p.g.a de store vannmengdene hadde brakvannskaraktter. Den store vannføringen i smeltevannet avsatte grove masser nærmest breporten. Breelvene mistet bevegelsesenergien da de nådde fjorden, og de finkornede massene ble avsatt, først i skrålag som bygget seg utover i fjorden, mens siltige og leirige masser ble avsatt på fjordbunnen. Dette forklarer både de grove massene nærmest de gamle breportene og de fine massene nedenfor Gardermo-plataet. Moreppen er lokalisert nærmest fjordkanten på deltaet og det grove topplaget er bare ca. 2 meter tykt. Skrålagene som bygde seg ut vestover, går gradvis over i de fine bunnla-

gene under grunnvannspeilet. Grunnvannspeilet varierer fra 4 – 5 m under bakken avhengig av årstiden og nedbørmengden. Skrålagene faller med ca. 15° mot vest. Disse strukturene ser vi tydelig på georadarprofilet som er vist i figur 2.

I figur 2 legger vi også merke til at enkelte steder i skrå-lagene er det tydelige refleksorer. Da den dypeste lysimetergropen ble bygd, ble disse refleksorene identifisert som siltige lag. For det meste består imidlertid skrå-lagene av fin sand med litt varierende kornstørrelse. For å simulere oppholdstider på Gardermoen slik de er observert gjennom sporstoff-forsøkene på Moreppen, må vi bygge de sedimentære strukturene inn i en numerisk modell på en idealisert måte. Georadarprofilene viser at vannet enten kan strømme ned til grunnvannet i områder med mer eller mindre homogen sand, eller i områder med tette finkornede lag. Dette ga opphav til de to alternative modeller slik det er vist i figur 3. Nedenfor skal vi se at de finkornede lagene har en litt overraskende effekt på oppholdstidene. I stedet for å bremse opp strømningshastighetene fører disse lagene faktisk til at vannet strømmer raskere.



Figur 3. Basert på georadarprofilene (figur 2) er det konstruert to idealiserte sedimentologiske modeller, H med homogen sand i deltaskrålagene, og S med et siltige lag som faller mot vest.

Simulering av vannets oppholdstid i umettet sone

Den matematiske modellen for strømning av vann i porøse medier ble foreslått av Darcy allerede i 1856. Darcy's lov gjelder imidlertid bare for mettet strøm. Richards (1931) videreutviklet Darcy's likning til også å gjelde umettet strøm. Den viktigste forutsetningen for Richards likning er at friksjonen mellom gassfasen og væskefasen kan neglisjeres. Godtar vi denne forutsetningen, kan vannets bevegelse i umettet sone uttrykkes som:

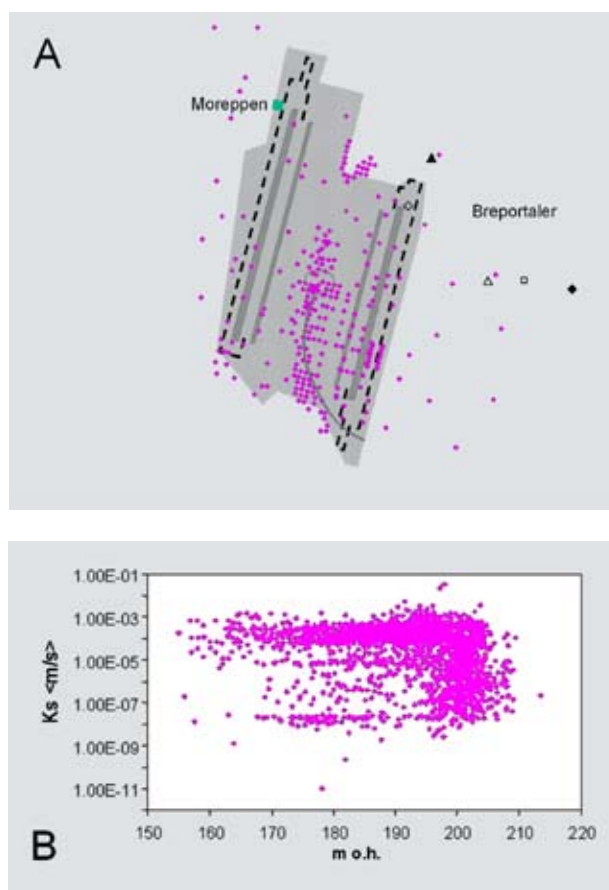
$$(6) \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla h) + U(t),$$

hvor θ er vanninnholdet, t er tiden, ∇ er gradienten (eller

del operatoren), K er hydraulisk ledningsevne, h er det hydrauliske potensialet som bestemmes av tyngdekraften og trykket i umettet sone, mens $U(t)$ er infiltrasjonshastigheten som kan variere med tiden t . For å løse (5) må grensebetingelsene være kjent. I dette tilfellet er øvre grense gitt ved $U(t)$. Ved grunnvannspeilet er trykket 1 atmosfære. Initialbetingelsen finner vi ved å løse (5) når $\partial\theta/\partial t = 0$, d.v.s. steady-state situasjonen. I dette forsøket tilsvarende dette fuktighetsforholdene ved bakgrunnsinfiltrasjon. Likning (5) kan løses med standard numeriske metoder. De mest vanlige er basert på endelige differanser eller endelige elementer. I dette prosjektet ble TOUGH2 benyttet som er basert på integrerte endelige differanser (Pruess, 1991).

Både K og h varierer som en funksjon av vanninnholdet. Det betyr at begge disse funksjonene må være kjent for å løse (5). Disse funksjonene kan enten måles i laboratorieforsøk, med såkalte pF-pK målinger (Pedersen, 1994), eller estimeres ved inversmodelleringer (Kitterød og Finsterle, 2004). På grunn av naturlige heterogeniteter i jordmassene kan ikke parametrene i (5) beskrives som konstanter, men som sannsynlighetstetthetsfunksjoner. I simuleringene som er vist her, ble kornfordelingsanalyser benyttet for å estimere parametre i (5). Fra Gustavsons (1983) likninger ble porøsitet og mettet hydraulisk ledningsevne (eller permeabilitet) beregnet fra i alt 1755 kornfordelingsanalyser (figur 4). Det var ingen direkte observasjoner av anisotropi i permeabiliteten i vårt data-materiale. Denne usikkerheten ble det imidlertid tatt hensyn til ved å variere forholdet mellom horisontal (K_h) og vertikal (K_v) permeabilitet slik det framgår av tabell 1. Fra Jonassons (1991) arbeider ble parametre i pF-pK funksjonene beregnet. Kvantiler for samtlige parametreer vist i tabell 1.

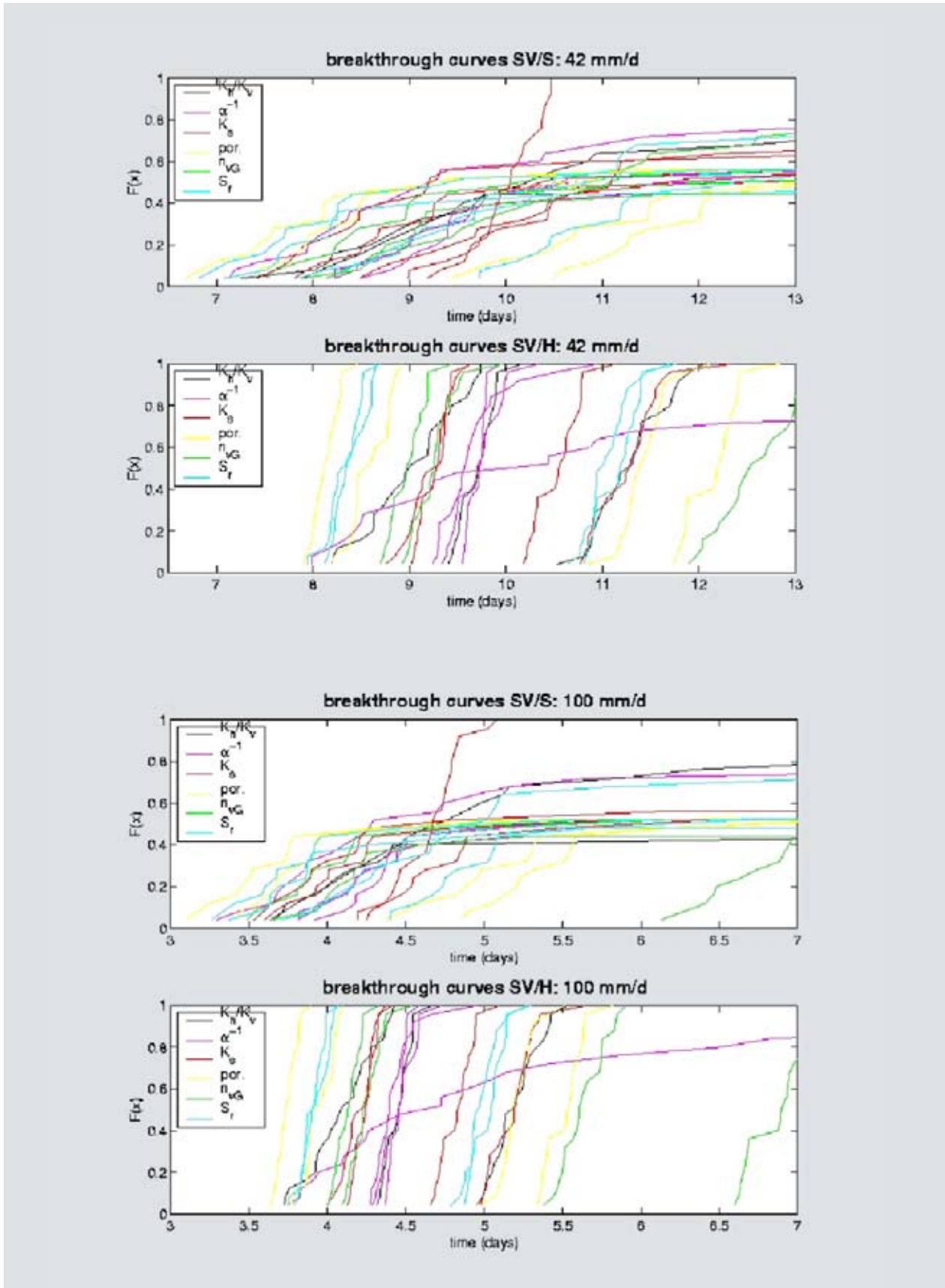
Simuleringer ble først gjennomført med de mest sannsynlige parametrene. For å indikere effekten



Figur 4. (A) Kornfordelingsprøver fordelt over flyplassområdet ble benyttet for å estimere (B) mettet hydraulisk ledningsevne K_s , ved hjelp av Gustavsons (1983) likninger. K_s klusterer i tre overlappende grupper: i) topplagene rundt 200 m o.h.; ii) sandige skrålag med K_s rundt 10^{-4} m/s; iii) siltige lag enten fra skrålag eller bunnlag med K_s mindre enn 10^{-6} m/s.

Mest sannsynlig	por.	Kx m2	Ky m2	Kz m2	Slr	vG_n	1/a [Pa]
topplag sand	0.28	9.26E-10	9.26E-10	9.26E-11	0.23	2.00	300
skrålag sand	0.28	4.77E-10	4.77E-10	4.77E-11	0.20	3.10	1000
skrålag silt	0.20	4.02E-15	4.02E-15	1.08E-15	0.33	2.10	2000
Min (.025 kvantil)	por.	Kx m2	Ky m2	Kz m2	Slr	vG_n	1/a [Pa]
topplag sand	0.20	2.57E-10	2.75E-10	2.75E-11	0.08	1.1	100
skrålag sand	0.20	2.25E-10	2.25E-10	2.25E-11	0.04	1.5	500
skrålag silt	0.10	7.52E-16	7.52E-16	2.06E-16	0.25	1.5	1000
Max (.975 kvantil)	por.	Kx m2	Ky m2	Kz m2	Slr	vG_n	1/a [Pa]
topplag sand	0.40	2.13E-09	2.13E-09	2.13E-10	0.39	2.5	500
skrålag sand	0.40	2.00E-09	2.00E-09	2.00E-10	0.36	4.6	2500
skrålag silt	0.40	1.27E-14	1.27E-14	3.37E-13	0.35	3.6	3000

Tabell 1. Hydrauliske parametreer benyttet i TOUGH2 for beregning av strømningshastigheter i umettet sone.



Figur 5. Gjennombruddskurver for sørvestre del av Gardermoen med grunnvannspeil på ca. 4 m under bakken. De to øverste figurene er med infiltrasjonshastighet på 42 mm/dag for h.h.v. silt (S) i skrålagene og homogen sand (H) i skrålagene. De to nederste plottene er tilsvarende for silt og homogen sand, men med infiltrasjonshastigheter på 100 mm/dag.

av usikkerheten, ble en for en av parametrene først byttet ut med minimumsverdi (0,025 kvantil) og dernest med maksimumsverdi (0,975 kvantil) mens alle de andre parametrene fortsatt var satt til mest sannsynlig verdi. Dette ble gjort for alle sedimentologiske enheter i modellen. Simuleringer ble gjort for lave infiltrasjonshastigheter (5, 10 og 15 mm/dag) med konstant infiltrasjon, mens høye infiltrasjonshastigheter (42, 100 og 250 mm/dag) ble gjennomført for en tidsperiode på 16 dager. Gjennombruddskurver for 42 og 100 mm/dag er vist i figur 5.

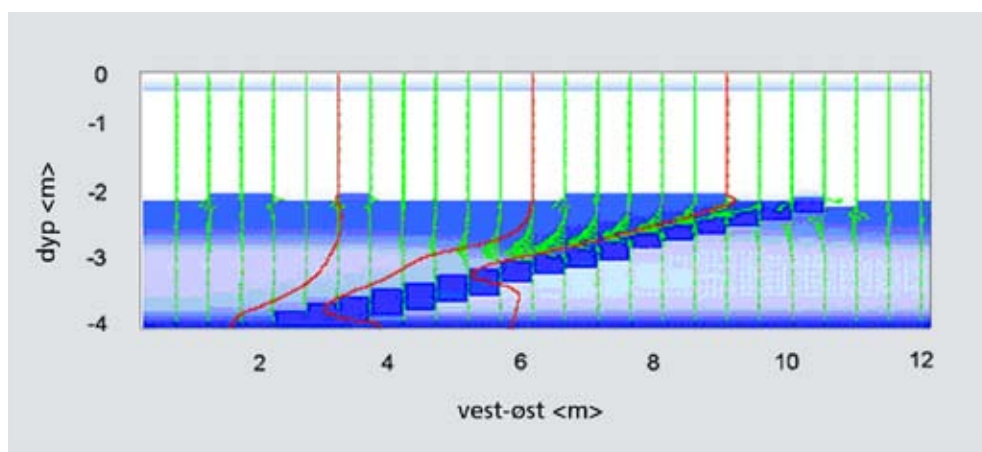
Diskusjon

Forurensning av drikkevann er et betydelig helseproblem mange steder i verden. Det er anslått at omlag 5 millioner mennesker dør hvert år på grunn av sykdom som er relatert til forurenset vann. Grunnvann er normalt en sikker drikkevannskilde, men også dette kan bli forurenset. Det er derfor viktig å forstå hvordan vann transporteres fra overflaten ned i grunnvannsreservoarene. I vårt klima skjer mye av infiltrasjonen i forbindelse med snøsmelting, og oppsamling av vann på overflaten kan gi meget høye infiltrasjonshastigheter. Strukturer i undergrunnen forårsaket av frost, vegetasjon eller naturlig heterogenitet kan gi rask transport, noe som øker risikoen for at forurensning kan nå grunnvannet. I dette arbeidet estimerte vi parametre fra kornfordelingsanalyser. Simuleringene ble validert ved å sammenligne simuleringene med et uavhengig sporstoff-forsøk. De observerte oppholdstidene ble altså ikke benyttet for å kalibrere simuleringene. I grove trekk reproducerer simuleringene sporstoff-forsøket. Dermed kan vi generalisere oppholdstidene slik at de også er gyldige for andre infiltrasjonshastigheter. Med infiltrasjonsrate på 42 mm/dag viser simuleringene gjennombrudd av konservativt sporstoff etter 7 til 10 dager til grunnvannspeilet på ca. 4 m under bakken dersom det er et lavpermeabelt lag til stede i skrålagene (figur 5). Tilsvarende gjennombruddstid

er 8 til 12 dager for homogen sand i skrålagene. Øker infiltrasjonsraten til 100 mm/dag er tilsvarende gjennombruddstid omlag 3 til 5 dager. Figur 6 illustrerer hvordan strømningshastighetene øker over de lavpermeable siltlagene.

Da myndighetene bestemte at Oslos nye hovedflyplass skulle lokaliseres på Gardermoen, ble det samtidig forutsatt at grunnvannet skulle beskyttes best mulig. Grunnvannskvaliteten overvåkes derfor kontinuerlig av Oslo hovedflyplass. Den alvorligste utfordringen er å hindre avisningskjemikalier i å nå grunnvannet. Fordi det benyttes organiske avisningskjemikalier med rask nedbrytningshastighet, er det ikke påvist avisningskjemikalier i grunnvannet av betydning. Sammenholder vi halveringstiden på avisningskjemikalierne (7 til 50 dager, French og Bakken med fl., 2002), med de infiltrasjonshastighetene vi kan forvente i forbindelse med snøsmeltingen, vil det imidlertid være en risiko for kontaminasjon av grunnvannet på Gardermoen i forbindelse med snøsmeltingen.

Simuleringene av oppholdstider som er vist ovenfor, er grove forenklinger av virkeligheten. De er basert på gjennomsnittsverdier av de hydrauliske parametrene i hver sedimentologisk enhet. Det betyr at geologien er gjort mer homogen enn den er i virkeligheten. Den forenklede modellen viser likevel at tette lag mest sannsynlig øker transporthastigheten. Årsaken er at over de tette lagene er det lag med mer permeabel sand som fuktes opp når infiltrasjonshastigheten blir større enn infiltrasjonskapasiteten i de fine lagene. Fra kornfordelingsanalyser ser vi at sandlagene i skrålagene kan ha hydraulisk ledningsevne på over 10^{-4} m/s, eller omlag 10 m/dag. Med en hydraulisk gradient på 5% og en effektiv porøsitet på 25%, gir dette transporthastigheter på omlag 2 m/dag. Disse hastighetene er konsistente med simuleringene som er vist og sammenfaller godt med resultatene fra sporstoff-forsøk gjennomført av Søvik og Alfnes med fl. (2002).



Figur 6. Simulering av strømningshastigheter i umettet sone. Det lavpermeable laget bøyer av strømningslinjene i skrålagene samtidig som hastighetene øker betraktelig.

Referanser

- Bakken, L., Frostegård, Å., Gomes, N.C., Mørkved, P.T., Søvik, A.K. og Swensen, B., 2001, Jordprofilen - et effektivt biologisk renseverk side 41 -53, i Kitterød, N-O. (red.) Spredning av forurensning i grunnen, Universitetet i Oslo, Institutt for geofag, ISSN 0332-6888
- Flury, M., Flühler, H., 1994, Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study, *Water Res. Res.* 30 (7) 1945-1954
- French, H.K., Bakken, L., and van der Zee, S.E.A.T.M., 2002, Natural attenuation of airport pollutants in the unsaturated zone – studies at Gardemoen, Norway, In: Howard, K.W.F., and Israfilov, R.G. (ed), Current problems of hydrogeology in urban areas, urban agglomerates and industrial centres, ISBN 1-4020-0601-2
- Grip, H., Rodhe, A., 1988, Vattnets väg från regn till bäck, ISBN 91 7382 6359, Karlshamn
- Gustavson, G., 1983, Brunnsystem för värmelagring och värmeutvinning i akvifere, R39:1983, ISBN 91-540-3912-6, Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm, Liber Trykk Stockholm 1983
- Hansson, K., Šimůnek, J., Mizoguchi, M., Lars-Christer Lundin, L.-C., and Martinus Th. van Genuchten, M., 2004, Water Flow and Heat Transport in Frozen Soil: Numerical Solution and Freeze–Thaw Applications, *Vadose Zone Journal* 3:693–704
- Jonasson, S. A., 1991, Estimation of soil water retention for natural sediments from grains size distribution and bulk density, ISBN 91-7032-431-X, Chalmers Tekniska Högskola och Göteborgs universitet, Geologiska Institutionen, Publ. A 62, Göteborg 1991
- Kitterød, N.-O., Finsterle, S., 2004, Simulating unsaturated flow fields based on saturation measurements, *J. of Hydraul. Res.* 42, 121–129
- Kung, K.-J.S., 1990a, Preferential flow in a sandy vadose zone: 1. Field observation, *Geoderma* 46: 51-58
- Kung, K.-J.S., 1990b, Preferential flow in a sandy vadose zone: 2. Mechanism and implications, *Geoderma* 46: 59-71
- Kung, K.-J.S., 1993, Soil processes and chemical transport, Laboratory observations of funnel flow mechanism and its influence of solute transport, *J. Environ. Qual.*, 22: 91-102
- Pedersen, T.S., 1994. Væsketransport i umettet sone. Cand. Scient oppgave, Universitetet i Oslo, Inst. for geologi.
- Pruess, K., 1991, TOUGH2 – a General-purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow, Report LBL-29400. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
- Richards, L.A., 1931, Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, 1:318-333
- Schenk E., 1968, Fundamental process of freezing and thawing in relation to the development of permafrost. In: "Alpine and Arctic Environment, Eds. E Wright and W. Osborne, p. 229-236
- Stadler, D., Stähli, M., Aeby, P., and Flühler H., 2000, Dye tracing and image analysis for quantifying water infiltration into frozen soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:505–516
- Stoeckeler, J.H., and Weitzman, S., 1960. Infiltration rates in frozen soils in northern Minnesota. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*24(2): 137–139
- Søvik, A.K., Alfnes, E., Breedveld, G.D., French, H.K., Pedersen, T.S., Aagaard, P., 2002, Transport and degradation of Toluene and o-Xylene in an unsaturated soil with dipping sedimentary structures, *Journ. Environ. Quality*, 31 (6) 1809-1823
- Tuttle, K.J., 1997, Sedimentological and hydrological characterization of a raised ice-contact delatocomplex at Gardemoen, southeastern Norway, PhD thesis University of Oslo 11/1997
- Tuttle, K. J., 2001, Residence time in the vadose zone during episodes of high infiltration rates. Subproject 3.1: "Hydrodynamikk og urban hydrologi -infiltrasjonsprosesser i grunnen - oppholdstid i umettet sone, OSL"
- Walter, M.T., Kim, J.-S., Steenhuis, T.S., Parlange, J.-Y., Heiling, A., Braddock, R.D., Selker, J.S., Bolt, J., 2000, Funneled flow mechanisms in a sloping layered soil: Laboratory investigation, *Water Res. Res.*, 36 (4) 841-849
- Zheng, X., Van Liew, M. W., and Flerchinger, G. N., 2001a, Experimental study of infiltration into a bean stubble field during seasonal freeze-thaw period, *Soil Science Vol.* 166, No. 1
- Zheng, X., Guisheng, F., Liming, X., 2001b, Infiltration and redistribution of soil water during seasonal freezing and thawing periods, In proceedings to XXIX IAHR congress, Sept. 16-21, 2001. Beijing, China.

Freezing and thawing effects on aggregate stability

Effekter av frysing og tining på aggregatstabilitet

Sigrun H. Kværnø, Bioforsk Jord og Miljø, Ås (Norwegian Institute for Agricultural and Environmental Research, Soil and Environment Division) (sigrun.kvaerno@bioforsk.no)

Summary

The winter season is an important period for runoff and erosion in Norway, and consequently for transport potential and pathways for particle bound contaminants like phosphorus, pesticides and metals. Aggregate stability is one indicator of erosion risk. Results of a laboratory experiment where freeze-thaw effects on aggregate stability was investigated is presented. Aggregate stability was measured on three different soils sampled from two erosion prone areas in South-east Norway. The samples were subjected to none, 1, 3 and 6 cycles of freezing and thawing, and aggregate stability was measured using two methods: rainfall simulator and wet-sieving (representing runoff).

The main results were that the stability of the silt soil was reduced by 50 % after 6 cycles, whilst the reduction on levelled and non-levelled clay soil, which had similar stabilities, was 25 %. Also, the impact of rainfall seemed to be more detrimental than runoff, particularly for soil with low stability: silt soil, and soil that had been frozen several times. A future climate change, with higher temperatures and increased precipitation may result in more unstable winters and more frequent alterations between freezing and thawing, snow and rain. Combined with more precipitation as rainfall during the winter period runoff and erosion will probably increase, possibly resulting in heavier loads of particle bound contaminants to surface waters. It is therefore important to take freezing and thawing effects on aggregate stability into account in erosion risk assessment and planning of measures to reduce erosion.

Sammendrag

Vintersesongen er en viktig periode for avrenning og erosjon i Norge, og dermed også for transportpotensiale og transportveier for partikkelbundne forurensninger som fosfor, pesticider og metaller. Aggregatstabilitet er en indikator for erosjonsrisiko. Her presenterer vi

resultater av et laboratorieeksperiment der effekten av frysing og tining på aggregatstabilitet ble undersøkt. Aggregatstabilitet ble målt på tre ulike jordarter fra to erosjonsutsatte områder i sørøst-Norge. Jordprøvene ble frosset og tint 0, 1, 3 og 6 ganger, og aggregatstabilitet ble målt ved hjelp av to metoder: regnsimulering og våtsikting (representerer overflateavrenning). Hovedresultatet var at (erosjons)stabiliteten til siltjorda ble redusert med hele 50 % etter 6 fryse-tine-syklus, mens reduksjonen på planert og ikke-planert leirjord, som hadde lik stabilitet i utgangspunktet, var på 25 %. Regn så dessuten ut til å være mer ødeleggende enn overflateavrenning, særlig på jord med lav stabilitet: silt, og jord som var frosset og tint flere ganger. En framtidig klimaendring med høyere temperaturer og økt nedbør kan føre til mer ustabile vintre og hyppigere vekslinger mellom frysing og tining, snø og regn. Kombinert med at mer av nedbøren kommer som regn i vintersesongen, kan man forvente økt avrenning og erosjon og økt transport av partikkelbundne forurensninger til overflatevann. Det er derfor viktig å ta hensyn til hvordan frysing og tining påvirker aggregatstabilitet i vurderinger av erosjonsrisiko og planlegging av tiltak mot erosjon.

INTRODUCTION

Soil erosion in the winter season

Freezing and thawing influence the transport potential and pathways for contaminants by altering the soil physical properties. Firstly, soil frost delays or impedes infiltration of rain and meltwater, reducing the transport rate of dissolved contaminants. But at the same time, particle bound contaminants like e.g. phosphorus, pesticides and metals may be mobilised because the reduced infiltration capacity increases surface

runoff and erosion risk. Secondly, freezing water expands and imposes mechanical stresses on the soil, which may cause aggregate breakdown and facilitate particle detachment and transport during runoff. The winter season, including the spring thaw, has shown to be an important period for runoff and erosion/soil loss in Norway (Øygarden 2000). Figures from seven agriculture dominated catchments surveyed in the Environmental Agricultural Monitoring Programme in Norway (Skjevdal and Vandsemb, 2005) show that about 50-80 % of the yearly soil losses occur in the period from November to April (figure 1).

Aggregate stability – an indicator of erosion risk

Aggregate stability, defined as the soil's ability to retain its structural arrangement and void space when exposed to mechanical stresses, is one indicator of erosion risk. Usually it has been shown that an increased number of freeze-thaw cycles tends to decrease the stability (e.g. Bullock et al. 1988, Edwards 1991), but contradictory results also exist (Perfect et al. 1990). The initial moisture conditions of the soil at freezing is also a key factor in the freeze-thaw process. In general, aggregate stability has shown to be inversely proportional to soil water content at the time of freezing (Perfect et al. 1990). Different soils also respond differently to freezing and thawing due to e.g. differences in particle size

distribution, structure, organic matter content, chemical properties and root development (Lehrsch et al. 1991). Freeze-thaw effects on aggregate stability are poorly documented for Norwegian conditions. Norwegian studies concerning erosion in the winter season have primarily focused on quantifying particle loss from plots (Lundekvam and Skøien 1998) and catchments (Øygarden 2000) and on effects of measures like constructed wetlands/sedimentation ponds (Braskerud 2001) and bufferzones (Syversen 2002).

In the NFR-project "Seasonal frozen soils: temporal and spatial variability in hydrological and soil physical properties" (2000-2003) the effect of frost action on soil physical properties was addressed. We present here some results from a study in which the objective was to investigate the effect of variable freeze-thaw cycles and soil moisture conditions on aggregate stability of three soils which are representative of erosion prone areas in Norway. More detailed results are presented in Kværnø and Øygarden (in press).

Laboratory study

Surface soil for determining freezing and thawing effects on aggregate stability was sampled on arable land in two catchments that are representative of some erosion prone agricultural areas in Norway: the Skuterud catchment in Ås and the Vandsemb subcatchment within the Mørdre catchment in Nes (see figure 1). These catchments have relatively unstable winters,

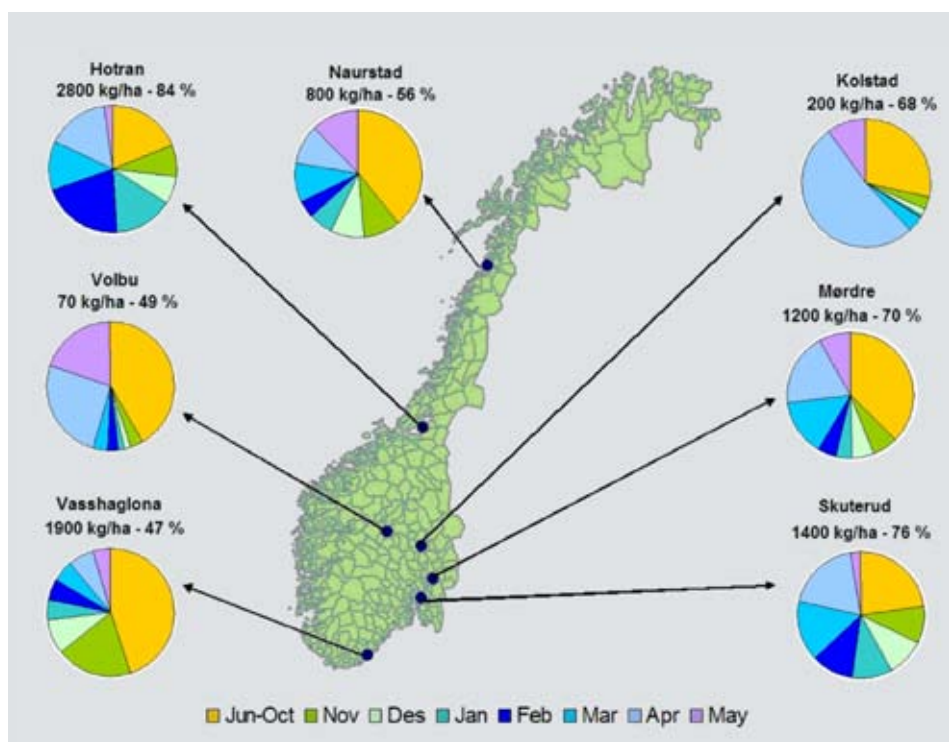


Figure 1. Total yearly soil loss (kg/ha) from JOVA-catchments in Norway, distribution on months (diagrams) and the proportion (%) occurring during the period November to April. For inland catchments (Volbu, Kolstad) the largest soil loss occur during the major snowmelt event in spring, whilst the losses during the rest of the winter are small due to stable snow cover and constant soil frost. For Skuterud, Mørdre, Hotran and Naurstad, located closer to the coast, the soil loss is more evenly distributed on all winter months, since freezing and thawing, snowfall, rain and snowmelt occur repeatedly in the warmer climate. The coastal catchment Vasshaglona, where winters are mild and frost and snow hardly occur, has largest soil losses during the rainy autumn.

with high soil losses distributed quite evenly throughout the winter season.

From Skuterud a clay loam with good structure was sampled, and from Vandsemb a silt soil and an artificially levelled silty clay loam soil were sampled (figure 3). The field moist soil was sieved to separate aggregates in the size range 1-4 mm. The aggregates were packed into cylinders, and the water content was adjusted to three different levels assumed to represent different moisture conditions in autumn, before soil freezes. The soil cores were insulated and covered, and subjected to none, one, three or six freeze-thaw cycles (one cycle consists of one freezing and the thawing period until next freezing), freezing conducted at -15°C for 24 hours, and thawing at 9°C for 48 hours. Aggregate stability was measured using a rainfall simulator representing rainfall and a wet-sieving apparatus representing surface runoff (figure 4). Both methods involved placing aggregates on a sieve (mesh width 0.5 mm), and subjecting them to water. The aggregate



Figure 3. Clay loam from Skuterud (top) and levelled silty clay loam (middle) and silt (bottom) from Vandsemb.



Figure 2. Severely eroded field after a mid-winter snowmelt episode on partially frozen soil



Figure 4. Rainfall simulator (top), where water drops fall from nozzles onto the sieves with aggregates, and wet-sieving apparatus (bottom) where sieves with aggregates are raised and lowered into water-filled containers to simulate runoff.

stability was expressed as the percentage of dry material remaining on the sieve after the stability test relative to the initial amount of dry soil. The methodology showed to give uncertain results regarding effects of initial water content, so these results are not discussed here.

Differences between soils

The experiments showed that silt had lower stability than the clay soils, as could be expected since bondings between silt and fine sand particles are weak compared to clay bondings. The initial aggregate stability (0 freeze-thaw cycles, representing the state of the soil before the first frost period in autumn) was 31% for the silt, indicating that this soil is very susceptible to erosion even before freezing and thawing occurs. The stabilities of the two clay soils were similar (initial stability 80 %), and this was a bit unexpected as one soil was artificially levelled and the other not. Levelled soils often have low organic matter content and poor structure, and are therefore considered less stable than similar non-levelled soils (Lundekvam and Skøien 1998). However, at visual inspection, the structure of the levelled soil clearly differed from that of the non-levelled, with larger, denser and more angular aggregates. When wet, the levelled soil was more smeary. The lack of difference could be attributed to the methodology.

Freezing and thawing effect

The effect of freezing and thawing was significant for all soils, and the tendency was that stability decreased with increasing number of freeze-thaw cycles. Several other studies outside Norway have shown the same (e.g. Bullock et al. 1988, Edwards et al., 1991, Mulla et al. 1992). The relative decrease in stability after 6 freeze-thaw cycles was 21 and 17 % for Clay A and B respectively, and 55 % for Silt, indicating that the effect of freezing is more severe on the Silt. The aggregate stability of the three soils at different numbers of freeze-thaw cycles is shown in figure 5.

Under natural conditions the number of freeze-thaw cycles can potentially be much higher than in our experiment, especially if diurnal temperature fluctuations are taken into account. The yearly mean number of freeze-thaw cycles (based on daily air temperatures) was 15 in Ås and Nes in the period 1994 – 2002, with an average duration of 6-9 days for frost periods and 4-5 days for thaw periods (Eggstad 2003). Diurnal freeze-thaw cycles were more frequent: The number of days with minimum temperatures less than -2 °C and maximum higher than +2 °C is 48 for Ås and 37 for Nes. The number of cycles in surface soil will however

be lower than this due to insulating plant residues and snow. Observations of measured soil temperature at a another site in Ås shows that the number of freeze-thaw cycles at 2 cm depth varied between 2 and 8. The effect of snow cover as a modifying factor for freeze-thaw cycles in soil is illustrated in figure 7.

Rainfall versus runoff

The wet-sieving apparatus resulted in less aggregate breakdown than the rainfall simulator. The difference between stabilities measured by wet-sieving and rainfall simulator was 54 % for Silt and 25 % for the

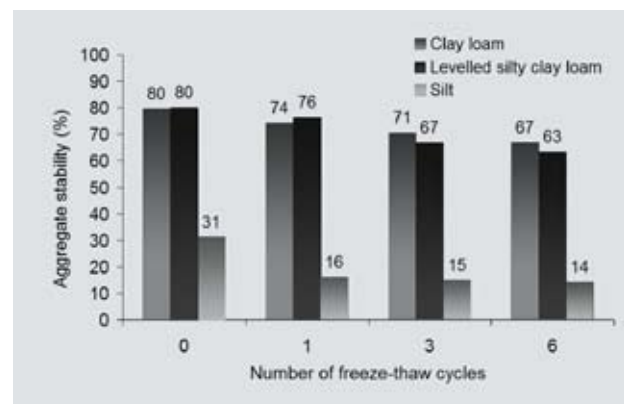


Figure 5. Aggregate stability decreases with increasing number of freeze-thaw cycles, and the effect is more severe for silt soil than for the two clay soils.

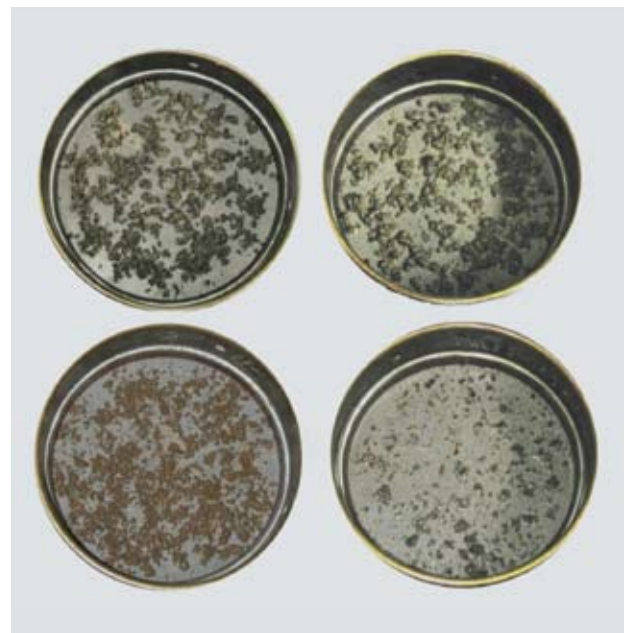


Figure 6. Clay (top) and silt (bottom) aggregates on sieve, before (left) and after (right) rainfall simulator test. Little soil has been washed out of the sieve containing clay aggregates, whilst little soil remains on sieve containing silt after rainfall.

levelled clay soil. Rainfall impact also seemed to be more detrimental than wet-sieving on soil that has been frozen several times.

Climate change – more unstable winters and higher soil loss?

The most erosion prone areas in Norway are usually located below the marine limit in coastal climates. This is often due to a combination of soils with low permeability and/or stability (clay and silt soils respectively), high precipitation, unstable winter weather and cropping systems where the soil is tilled and left bare during winter. Climate research show that future climate change is expected to lead to higher temperatures and increased precipitation in many parts of Norway, particularly in the winter season (Hanssen-Bauer et al., 2001). The result may be more unstable winters and more frequent alterations between freezing and thawing, snow and rain. Combined with more precipitation as rainfall during the winter period both runoff and erosion will probably increase in many areas, including the two catchments in our study, possibly resulting in heavier loads of particulate bound contaminants to surface waters.

Concluding remarks

Some erosion prone areas in Norway have unstable winters with repeated freezing and thawing, and our results show that frequent alteration between freezing and thawing decreases aggregate stability and thereby increases the erosion risk. It is therefore important to take freezing and thawing effects on aggregate stability into account in erosion risk assessment and planning of measures to reduce erosion. The results will be helpful for improving predictions of contaminant fate and transport, as most of the existing hydrological and soil erosion prediction models do not satisfactorily describe soil processes occurring in partially frozen soils under Nordic winter conditions.

The study presented in this paper focused on arable soils with conventional agricultural management, where plant nutrients and pesticides pose a threat to water quality. It would be useful to conduct similar experiments on soils where other organic and inorganic contaminants are of concern, e.g. on soils where sewage sludge and compost have been applied, and soils in road cuttings and on construction sites. Recently Bioforsk Jord og Miljø has started a Strategic Institute Programme on recycling of organic waste, and one of the topics is the use of waste products as amendments on soils (on arable land and urban green areas) with poor structure and high erosion risk. Further studies of freeze-thaw processes will be included here.

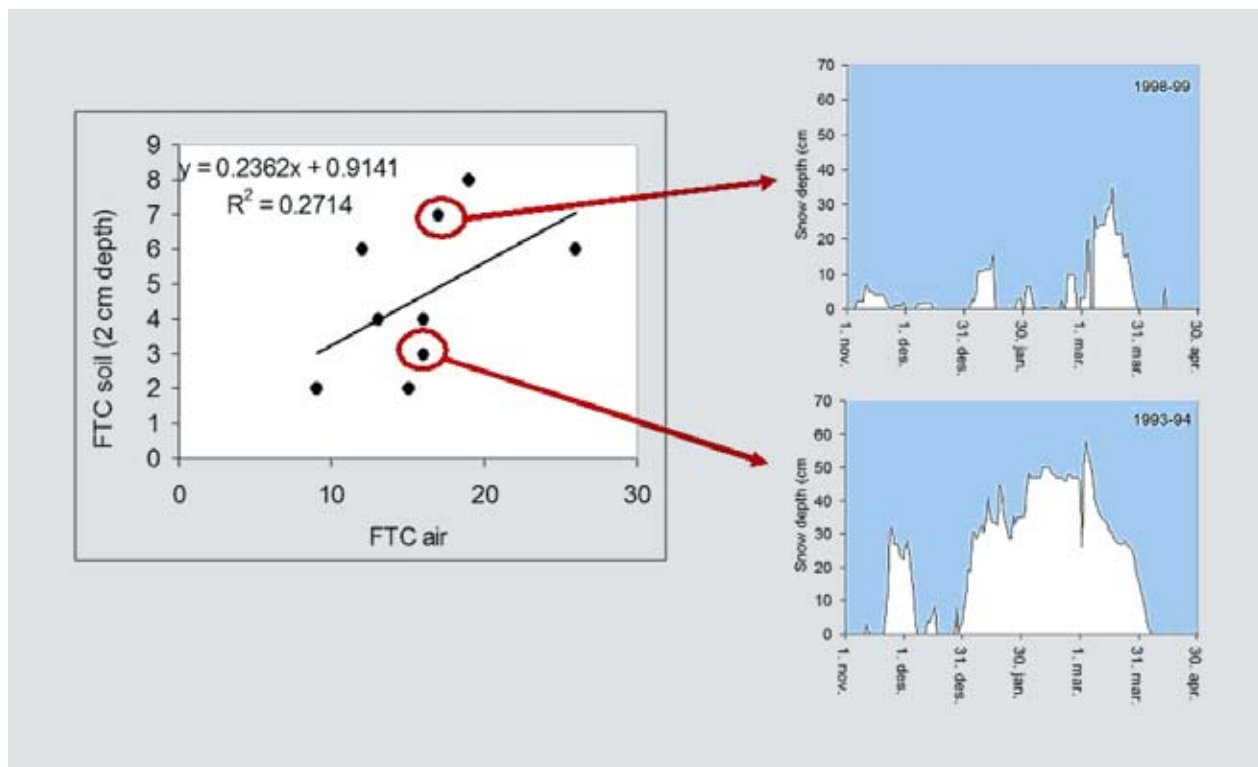


Figure 7. Snow cover modifies freeze-thaw cycling in soil. To the left the relationship between number of freeze-thaw cycles in air and soil is shown. The encircled points have almost the same air FTC, but different soil FTC. The corresponding snow cover to the right explains the difference.

References

Bullock, M.S., Kemper, W.D., Nelson, S.D., 1988. Soil cohesion as affected by freezing, water content, time and tillage. *Soil Science Society of America Journal* 52, 770-776.

Braskerud, B. 2001. Sedimentation in small constructed wetlands. Retention of particles, phosphorus and nitrogen in streams from arable watersheds. Agricultural University of Norway, Ås. Doctor Scientiarum Thesis 2001: 10.

Edwards, L.M. 1991. The effect of alternate freezing and thawing on aggregate stability and aggregate size distribution of some Prince-Edward-Island soils. *Journal of Soil Science* 42, 193-204.

Eggestad, H.O., 2003. Værkarakteristika for JOVA-felter. Jordforsk-rapport 45/03. 25 s. (in Norwegian).

Hanssen-Bauer, I., O.E. Tveito og E.J. Førland, 2001. Økt nedbør i vinter-Norge. *Cicerone* 6:26-28. (in Norwegian)

Kværnø, S.H. & Øygarden, L., 2006. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway. *Catena*, in press.

Lehrsch, G.A., Sojka, R.E., Carter, D.L., Jolley, P.M., 1991. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 55, 1401-1406.

Lundekvam, H., Skøyen, S., 1998. Soil erosion in Norway. An overview of measurements from soil loss plots. *Soil Use and Management* 14, 84-89.

Mulla, D.J, Huyck, L.M., Reganold, J.P., 1992. Temporal variations in aggregate stability on conventional and alternative farms. *Soil Science Society of America Journal* 56, 1620-1624.

Perfect, E., Van Loon, W.K.P., Kay, B.D., Groenevelt, P.H., 1990. Influence of ice segregation and solutes on soil structural stability. *Canadian Journal of Soil Science* 70, 571-581.

Skjevdal, R.M., Vandsemb, S.M., 2005. Jord- og vannovervåking i landbruket. Feltrapporter fra programmet i 2004. Jordforsk report 84/05, 251 pp (in Norwegian).

Syversen, N. 2002. Effect of a cold- climate buffer zone on minimising diffuse pollution from agriculture. *Water Science and Technology* 45, 69-76.

Øygarden, L, 2000. Soil erosion in small agricultural catchments, south-eastern Norway. Doctor Scientiarum Theses 2000:8. Agricultural University of Norway.

Frost og effekter på vanntransport og saltspredning fra veg, modellering og feltstudier på Gardermoen

Frost and influence on water transport and the spreading of salt from roads, modelling and field studies at Gardermoen

French, H.K.¹, Wike, K.², Flesjø, K.² & Riise, G.²

1. Bioforsk, Jord og Miljø, Frederik A. Dahlsø, 20, 1432 Ås (helen.french@bioforsk.no)

2. Universitetet for miljø- og biovitenskap, Institutt for Plante og Miljøvitenskap, pb. 5003, 1432 Ås

Summary

Soil physical properties and infiltration capacity is strongly affected by freezing and thawing. Often an impermeable ice layer is formed below the snow cover on the ground surface, and meltwater is redistributed over the surface and may form ponds in local depressions, hence affecting the local hydrology and contaminant transport. Electrical resistivity was used to monitor spatio-temporal changes in water contents under a melting snowcover in 2001. The method revealed zones of focussed infiltration during the first part of the melting process (French and Binley, 2004). - In the winter time the snow along roads is mixed with salt from winter road maintenance. A field survey was conducted near a motorway (R35) at Gardermoen, 40 km north of Oslo, to examine the runoff pattern and the degree of groundwater contamination.

Forty four tons of NaCl per km was used during the winter of 2005/2006. Runoff drains to an established infiltration system which is only about 40 m from a small lake, Skåntjern. Measurements in a groundwater well on the infiltration system throughout 2005/2006 revealed increased chloride concentrations compared to levels measured prior to the opening of the motorway in 1996. Chloride concentrations in the lake have also doubled since the opening of the road. A numerical model was used in order to examine the effect of different combinations of infiltration patterns and resulting salt transport in the groundwater zone. Modelling results so far indicate that the redistribution of snowmelt, and local infiltration only on the infiltration area, caused higher concentrations at an earlier arrival time of chloride in lake Skåntjern, compared to a situation with more dispersed infiltration. There was no indication of density effects.

Sammendrag

Fryse- og tineprosesser påvirker infiltrasjonsevnen i jorda, og kan føre til damdannelser. Dette vil påvirke fordelingen av infiltrasjonen under snøsmeltingen og dermed påvirke salttransport fra veg. Salting av veger i vintervedlikeholdet har vært ansett som ufarlig for miljøet. I perioden 2005-2006 ble det benyttet i gjennomsnitt 44 tonn salt pr. km på R35, som går fra Jessheim ved E6 til Gardermoen hovedflyplass. Natriumklorid (NaCl) er det vanligste saltet på norske veger. En andel av natriumioner vil kunne adsorberes til jordpartikler, mens kloridioner i større grad følger vannfasen.

Forsøksfeltene i disse studiene er lagt til Moreppen og et infiltrasjonsbasseng langs R35 samt Skåntjern, en grytehullsjø ca 40 m fra infiltrasjonsområdet, Gardermoen. Elektriske resistivitetmålinger fra 2001 viste fordelingen av smeltevannsinfiltrasjon under snøsmeltingen. Forsøkene viste at det var høy infiltrasjon i lokale forsøkskninger. Dette førte til nye studier i 2005-2006 der avrenningsvann fra veg med høye saltkonsentrasjoner i vinterhalvåret ble undersøkt med hensyn på infiltrasjon til grunnvannet og spredning til Skåntjern. Undersøkelser i Skåntjern viste en markant økning i ledningsevne og klorid fra 1996 da vegen ble åpnet og frem til i dag. For å bedre forståelsen av hvordan infiltrasjonsforholdene under snøsmelting og kloridtransporten i grunnvannet påvirker Skåntjern er det bygget opp en todimensjonal grunnvannsmode. Modellresultatene så langt viser en større fortykningseffekt og langsommere tilførsel av klorid til Skåntjern ved en spredt infiltrasjon enn ved lokalinfiltrasjon.

Infiltrasjon i frossen Jord

Jordas fysiske egenskaper endres ved frysing og påvirker i stor grad infiltrasjon og avrenningsforhold i områder der jorda fryser. Den relativt sett største endringen i infiltrasjonsevne som skyldes fryse- og tineprosesser, skjer i jord med normalt sett høy infiltrasjonsevne, som for eksempel i sandjord (Zhao et al., 2002). Jordas vanninnhold og tilstedeværelse av snødekke ved innfrysing, er av stor betydning for teledannelsen. Varighet av negative temperaturer før snøen bygger opp et isolerende lag, påvirker teledybden. Lavt vanninnhold gir også større teledyp. I tillegg til det som skjer på høsten og tidlig vinter under innfrysning vil også de klimatiske forholdene under snøsmeltingen påvirke isdannelse og avrenningsforhold. Veksling mellom fryse- og tineepisoder vil føre til at vann som smelter transporteres nedover i snødekke og ned i jorda før deretter å fryse til i porene som fortsatt kan være åpne i den frosne jorda. Ofte kan det observeres et islag under snøen på jordoverflaten. Dette islaget kan gjøre overflaten ugjennomtrengelig, og nytt smeltevann eller regn vil kunne renne av på overflaten og det dannes dammer i større forsenkninger i terrenget eller vannet transporteres ut til bekker og elver. Slike damdannelse kan observeres både i jordbrukslandskap og i urbane områder. Oslo hovedflyplass har i flere smeltesesonger hatt slike dammer på grøntarealene (se også artikkel av Kitterød i denne utgaven). Det er gjort en rekke studier av forurensningstransport på forsøksfeltet Moreppen siden 1994 på Gardermoen akviferen (French et al., 1999, 2000, 2001, 2002, Søvik et al., 2002). I disse studiene er det først og fremst sett på det generelle transportmønsteret i umettet sone. I tillegg er nedbrytningsforhold studert. I arbeidet som presenteres her er det fokusert på forsøk som beskriver fordelingen av infiltrasjon under snøsmeltingen og hvordan dette kan være med å påvirke salttransport fra veg.

Småskala studie av smeltevannsinfiltrasjon

Det ble under forsøkene på Moreppen observert store forskjeller i smeltevannsoppsamling selv om snødekke hadde en jevn overflate (French og van der Zee, 1999) noe som kunne tilsi at det også kunne være store variasjoner i infiltrasjonsmengder på arealet. For å studere selve infiltrasjonsprosessen nærmere ble det i 2000/2001 satt i gang forsøk med bruk av elektrisk resistivitet for å kartlegge denne variasjonen. Ulike fjell- og løsmasser har ulike elektriske egenskaper, denne kontrasten gjør det mulig å benytte elektriske målinger for å kartlegge geologiske grunnforhold som lagdelinger, sprekksystemer osv. Endringer i jordas elektriske egenskaper over tid kan skyldes endringer i vanninnhold, innhold av ioner i vannfasen og

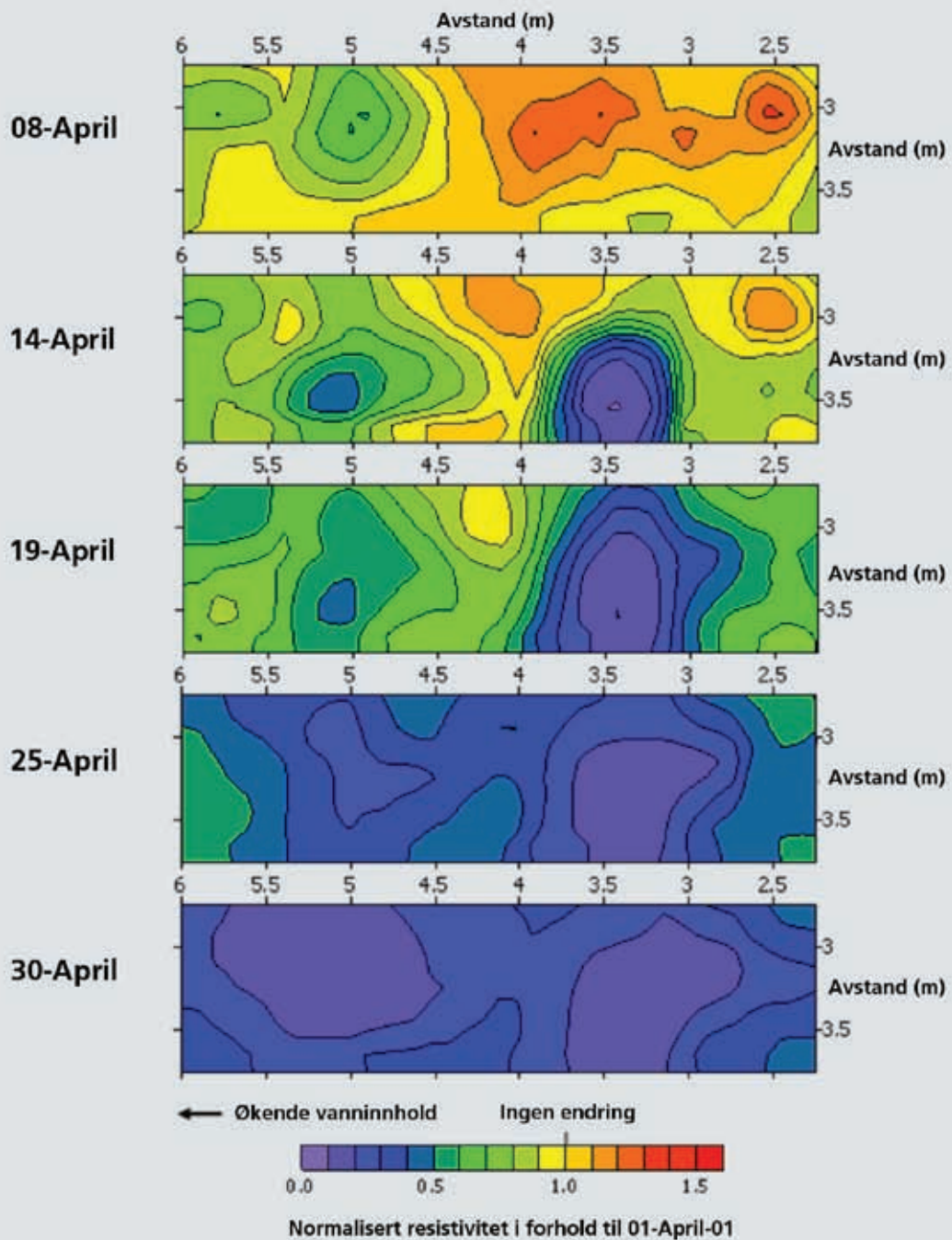
temperatur. Elektriske resistivitetmålinger skjer ved at det legges ut et sett med elektroder som har god kontakt med jorda (se for eksempel Reynolds, 1997). Ved å sette på et strømfelt mellom to av elektrodene og måle det elektriske motstandsfeltet som oppstår ved hjelp av de andre elektrodene, kan man få et bilde av jordas elektriske ledningsevne. I 2001 ble slike målinger foretatt i et nettverk av elektroder installert på 20 cm dyp under jordoverflaten (French og Binley, 2004). Målingene ble utført over tid og det kunne dermed fjernes romlige forskjeller som skyldtes strukturvariasjon i jorda og få frem endringer som skyldtes en kombinasjon av temperatur, vanninnhold og ioneinnhold. Da slike forsøk ble gjennomført på Moreppen, Gardermoen ble også temperatur i det samme området målt, og det var kun infiltrasjon av rent smeltevann fra snø. Fordi temperaturen stort sett var konstant i hele smelteperioden (temperaturen holdt seg stabil i overflaten så lenge det var snø/isdekke) og smeltevannet hadde konstant ledningsevne gjennom perioden, ble det konkludert med at all endring i elektrisk ledningsevne skyldtes endring i vanninnhold og dermed viste områder med høy infiltrasjon (fokusert infiltrasjon) (fig. 1). Forsøkene viste at fokusert infiltrasjon skjedde i lokale forsenkninger. Utover i smelteperioden ble denne variasjonen mindre. Denne kunnskapen kan benyttes i modeller for å definere fordeling av smeltevannsinfiltrasjon under snøsmelting.

Salting på norske veger

For å opprettholde en god vegstandard i Norge vintertid blir vegene brøytet, strødd med sand eller saltet. Vegsalt har vært brukt på norske veger siden 1960-tallet i Oslo by, mens salting av større riksveger og europaveier startet i 1970 (Meland 2005). Salting av veger har i Norge vært ansett som effektivt og ufarlig for miljøet. På en tofelts veg i Norge brukes i gjennomsnitt 10 tonn salt pr km mens det i en ugunstig vintersesong brukes opp mot 20 tonn salt pr km og opp mot 45 tonn pr km på en 4-felts motorveg (Nordbye 1997). I løpet av de siste 30 årene har kunnskap om vannforurensning og negative effekter på det naturlige og bygde miljø økt. I USA var det en erkjennelse fra slutten av 1960-årene og frem til 1980-årene at overvann fra veger og byer inneholder forurensende stoffer (Åstebøl 1998). I Canada og Europa har det vært økt fokus på overvannsavrenning som forurensningskilde i de siste 15 årene, mens det i USA har skjedd få framskritt (Åstebøl 1998).

Saltets kjemiske egenskaper

Natriumklorid (NaCl) er det mest brukte saltet på norske veger (Smeland 2006). I vann løses det i ioneform til



Figur 1. Endringer i elektrisk resistivitet normalisert på målinger tatt 1. april, i overflaten under et smeltende snødekke på Moreppen, Gardermoen i april 2001 (modifisert fra French og Binley, 2004). Feltene som er blå viser områder der infiltrasjonen har vært størst.

Na⁺ og Cl⁻. Na⁺ vil kunne adsorberes på jordpartikler mens klorid følger vannfasen. I følge Forskrift om vannforsyning og drikkevann m.m., 4-12/2001, nr 68, Sosial og helsedepartementet 4. desember 2001, kan konsentrasjoner over 200 mg Cl/l gi uheldige virkninger. Det er spesielt tre uønskede situasjoner man er oppmerksom på i forhold til saltspredning; 1) Det ønskes ikke forhøyede saltverdier i drikkevannsbrønner langs norske veier, 3) høye saltverdier kan gi potensielle økologiske effekter og 2) det ønskes ikke for høye saltkonsentrasjoner i innsjøer, fordi dette kan gi permanent sjikting i innsjøen. Tilførsel av vegsalt vil føre til økt tetthet av vann, noe som vil kunne hindre den normale sirkulasjonen som skjer i norske innsjøer vår og høst. Sekundære effekter kan også oppstå ved saltpåvirkning av grunnen. Klorid danner lett vannløselige komplekser med tungmetaller og kan transportere kompleksene til resipienter. Ved et høyt innhold av kloridioner øker mobiliteten av tungmetaller fordi tungmetaller bindes til negative kloridkompleks i høyere grad enn til mineralpartikler (D'Itri 1992, Vandsemb 1999, Østmo 2000).

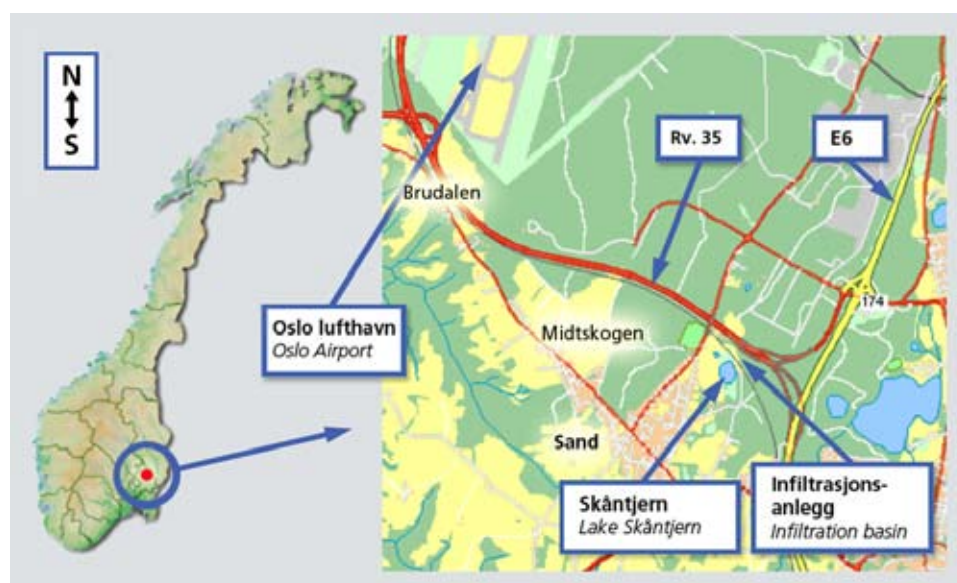
Valg av forsøkslokalitet

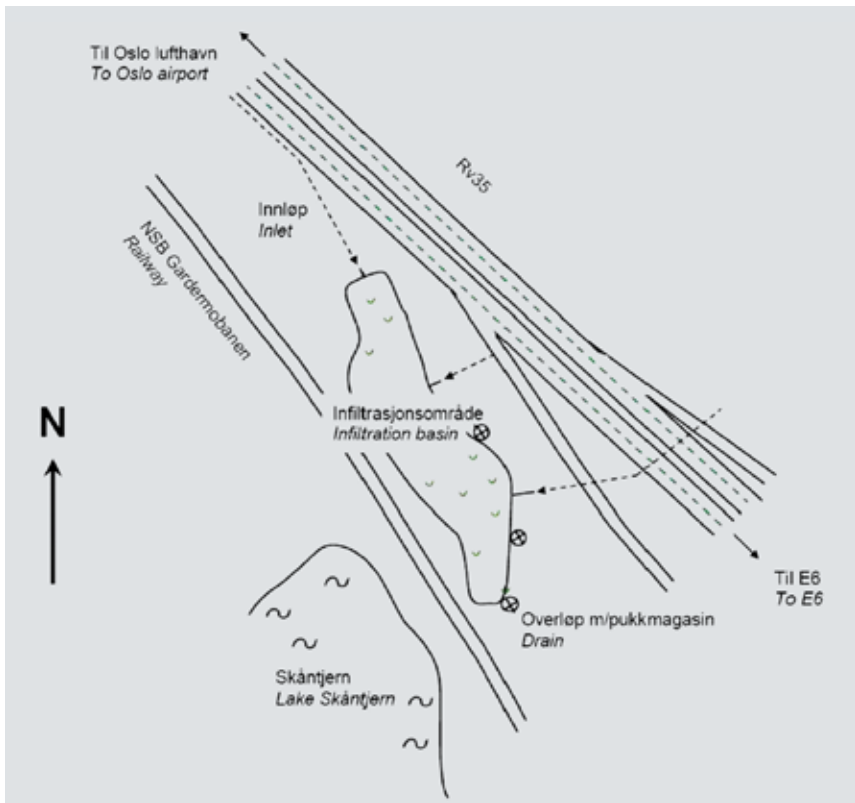
Statens vegvesen Akershus bygde i årene 1994-98 ny 4-feltsveg, R35, fra E6 ved Jessheim til den nye hovedflyplassen for Østlandet på Gardermoen. Flyplassen ble åpnet 8. oktober 1998. I perioden 2005-2006 ble det i gjennomsnitt benyttet 44 tonn salt pr. km på R35 (Keiserud 2006). Langs vegstrekningen er det bygget flere infiltrasjonsområder for infiltrasjon av overflatevann fra både asfalterte flater og fra jernbanetraseen. Området som er valgt ut for disse studiene er et infiltrasjonsanlegg som ligger sør for avkjøring mot

E6 i nordgående retning (Fig. 2). På sørsiden av infiltrasjonsområdet passerer jernbanen, og sør for denne ligger Skåntjern som er en grytehullssjø dannet under breens tilbaketrekning. Figur 3 viser overvannets tilførselsveger til infiltrasjonsområdet. I dette området ble det utført en rekke grunnundersøkelser i forbindelse med byggingen av R35. Videre ble det i forkant gjort en kartlegging av den generelle grunnvannsstrømningen i området. I henhold til dette strømningsmønsteret vil vann som infiltrerer på infiltrasjonsområdet og langs den tilhørende vegstrekningen strømme mot Skåntjern. Hvordan omfordelingen av smeltevann, beskrevet innledningsvis, påvirker avrenning og infiltrasjonsforholdene langs R35 er en viktig motivasjon for feltstudiene her. Avrenningen fra veg inneholder høye konsentrasjoner av salt i vinterhalvåret, noe som vil kunne ha betydning for hvordan vannet infiltrerer og spres i grunnvannet. For å dokumentere virkninger av etableringen av denne vegstrekningen har det blitt utført målinger av saltkonsentrasjon i jord langs vegen og på infiltrasjonsområdet, i grunnvann fra brønner på infiltrasjonsområdet og ved Skåntjern, samt i selve Skåntjern.

Strukturen i Gardermoendeltaet består av tre hovedenheter; et bunnlag, som hovedsakelig består av silt og leire, et skrålag, der sand og grus er avsatt da elven nådde fjorden, og et topplag som er nesten horisontalt, består av grove masser og som er avsatt over havnivået (Tuttle et al. 2001). Grunnundersøkelsene fra dette området viser at det er sand og grus i de øverste 10-15 m. Lokale topografiske forsenkninger kan være inntil ca 10 m dypere i forhold til terrenget omkring, Skåntjern er den største av disse (Rygg 1992). I disse forsenkningene er det torv i varierende tykkelse, Skåntjern har torvtykkelse på 7 m målt i kanten av Skåntjern. Det er meget bløtt rundt kanten av Skåntjern og det er delvis

Figur 2. Kart over beliggenheten til infiltrasjonsanlegget og Skåntjern.





Figur 3. Mulige tilførselsveger for salt til infiltrasjonsanlegget og R35 til Skåntjern. Vannet fra R35 kan tilføres Skåntjern via grunnvannet og overløpskummen (Østmoe 2000).

flyteturv som ligger på relativt fast lagret sand (Rygg 1992). Prøvetaking i Skåntjern ble utført tidlig på 70-tallet (Hongve 2004). Disse dataene representerer referansetilstanden før R35 ble åpnet i 1996. Det er installert en overvåkingsbrønn for grunnvann inne på infiltrasjonsområdet. Prøvetakingen har vært noe sporadisk siden R35 ble etablert i 1996, men gir et visst bilde av bakgrunnsituasjonen. Området egner seg derfor godt til effektstudier i felt.

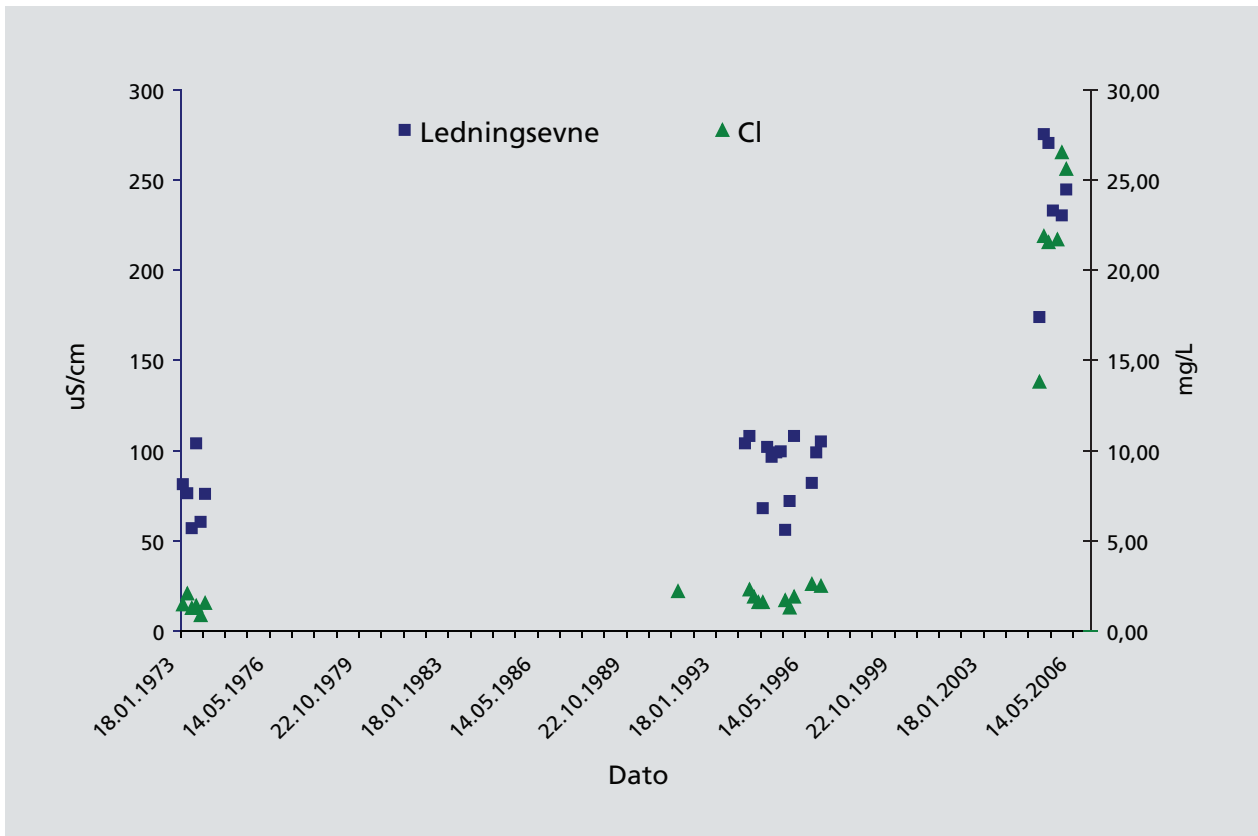
Situasjonen i Skåntjern

Det er en markant økning i ledningsevne og klorid i perioden fra 1996-2006 (figur 4). Siden det ikke er andre kilder til salt i dette området, er det rimelig å anta at denne økningen skyldes etableringen av R35 og bruk av vegsalt. Ut fra den relative differansen mellom kloridkonsentrasjonen og ledningsevnen (figur 4), kan en større andel av ledningsevnen forklares av NaCl i måleperioden, 2005/2006. Skåntjern er kategorisert som en innsjø med direkte grunnvannstilførsel (Hongve & Løvstad 1991). Det er grunn til å tro at transporten gjennom grunnvannet er forklaringen på de økte konsentrasjonene som observeres. Avhengig av avrenningsforhold kan det tidvis gå overløp fra et rør på infiltrasjonsområdet til Skåntjern. Det er ikke observert overløp i undersøkelsesperioden. Vinteren 2005/2006 var det i motsetning til vinteren 2000/2001 generelt lite tele i jorda, slik at mye av smeltevannet

kunne infiltrere under snødekket. Det ble likevel observert noe bekkdannelse på overflaten nær veg (figur 5). Det var ingen damdannelse på infiltrasjonsområdet og dermed heller ingen vanntransport gjennom overløpsrøret vinteren 2005/2006. Bildet i figur 5 illustrerer en annen effekt, der overflatevannet fra veg ikke nødvendigvis drenerer til kummene som er etablert for avrenning av smeltevann fra vegen.

Tilførsel av salt kan endre de fysiske egenskapene til et vann ved at tettheten endres, noe som kan endre sirkulasjonsegenskapene til innsjøen. Et eksempel på dette er Padderudvann i Asker som antas å ha sirkulert tidligere år, men som nå er meromiktisk (Bækken & Færøvig 2004). En meromiktisk innsjø består av et øvre vannlag som helt eller delvis sirkulerer vår og høst, og et nedre vannlag som aldri sirkulerer. Det nedre vannlaget tilføres ikke oksygen og det forbrukes oksygen under nedbrytning slik at det kan oppstå anaerobe forhold. Det er lite trolig at Skåntjern vil utvikle permanent meromiksis som følge av salttilførsler, fordi innsjøen er relativt grunn med dypeste punkt på 4,8 m.

Figur 6 viser ledningsevne ved ulike dyp fra juli 2005 til august 2006. Det forutsettes at ledningsevnen er en funksjon av klorid fra vegsalt. Ledningsevnen i august 2006 var høy nær bunnen og relativt lav i de øvre vannmassene. Fra november til januar var det liten variasjon i vannmassene, med den laveste målte ledningsevnen i bunnvannet gjennom overvåkingsperioden. Fra januar til april var det en økning i ledningsevnen i bunnvannet. Det ble ikke utført målin-



Figur 4. Ledningsevne målt i Skåntjern fra 1973 til 2006 (venstre y-akse). Ledningsevnen har økt fra 76 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (gjennomsnitt fra 1973) til 238 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i 2005, mens gjennomsnittlig kloridkonsentrasjon har økt fra 1,44 i 1973 til 18,26 i 2005-06. Tall fra 1973 er fra Hongve (pers. medd. 2006). Tall fra 1996 er hentet fra Åstebøl og Løvstad (1996).

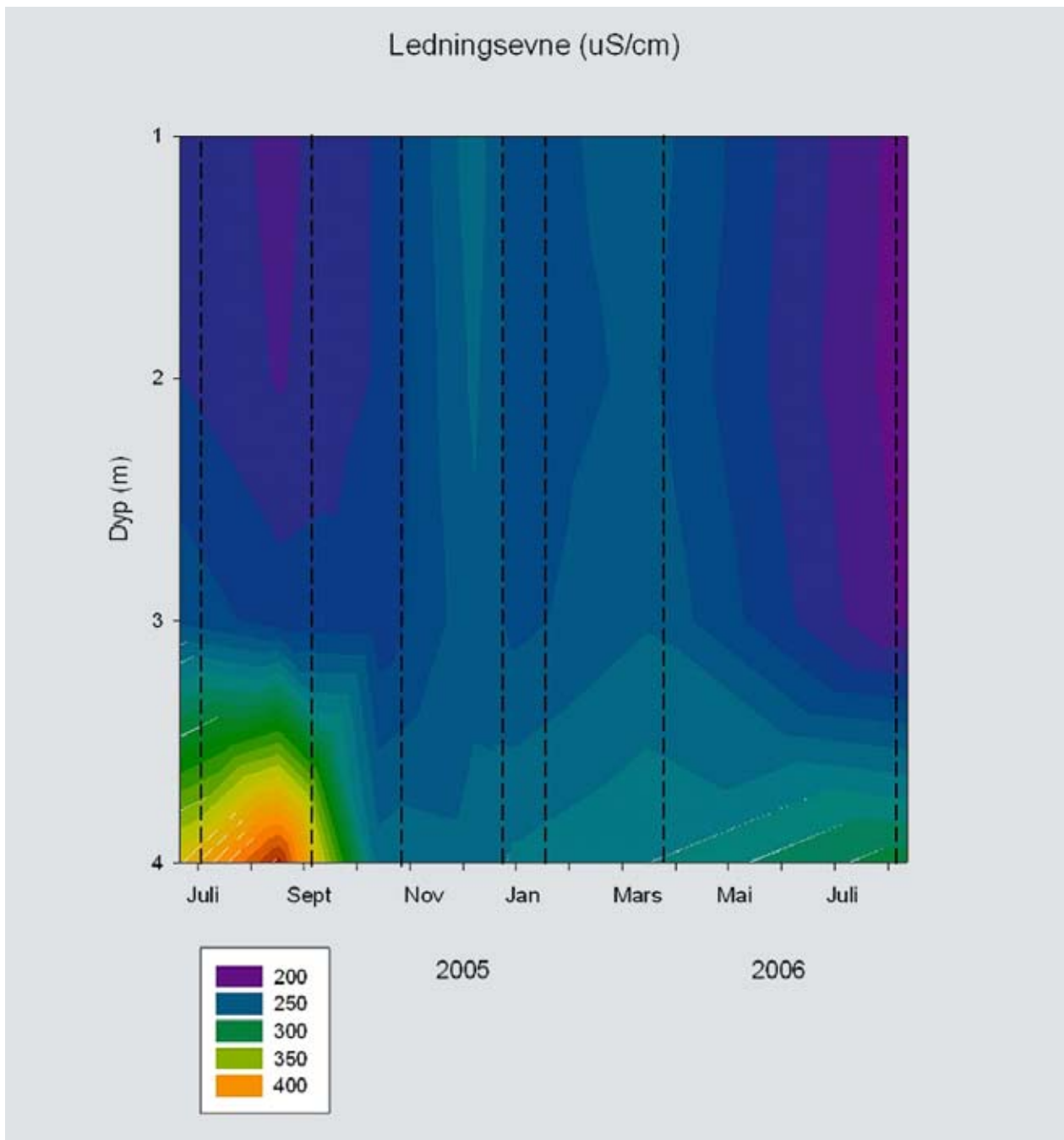
ger i mai, juni og juli 2006 og ledningsevnen i denne perioden er derfor usikker. Ledningsevnene observert i august 2006 er lavere enn de som ble målt i august 2005. Forutsettes det at oppholdstiden er relativt lik fra år til år, tyder denne forskjellen på at kloridkonsentrasjonene som nådde Skåntjern, var lavere i 2006 enn 2005. Totalmengden salt benyttet på vegen var lavere i 2004/2005 enn i 2005/2006, men ledningsevnen i Skåntjern var høyere sommeren 2005. Årsakene til dette kan være 1) overløp via rør fra infiltrasjonsanlegget 2) infiltrasjonsforholdene har påvirket salttransporten i grunnvannet slik det er illustrert med modelleringen i neste avsnitt.

Modellering av salttransport

For å bedre forståelsen av hvordan ulike infiltrasjonsforhold som for eksempel skyldes at det er frost i bakken, påvirker strømmingen i grunnvannet og salttransporten til Skåntjern er det utført en del scenarioanalyser ved hjelp av en grunnvannsmodell som også inkluderer tetthetsstrømning (Voss & Provost, 2002). For å bygge opp modellen er det brukt informasjon om grunnforhold etablert under byggingen av vegen (Rygg, 1992), topografiske kart, klimadata, tekniske



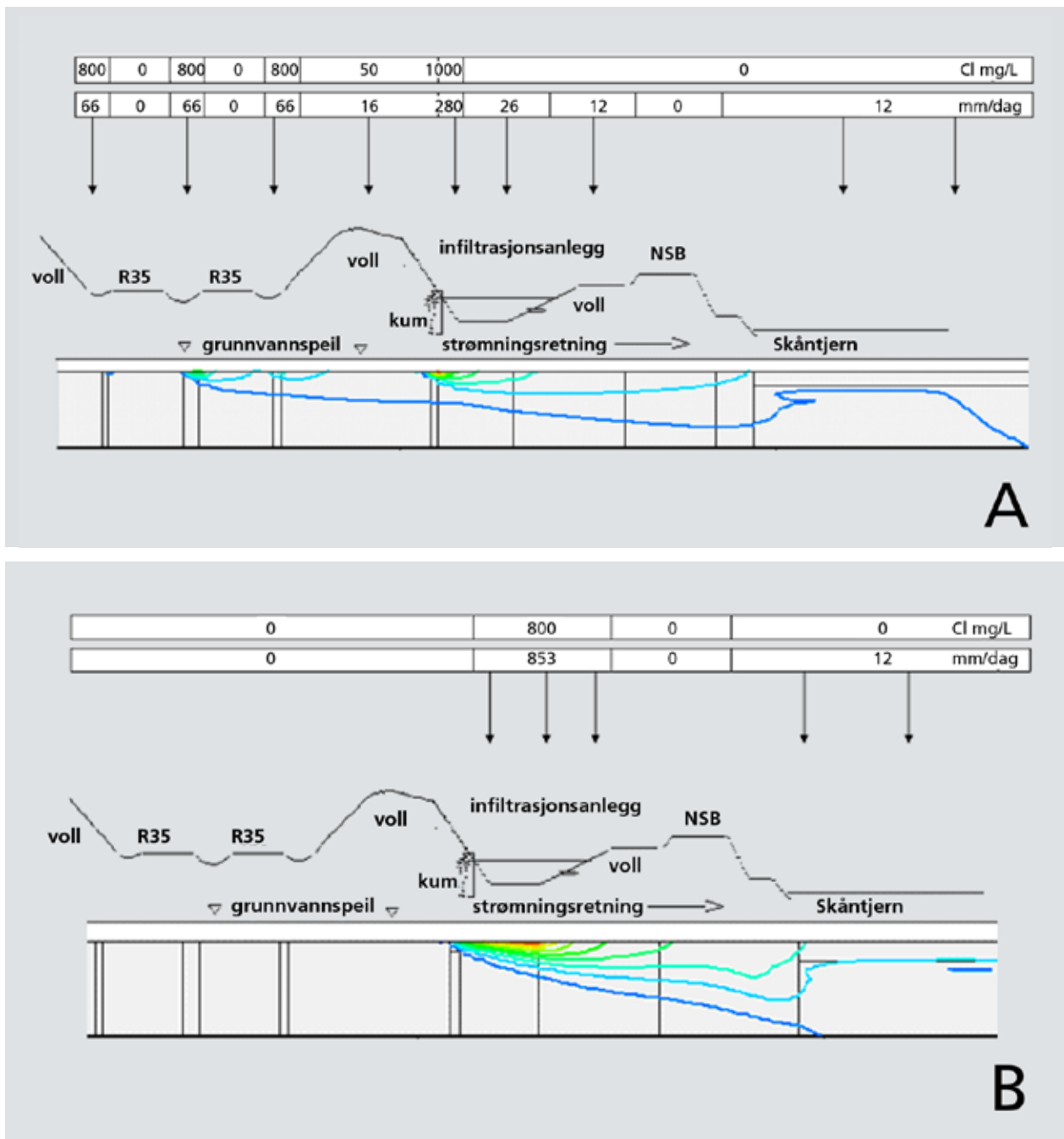
Figur 5. Bilde tatt fra kum på sørsiden av R35 i nærheten av infiltrasjonsområdet.



Figur 6. Ledningsevne i Skåntjern ved varierende dyp mot tid i perioden juli 2005 – august 2006. Stiplet linje viser dato for målt ledningsevne ved 1, 2, 3 og 4 m dyp.

tegninger som viser areal som drenerer til ulike kummer og kunnskap om saltingsrutiner i vintersesongen 2005/2006. Det ble ikke utført avrenningsmålinger fra dreneringene som ender ut i infiltrasjonsanlegget, slik at vannmengder benyttet som infiltrasjonsmengder i modellen baserer seg på teoretiske beregninger på grunnlag av areal som drenerer til infiltrasjonsanlegget og en akkumulert snømengde på 250 mm som infiltrerer over en periode på 3 uker (French et al., 2001). Figur 7 viser et tverrsnitt fra R35 i nord gjennom

infiltrasjonsanlegget, jernbanetraseen til Skåntjern i sør. Figuren viser også hva som er brukt som infiltrasjonsrater og kloridkonsentrasjon i ulike soner i to ulike scenarier, A) ett som viser lokal infiltrasjon rett under innløpsrør og langs vegstrekningen og B) ett med damdannelse og infiltrasjon over hele infiltrasjonsområdet. Kloridkonsentrasjonene som er benyttet er basert på målinger gjort i snø langs sidearealene og i smeltevann fra innløpsrør vinteren 2005/2006. Det er ikke lagt inn frysing av jord i modellen, men grensebetingelsene,



Figur 7. Prinsippskisse av tverrsnitt gjennom R35, infiltrasjonsanlegg, jernbane og Skåntjern. Soner med ulik infiltrasjon er vist, tallene i raden over viser konsentrasjoner av klorid (mg/l) og infiltrasjonsmengder som mm/dag mengder benyttet over en 3-ukers periode. Nederst i figurene vises mulig spredning av klorid modellert med SUTRA_2D3D. A) etter en smeltesituasjon uten isdannelse og infiltrasjon i veggrofter, B) etter smeltesituasjon med tett islag over området og kun infiltrasjon på infiltrasjonsarealet.

altså infiltrasjonsforholdene, er definert ut fra at man har soner med ulik evne til infiltrasjon. Figur 7 viser mulig spredningssituasjon av klorid etter de to ulike smelte-situasjonsscenarioene. Modellresultatene så langt viser en større fortykningseffekt og langsommere tilførsel av klorid til Skåntjern ved en spredt infiltrasjon enn ved lokalinfiltrasjon, noe som sannsynligvis var tilfellet i 2005/2006. Modellresultatene bekrefter hypotesen om at salt fra veg transporteres

til Skåntjern. Ut fra modellerte scenarier, tyder det ikke på at tetthetseffekter har betydning under de lokale forholdene.

Videre arbeid

Arbeidet med kartlegging og modellering av infiltrasjon og avrenningsforholdene langs veg i vinter og

snøsmeltingsperioden vil fortsette i Forskningsrådsprosjektene "Pollution risks and water management at airports and roads in a changing climate" (2005-2008) og "Stormwater – dimensioning for climate change" (2007 – 2009). Hvordan klimaendringer kan påvirke behov for salting og lokal avrenning fra vegens omgivelser skal også studeres.

Masteroppgavene avsluttes i desember 2006 og fullstendige resultater vil bli presentert.

Referanser

- Bækken, T. & Færøvig, P. J. (2004). Effekter av vegforurensninger på vannkvalitet og biologi i Padderudvann. I: Statens Vegvesen Vegdirektoratet (red.). Publikasjon nr. 106. Oslo, Teknologiavdelingen. 89 s.
- D'Itri, F. M. (1992). Chemical de-icers and the environment, Lewis publishers.
- French, H.K. and Binley, A. (2004). Snowmelt Infiltration: Monitoring Temporal and Spatial Variability using Time-Lapse Electrical resistivity. *Journal of Hydrology*, 297, 1-4, 174-186
- French, H.K., Hardbattle, C., Binley, A., Winship, P., Jakobsen, L., (2002). Monitoring snowmelt induced unsaturated flow and transport using electrical resistivity tomography *Journal of Hydrology*, 267, 273-284
- French, H.K., Van der Zee, S.E.A.T.M. and Leijnse, A. (2001). Transport and degradation of propyleneglycol and potassium acetate in the unsaturated zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, 49, 23-48
- French, H.K., Van der Zee, S.E.A.T.M. and Leijnse, A. (2000). Prediction uncertainty of plume characteristics derived from a small number of measuring points, *Hydrogeology Journal* 8, 2: 188-199
- French, H.K. and Van der Zee (1999). Field scale observations of small scale spatial variability of snowmelt drainage and infiltration, *Nordic Hydrology*, 30: 166-176
- French, H.K., Van der Zee, S.E.A.T.M. and Leijnse, A. (1999) Differences in gravity dominated unsaturated flow during autumn rains and snowmelt, *Hydrological processes* 13, 17: 2783-2800
- Hongve, D. (2004). Endogenic meromixis Studies of Nordbytjernet and other meromictic lakes in the upper Romerike area, University of Oslo, Folkehelseinstituttet. 206 s.
- Hongve, D. & Løvstad, Ø. (1991). Verneverdige innsjøer i Gardermo-området. I: Luftfartsverket NSB og Vegkontoret i Akershus (red.).
- Keiserud, A. (2006). Personlig meddelelse, Mesta.
- Meland, S. (2005). Personlig meddelelse.
- Nordbye, L. (1997). Vegavrenning. Aktuell miljøforskning. I: Statens vegvesen Vegdirektoratet (red.). MISA 97/08. 36 s.
- Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 796 pp.
- Rygg, N. (1992). Grunnundersøkelser veg- og jernbanetrase, nordre alt., Variant A, 3, Statens Vegvesen Akershus Laboratoriet. 5 s.
- Smeland, G. (2006). Personlig meddelelse, Statens Vegvesen, region øst.
- Søvik, A.K., Alfnes, E., Breedveld, G.D., French, H.K., Pedersen, T.S., Aagaard, P. (2002). Transport and Degradation of Toluene and o-Xylene in an Unsaturated Soil with Dipping Sedimentary Layers. *Journal of Environmental Ecology*, 31, 1809-1823
- Tuttle, K., Stabell, B., Hongve, D. & Aagaard, P. (2001). Klimaendringer- nøkkelen til å forstå Gardermoenavsetningen og miljøet i grytehullsjøene. Spredning av forurensning i grunnen.
- Vandsemb, S. (1999). Veisalt -virkninger i jord og vann. I: Semesteroppgave i Jordforurensning og Vannforurensning (red.).
- Østmoe, K. (2000). Miljøhåndboken. Transportøkonomisk institutt.
- Åstebøl, S. O. (1998). Rensing av overvann fra veg. Aktuelle løsninger. Statens vegvesen, Vegdirektoratet, 98/07: 86.
- Åstebøl, S. O. & Løvstad, Ø. (1996). Gardermobanen og Rv 174/E6 parsell Kverndalen - Gardermoen S. Samordnet overvåkning av vannforurensning. Statusrapport for 1995. Ski, GEOFUTURUM as. 43 s.
- Hongve, D. (2006). Primærdata. Pers.medd.

Pelebelastningsforsøk i salt permafrost, Longyearbyen

Pile load test in saline permafrost, Longyearbyen

Ørjan Nerland, Norges Geotekniske Institutt (orjan.nerland@ngi.no)

Summary

Salt in the pore phase of permafrost can cause dramatic reduction in strength and increase the creep-settlement velocity of piles embedded in permafrost significantly. Long-term creep-settlements often limit the pile loads. The salt's impact on the creep-settlement and bearing capacity of piles at Svalbard Science Centre was the major challenge during the geotechnical engineering phase. The Science Centre is more or less designed based on literature from pile load tests carried out in saline permafrost in North-America. Lack of good design guidelines for piles in saline permafrost was the main incentive for starting a pile load test in Longyearbyen in 2003. The test is not finished yet, but the first results are presented in this paper. The results so far indicates that the pile capacity is higher than the Science Centre is designed for.

Sammendrag

Salt i porefasen i permafrost kan forårsake dramatisk styrkereduksjon og gi betydelig økning i krepsetningshastigheten for peler i permafrosten. Saltets påvirkning på krepsetninger og bæreevne for peler ved Universitetssenteret på Svalbard var den største utfordringen ved de geotekniske arbeidene. For Universitetssenteret er det brukt en design mer eller mindre basert på litteratur fra pelebelastningsforsøk utført i salt permafrost i Nord-Amerika. Mangel på gode retningslinjer for utførelse av peler i salt permafrost var hovedgrunnen til oppstart av pelebelastningsforsøk i Longyearbyen i 2003. Forsøkene er ikke ferdige ennå, men de første resultater er presentert i denne artikkelen. Resultatene som er oppnådd hittil indikerer at pelekapasiteten er høyere enn det som var beregnet for Universitetssenteret.

Innledning

Norges Geotekniske Institutt (NGI) og Statsbygg startet sommeren 2003 et statisk pelebelastningsforsøk i Longyearbyen på Svalbard. Idéen til forsøket ble introdusert i forbindelse med geoteknisk prosjektering av nye Svalbard Forskningspark. Byggeteknisk konsulent for Forskningsparken, og kontraktspartner overfor Statsbygg, var AS Fredriksen med NGI som geoteknisk underkonsulent. Fruktbare diskusjoner mellom Rolf Jullum fra Statsbygg, Erik Sjetnan og Trygve Espelin fra AS Fredriksen, samt Odd Gregersen og Ørjan Nerland fra NGI, gjorde sitt til at idéen med pelebelastningsforsøk ble realisert. Pelebelastningsforsøket er for øvrig kort omtalt av Rolf Jullum i Frost i Jord 2005 (publikasjon nr. 108, Vegdirektoratet).

Utfordringen i forbindelse med dimensjonering av pelene for Svalbard Forskningspark var det høye saltinnholdet i porevannet i grunnen. Det er utført flere pelebelastningsforsøk i permafrost, men så vidt NGI bekjent er det kun utført et begrenset antall forsøk i salt permafrost /1-4/. Det kan for øvrig nevnes at Selmer-Furuholmen Anlegg AS, i samarbeid med NGI, i perioden januar 1984 til desember 1986, utførte et langtids pelebelastningsforsøk ca 700 m sør-vest for dagens forsøksfelt. Dette forsøket ble derimot utført i tilnærmet saltfri permafrost (under 3 g/l) /5/. NGI og Statsbygg hadde derfor et sterkt ønske om å utføre et pelebelastningsforsøk i salt permafrost i forbindelse med byggingen av Forskningsparken. Resultatene fra forsøket kunne naturlig nok ikke benyttes i forbindelse med prosjekteringen av pelene for Forskningsparken, men forsøket vil forhåpentlig bidra til å øke forståelsen for dimensjonering av peler i salt permafrost.

Forsøksfeltet er vist på oversiktskart og foto, se figur 1 og 2.

Denne artikkelen oppsummerer resultater fra forsøket oppnådd i perioden oktober 2003 til september 2006.

Grunnforhold

I forbindelse med utarbeidelse av forprosjekt for Svalbard Forskningspark ble det foretatt grunnundersøkelser på tomte. Grunnundersøkelsene viste at løsmassene på tomte hadde tilsvarende beskaffenhet som under eksisterende UNIS-bygg /6/. Løsmassene



Figur 1. Kart som viser plassering av forsøksfeltet i Longyearbyen.



Figur 2. Pelekassa med Svalbard Forskningspark i bakgrunnen. (Foto: Birger Amundsen)

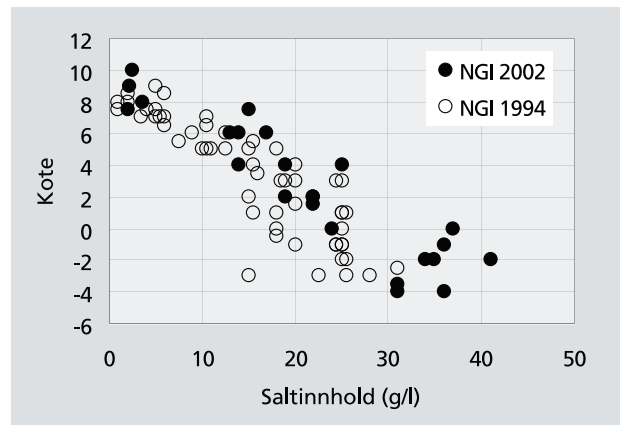
består av et topplag med grusig sandig siltig jordmateriale med mektighet på 2-2,5 m, vanninnhold på rundt 10 % og saltinnhold på 2-4 g/l. Under topplaget består grunnen av siltig leire med noe innslag av sand og grus i de øverste 10-12 m. Vanninnholdet i leira varierer fra 20 til 30 %, mens saltinnholdet varierer fra 3 g/l i toppen av leira til 35 g/l ved 10-12 m dybde /7, 8/.

Grunnforholdene under Svalbard Forskningspark antas å være representative også for grunnen under forsøksfeltet.

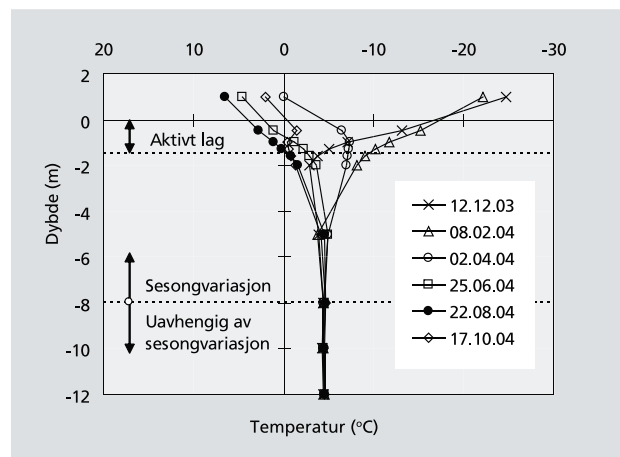
Figur 3 viser målinger av saltinnhold utført i forbindelse med bygging av henholdsvis eksisterende UNIS-bygg (NGI 1994) og nye Svalbard Forskningspark (NGI 2002). Saltinnholdet er målt ved hjelp av refraktometer etter at porevannet er presset ut av prøven. Til sammenligning kan nevnes at sjøvann har et saltinnhold på 30-35 g/l.

En av de store utfordringene i forbindelse med den geotekniske prosjekteringen av Svalbard Forskningspark var, som tidligere nevnt, det høye innholdet av salt i porevannet. Økt saltinnhold i porevannet betyr mer ufrosset vann, og dermed redusert fryseheft mellom pel og omsluttende jord. Økt saltinnhold medfører redusert bæreevne av peler.

Det optimale ville vært å utføre et pelebelastningsforsøk i forkant av byggingen av Forskningsparken. Tidmessig lot dette seg dessverre ikke gjøre ettersom pelebelastningsforsøk i frossen jord er relativt tidkrevende å gjennomføre. Dette skyldes at langtidskryp ofte er dimensjonerende i permafrost.



Figur 3. Saltinnholdet i porevann under Svalbard Forskningspark.



Figur 4. Temperatur langs referansepel (pel 4).

Temperatur i grunnen

Temperaturen i grunnen under forsøksfeltet måles ved hjelp av termistorstrenger som er festet til pelene. I tillegg til termistorstrenger på pelene har NGI tilgang til data fra flere andre termistorstrenger som er installert i umiddelbar nærhet til forsøksfeltet. Temperaturen i grunnen ved forsøksfeltet er derfor godt kjent.

Figur 4 viser temperaturen langs referansepelen ved ulike tider på året. Ut fra figuren kan vi se at det aktive laget er på ca 1,5 m, samt at temperaturen fra ca. 8 m under terreng er konstant lik $-4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ og uavhengig av de årlige sesongvariasjonene. Temperaturen fra 8 m under terreng gjenspeiler den årlige middeltemperaturen ved terrengnivå.

Installasjoner og utstyr

Pelebelastningsforsøket består av til sammen fire peler, se figur 5. Tre såkalte belastningspeler og en referansepel. Belastningspelene er statisk belastet ved hjelp av dødvekt fra overliggende betongkasse. To av belastningspelene er av stål type HE240A, mens en er av betong type P230NA. Avstanden mellom belastnings-

Tabell 1. Data for installerte peler.

Pele-nr.	Pele-type	Koordinater topp pel			Dybde under terreng (m)	Høyde over terreng (m)
		X	Y	Z		
1	HE240A	94400	1000	10.774	11.80	0.50
2	HE240A	98135	-3696	10.774	9.23	0.38
3	P230NA	100334	1887	10.774	7.00	0.69
4	HE160A	97623	-270	10.324	12.75	0.55



Figur 5. Peler og pelekasse. (Foto: Birger Amundsen)



Figur 6. Lastcelle ved pelespiss. (Foto: Bjarne Engene)



Figur 7. Lastcelle ved peletopp. (Foto: Bjarne Engene)

pelene er 6 m. Referansepelen er plassert midt mellom belastningspelene, og er av stål type HE160A. Referansepelen er installert i forboret hull med diameter 300 mm, mens belastningspelene er installert i forborede hull med diameter 400 mm. To av belastningspelene er påmontert lastceller ved pelespiss før nedsenkning i borhullene, se figur 6. Alle belastningspelene er påmontert lastceller ved peletopp, se figur 7. Referansepelen og to av belastningspelene er i tillegg påmontert termistorstreng før nedsenkning. Sammenstilling av data for de installerte pelene er vist i tabell 1.

Etter installasjon av termistorstrenger, lastceller og peler ble borhullene fylt med betongslurry. En m³ betongslurry bestod av 500 kg sement, 250 kg kalksteinsfiller, 1250 kg sand med kornfraksjon 0-4 mm, 42 liter frostvæske (Scancem FP 2039) og vann. Pelene for belastningsforsøket ble installert samtidig med pelene for Forskningsparken. Vanninnholdet i betongslurryen ble endret underveis for å bedre støpbarheten. Entreprenøren kunne dessverre ikke oppgi eksakt vannmengde som var benyttet for støp rundt pelene til belastningsforsøket.

For å sikre betongslurry i hele borhullet, var det i utgangspunktet ønskelig å fylle hullene med slurry før installasjon av pelene. Erfaringer underveis viste derimot at forhåndsfylte hull gjorde senere installasjon og sentrering av pelene vanskelig. Pelene ble derfor installert først, for så i etterkant å fylle hullene med betongslurry. For å få slurry i hele hullet, og dermed god heft mellom pel, slurry og jord, ble pelene vibrert under innfylling av slurryen, se for øvrig figur 8.

Pelekassen, som bidrar til belastning på pelene, består av armert betong. Pelene belastes ved å fylle elvegrus i betongkassa.

Setninger måles ved hjelp av "aluminiumsarmer" som strekker seg fra hver av belastningspelene og frem



Figur 8. Innfylling av betongslurry. (Foto: Trygve Espelin)

til posisjonsgivere som er påmontert referansepelen, se figur 9 og 10.

Termistorstrenger, lastceller og setningsmålere er ført inn i loggeskap som er montert under pelekassa, se figur 11. Loggeren samler inn data hver 6. time ved hjelp av et forhåndsprogrammert loggeprogram. Rådata blir sendt til NGI ved hjelp av et GSM-modem.



Figur 9. Arrangement for setningsmålere. (Foto: Birger Amundsen)



Figur 10. Posisjonsgivere på referansepel. (Foto: Birger Amundsen)



Figur 11. Loggeskap. (Foto: Bjarne Engene)

Pålasting

Bygging av peler, pelekasse og instrumentering ble ferdigstilt i oktober 2003. Første lasttrinn bestod av egenvekten til pelekassa. De ulike lasttrinn er vist i tabell 2. Forsøket er planlagt å fortsette ut 2009, men endelig ferdigstilling vil avhenge av størrelsen på setningene i tiden fremover.

Tabell 2. Lasttrinn.

Lasttrinn nr.	Total last (kN)	Last per pel (kN)	Dato for pålasting
1	561	187	utført 17. okt. 03
2	930	310	utført 30. nov. 03
3	1350	450	utført 15. nov. 05
4	1500	500	planlagt nov. 06
5	1650	550	planlagt nov. 07
6	1800	600	planlagt nov. 08

Resultater og diskusjoner

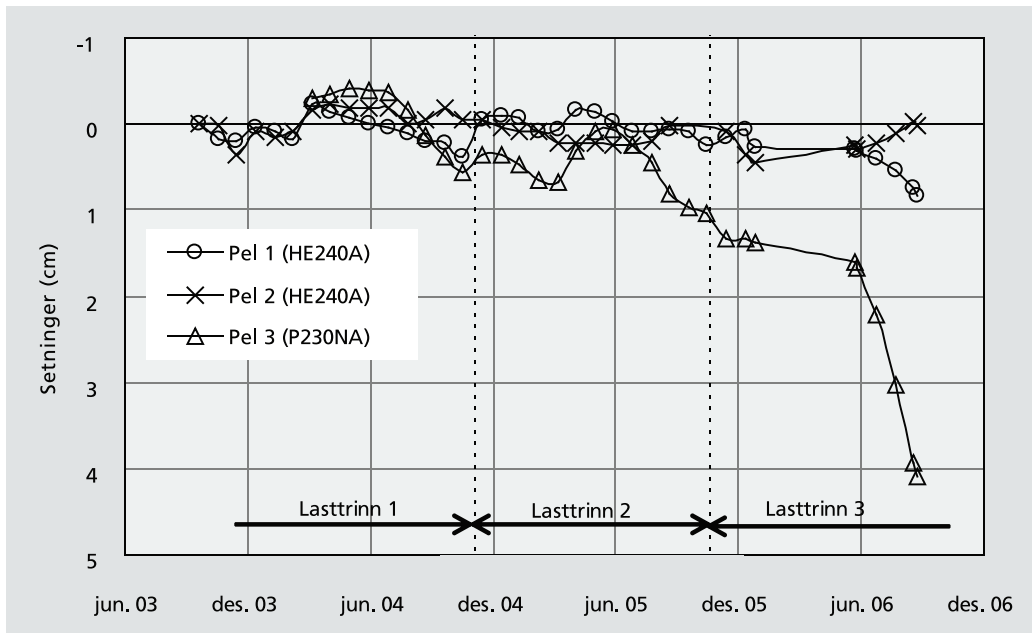
I det etterfølgende vises foreløpige resultater fra pelebelastningsforsøket. Resultatene er oppnådd i perioden oktober 2003 til september 2006.

Figur 12 viser de totale setninger av pelene. Som vi ser av figuren så har pel 3 satt seg relativt mye de siste månedene. Pel 3 er kortest og forventes derfor å ha dårligst bæreevne av de tre belastningspelene. Setningene for pel 3 begynte å akselerere i slutten av

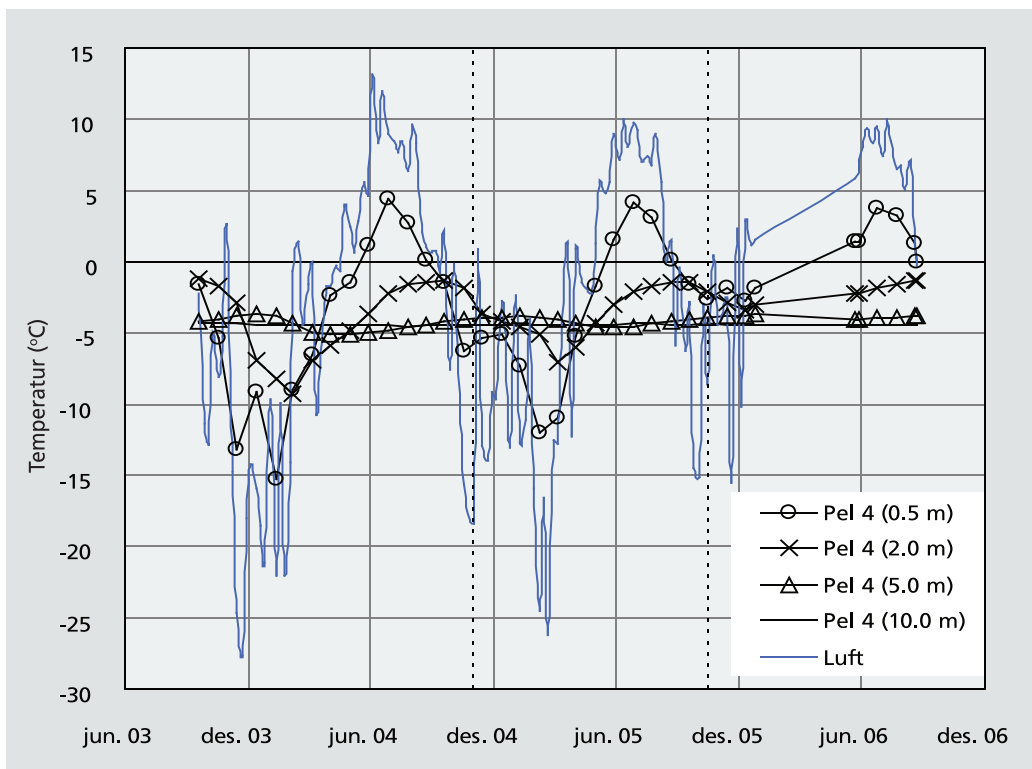
juni 2006, altså i en periode hvor tykkelsen på det aktive laget et økende. På sensommeren/høsten forventes det aktive laget å være på sitt mektigste, noe som betyr at bæreevnen av pelene i denne perioden er på sitt laveste.

Figur 13 viser temperatur med tiden i luft og langs referansepel.

Figur 14-16 viser setningshastighet (cm/år) med tiden for belastningspelene. Figurene viser også at det er registrert hiv/oppløft av pelene i måleperioden. Dette

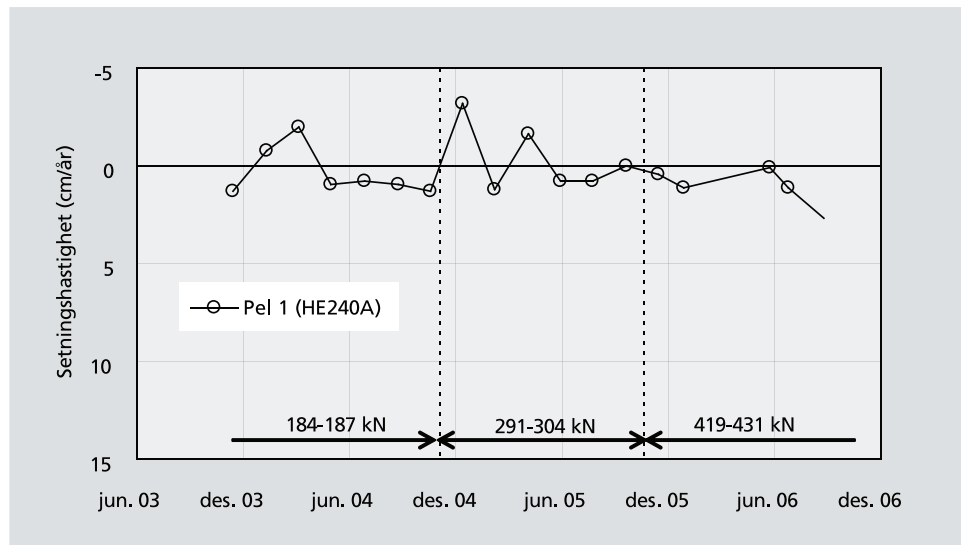


Figur 12. Totale setninger av pelene.

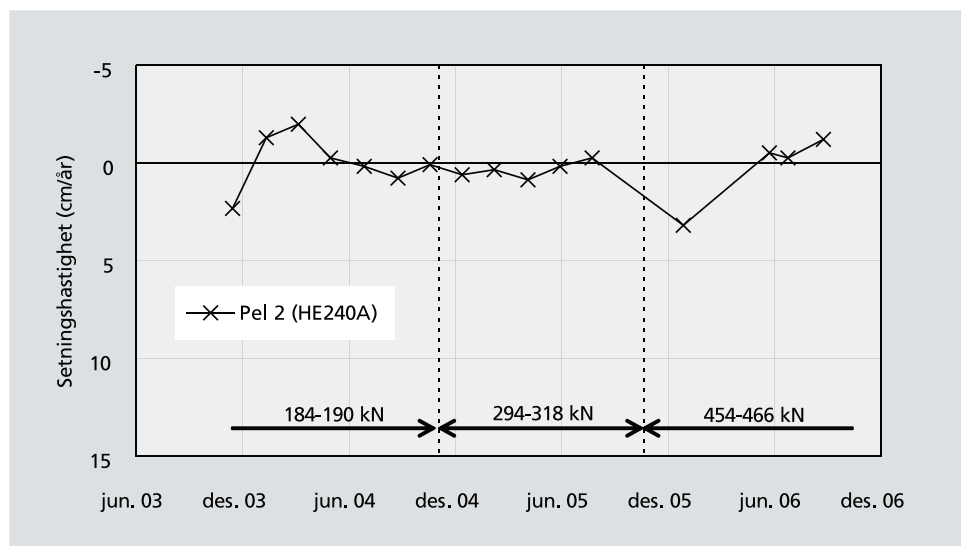


Figur 13. Temperatur langs referansepel (pel 4) og i luft.

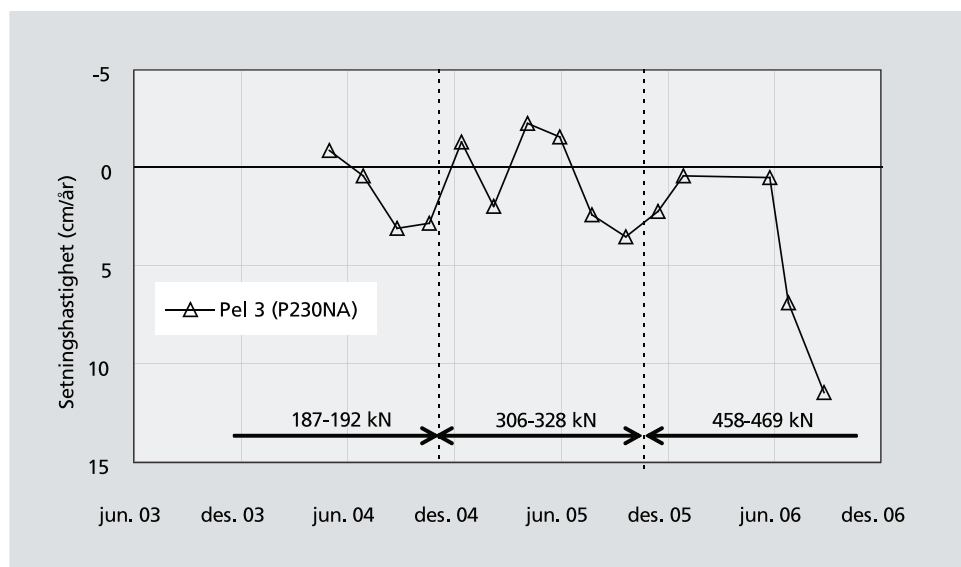
Figur 14. Setningshastighet for pel nr 1 (11,8 m lang HE240A).



Figur 15. Setningshastighet for pel nr 2 (9,2 m lang HE240A).



Figur 16. Setningshastighet for pel nr 3 (7,0 m lang P230NA).



antas primært å skyldes lengdeutvidelse av pelene som følge av temperaturendringer.

Pelekassa er åpen i toppen, noe som fører til at kassa i perioder blir fylte med regnvann og snø. Belastningen av pelene endres da noe gjennom årstidene. Registrert belastningsintervall for de ulike lasttrinn er vist på figurene 14-16.

Normalisert setningshastighet

Som nevnt tidligere er langtidskryp ofte dimensjonerende for peler i frossen jord. Det finnes begrenset tilgjengelig krypdata for salt permafrost, men man vet med sikkerhet at salt i porevannet reduserer skjærstyrken og øker kryphastigheten. En vanlig tilnærming i forbindelse med dimensjonering av peler i permafrost er å vurdere pelenes setningshastighet. Sammenhengen for normalisert setningshastighet er vist i ligning 1 neden-

for, og forutsetter konstant tangentiell skjærspenning og konstant temperatur i grunnen /9, 10/.

$$\frac{\dot{u}_a}{a} = \frac{3^{(n+1)/2} \cdot B \cdot \tau_a^n}{n-1} \quad (\text{fign. 1})$$

hvor

\dot{u}_a = setningshastighet [m/år]

a = peleradius [m], omskrevet radius for HE240A er lik 0,1497 m og for P230NA lik 0,1465 m

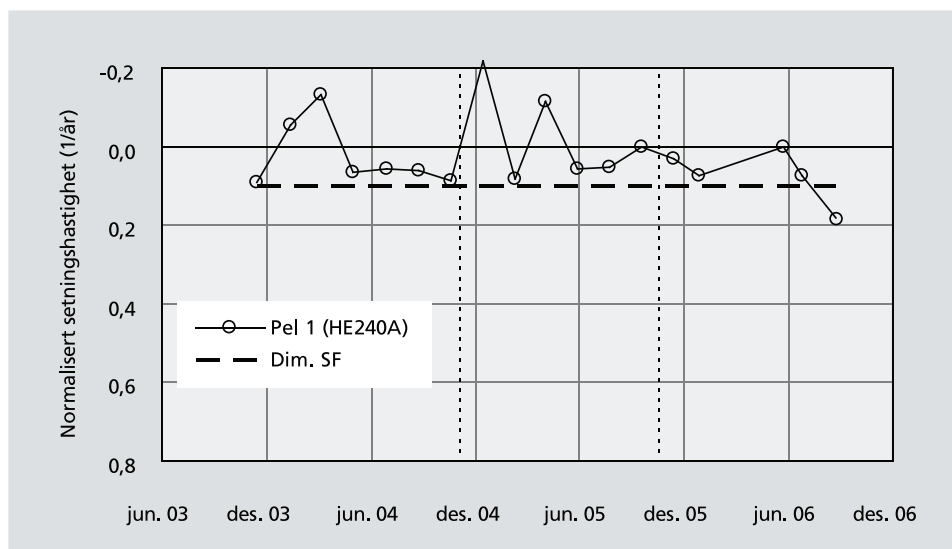
n = krypeksponent som i vårt tilfelle settes lik 3 [-]

B = krypcoeffisient som er avhengig av temperatur og saltinnhold [kPa⁻ⁿ · år⁻¹]

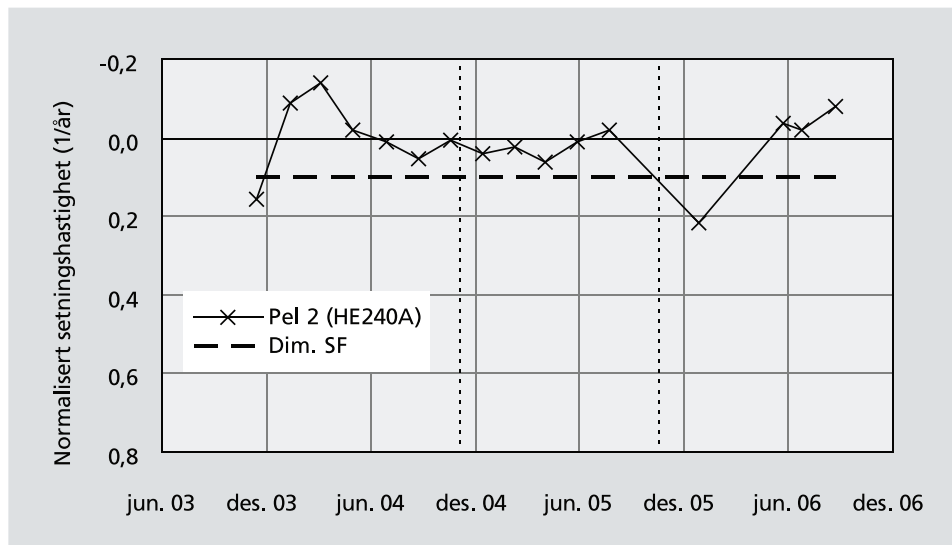
τ_a = sidefriksjon langs pelen [kPa]

Sammenhengen i ligning 1 forutsetter at det er full kontakt mellom pel og jord/slurry.

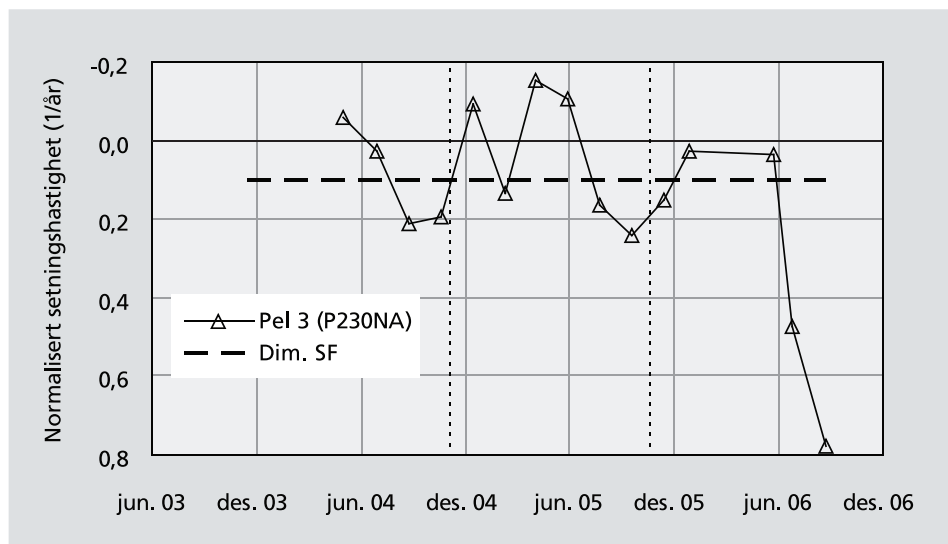
Figur 17. Normalisert setningshastighet for pel nr 1 (11,8 m lang HE240A).



Figur 18. Normalisert setningshastighet for pel nr 2 (9,2 m lang HE240A).



Figur 19. Normalisert setningshastighet for pel nr. 3 (7,0 m lang P230NA).



Tabell 3. Pelekapasitet.

Pel	Dybde under terreng (m)	Dim. vert. kapasitet (kN)	Min. vert. kapasitet fra forsøk (kN)
1 (HE240A)	11,8	487	?
2 (HE240A)	9,2	360	>460
3 (P230NA)	7,0	243	~320

Normalisert setningshastighet for pelene er vist i figur 17-19. Til sammenligning er pelene for Svalbard Forskningspark dimensjonert for maksimal normalisert setningshastighet lik $0,1 \text{ år}^{-1}/11, 12/$. Normalisert setningshastighet benyttet for Forskningsparken er for øvrig vist som stiplet linje i figurene.

Figur 19 viser at pel 3 de siste månedene har begynt å sette seg mer enn en normalisert setningshastighet på $0,1 \text{ år}^{-1}$. Det samme er også tilfeller for pel 1, se figur 17. For pel 1 trengs det derimot flere målinger før vi kan konkludere med at pelen har nådd full kapasitet. Pel 2, se figur 18, viser ingen tegn til å ha nådd full kapasitet.

Sammenstilling av dimensjonert pelekapasitet og minimum pelekapasitet fra forsøket er vist i tabell 3. Tabellen forutsetter maksimal normalisert setningshastighet lik $0,1 \text{ år}^{-1}$. For pel 1 er det, som nevnt ovenfor, for tidlig å si om full pelekapasitet allerede er nådd. De foreløpige resultatene viser derimot at kapasiteten til pel 2 og 3 er høyere enn dimensjonert.

Temperatur

Temperaturprofilen i grunnen som er benyttet i forbindelse med dimensjonering av pelene for Svalbard Forskningsparken er basert på statistiske meteorologiske temperaturdata for de siste 30 år /11/, samt temperatur fra forhåndsinstallerte termistorstrenger. Det er ikke tatt hensyn til eventuelle klimaendringer som følge av

global oppvarming /13, 14/. Global oppvarming vil kunne føre til endret temperaturregime i grunnen, med redusert bæreevne av pelere som resultat. Konservativ dimensjonering av pelene for Forskningsparken gjør at pelene har noe reservekapasitet. Denne reservekapasiteten kan være god å ha dersom global oppvarming skulle føre til temperaturøkning av grunnen under Forskningsparken.

Foreløpige konklusjoner

Foreløpige resultater fra pelebelastningsforsøket kan tyde på at pelene for Svalbard Forskningspark er noe konservativt dimensjonert. Dimensjoneringen av pelene er basert på erfaringer fra et begrenset antall pelebelastningsforsøk utført i salt permafrost i Nord-Amerika. Det er tidligere utført et pelebelastningsforsøk i Longyearbyen, men da i tilnærmet saltfri permafrost. På grunn av det relativt beskjedne erfaringsgrunnlaget var det derfor nødvendig å være konservativ i dimensjoneringen. Det nye pelebelastningsforsøket vil forhåpentligvis bidra til at fremtidig dimensjonering i salt permafrost kan utføres noe mindre konservativt.

Referanser

/1/ Nixon JF (1988). Pile load tests in saline permafrost at Clyde River, Northwest Territories Canadian Geotechnical Journal 1988, Vol 25, pp 24-32.

/2/ Biggar KW, Segó DC (1993). Field pile load tests in saline permafrost. 2. Analysis of results, Canadian Geotechnical Journal 1993, Vol 30, Iss 1, pp 46-59

/3/ Biggar KW, Segó DC, Stahl RP (1996). Long-term pile load testing system performance in saline and ice-rich permafrost. Journal of Cold Regions Engineering 1996, Vol 10, Iss 3, pp 149-162.

/4/ Biggar K, Kong V (2001). An analysis of long-term pile load tests in permafrost from the Short Range Radar site foundations. Canadian Geotechnical Journal 2001, Vol 38, Iss 3, pp 441-460.

/5/ Bredesen BA, Gregersen O, Puschmann O (1988). Long term settlement test (3 years) for concrete piles in permafrost. V International Conference on Permafrost in Trondheim, Norway, August 1988. Proceedings Vol 2, pp 1206-1211.

/6/ Norges Geotekniske Institutt (1994). UNIS-bygget på Svalbard. Grunnundersøkelser. Rapport nr. 930060-1, datert 4. februar 1994.

/7/ Norges Geotekniske Institutt (2002). Svalbard Forskningspark Grunnundersøkelser. Rapport nr. 20021442-1, datert 3. oktober 2002.

/8/ Norges Geotekniske Institutt (2004). Pelebelastningsforsøk – Longyearbyen, Svalbard. Feltarbeider og instrumentering Rapport nr. 20041071-1, datert 6. august 2004.

/9/ Andersland OB, Ladanyi B (2004) Frozen Ground Engineering. American Society of Civil Engineers. John Wiley & Sons, Inc. Second edition, 2004

/10/ Morgenstern NR, Roggensack WD, Weaver JS (1980) The behaviour of friction piles in ice and ice-rich soils. Canadian Geotechnical Journal 1980, Vol 17, pp 405-415.

/11/ Norges Geotekniske Institutt (2002). Prosjekt 20021214 - Svalbard Forskningspark. Fundamentering. Teknisk notat til AS Frederiksen, datert 16. oktober 2002.

/12/ Instanes A, Instanes D (1999). Pile design in saline permafrost at Longyearbyen. International Conference on Cold Regions Engineering, 10th, Lincoln, NH, August 16-19, 1999.

/13/ Instanes A. (2000). Permafrost temperature to be used in design of infrastructure on Svalbard Foredrag "International Workshop on Permafrost engineering", Longyearbyen, 18-21. juni 2000.

/14/ Instanes A. (2003). Climate change and possible impact on Arctic infrastructure 8th International Conference on Permafrost, Zürich, Sveits, 21-25. juli 2003.

Remote sensing of permafrost hazards in mountains

Fjernmåling av faremomenter ved permafrost i høyfjellsområder

Andreas Käab, Universitetet i Oslo (UiO) (kaeab@geo.uio.no)

Summary

Present atmospheric warming especially affects terrestrial systems with surface and subsurface ice involved. Norway with its significant areas covered by glaciers and underlain by permafrost is thus particularly vulnerable to climate change. Permafrost (and glacier) hazard assessments may become increasingly difficult because estimates of hazard potentials based on historical data alone will not be sufficient anymore under new environmental conditions.

Empirical knowledge will have to be replaced by improved process understanding (in particular concerning slope stability), spatial modelling of hazard potentials, and intensified monitoring activities, not least by remote sensing. Down-scaling approaches from initial regional-scale assessments of hazard potentials towards high-resolution- and precision observations and simulations at selected sites are needed as a response to the current environmental changes. In this contribution an overview is given of permafrost hazards in mountains and of remote sensing methods for assisting the detection and observation of corresponding hazard source areas.

Sammendrag

Global oppvarming påvirker jordens systemer med is på overflaten og under overflaten. Norge med sine betydelige områder med isbreer og permafrost er derfor spesielt sårbar for klimaendringer. Det blir vanskeligere å vurdere terrengmessige endringer og fare for skred og ras utelukkende fra historiske data under nye miljøforhold. Empirisk kunnskap vil måtte erstattes med økt forståelse av naturprosessene (spesielt skråningsstabilitet), forbedret modellering og intensiverte overvåkningstiltak – ikke minst ved fjernmålingsteknikker. Metoder for nedskalering av farekart i "region-skala" til observasjoner med god

oppløsning og stor presisjon sammen med simuleringer på utvalgte steder er nødvendige for å få tilstrekkelig oversikt under de pågående miljøendringer. Denne artikkelen gir en oversikt over risiko for skred og større terrengendringer i permafrostområder i fjellet og metoder for fjernovervåking som støtte til identifisering og observasjon av risikoområder.

Mountain permafrost hazards

Ground material which is frozen all year round (permafrost) can be the source of various types of natural hazards. Some of these hazards are related to the existence of permafrost alone, others are related to changes in the geotechnical properties of the frozen ground. Basically, permafrost hazards in mountains originate from (1) frozen debris and (2) frozen rock. In rare cases such hazards might directly endanger settlements, for instance, when a rock avalanche is triggered by permafrost warming. More often, however, mountain permafrost hazards affect mountain infrastructure. Construction works, for instance, may be damaged by permafrost-induced debris flows or rockfalls. Installations on creeping permafrost become defective. Construction activities are affected by thaw or instability in frozen material. Buildings and installations influence the ground thermal regime at their base by altering the heat fluxes (e.g. Haeberli, 1992; Instanes, 2005). In some countries, problems related to mountain permafrost have become a significant cost factor for the maintenance or construction of high-mountain infrastructure (Käab et al., 2005a).

Although the direct reach of permafrost-related hazards in mountains is limited, permafrost hazards may be at the beginning of complex and devastating chain reactions, when, for instance, a permafrost-triggered rock-avalanche falls into a lake or fjord and

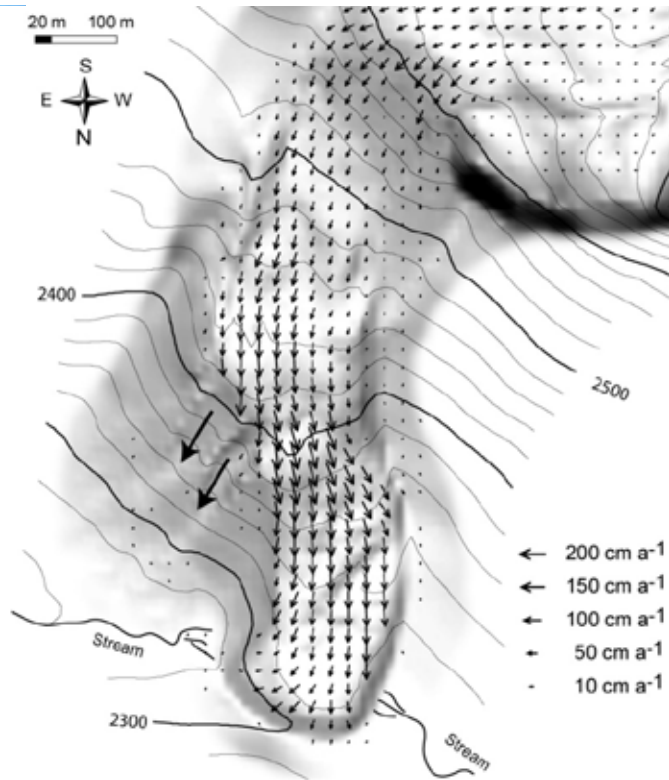


Figure 1. Left: Suvretta rockglacier, Upper Engadine, Swiss Alps. Right: average horizontal surface velocities on the lower part of Suvretta rockglacier, Grisons, measured from aerial photography of 1992 and 1997. The two arrows east of the rockglacier indicate debris flow channels.

causes a tsunami, or when such rock-avalanche causes a much larger ice avalanche with far reach.

Climate change and mountain permafrost hazards

Permafrost as a temperature-driven phenomenon is highly sensitive to changes in ground temperature, especially when ground ice is involved. Questions arise, thus, if and to what extent climate change influences the magnitude and probability of potentially hazardous processes related to mountain permafrost. Marginal or discontinuous permafrost occurrences, such as those found in mainland Norway (Isaksen and Solli, 2005; Heggem, 2005), are in particular affected by ground temperature warming, because the ground temperatures in such permafrost are often close to the melting point of ice at 0 °C, one of the most important and effective thresholds in nature (Instanes, 2005).

Remote sensing of mountain hazards

Assessment and management of permafrost hazards requires the application of modern integrative earth-

observation techniques for a number of reasons (Kääb et al., 2005b):

- Typically, related hazard source areas are situated in remote high-mountain regions, often difficult to access physically for topographic, political and/or security reasons.
- The remote location of most hazard sources, the potential process interactions and chain reactions, and the far reach of some of the high-mountain hazards require remote sensing sensors capable to cover large areas at once.
- Climate change induces disturbance in permafrost (and glacier) equilibrium and can shift hazard zones beyond historical knowledge. In addition, human settlements and activities increasingly extend towards endangered zones in many regions. As a result, historical data alone are not sufficient any more for hazard assessments and have to be combined with new observation and modelling approaches.
- Due to the rapid change of high-mountain environments, hazard assessments shall be undertaken routinely and regularly, combined with continuous monitoring. Remote sensing is particularly suited for both regular and rapid observation.

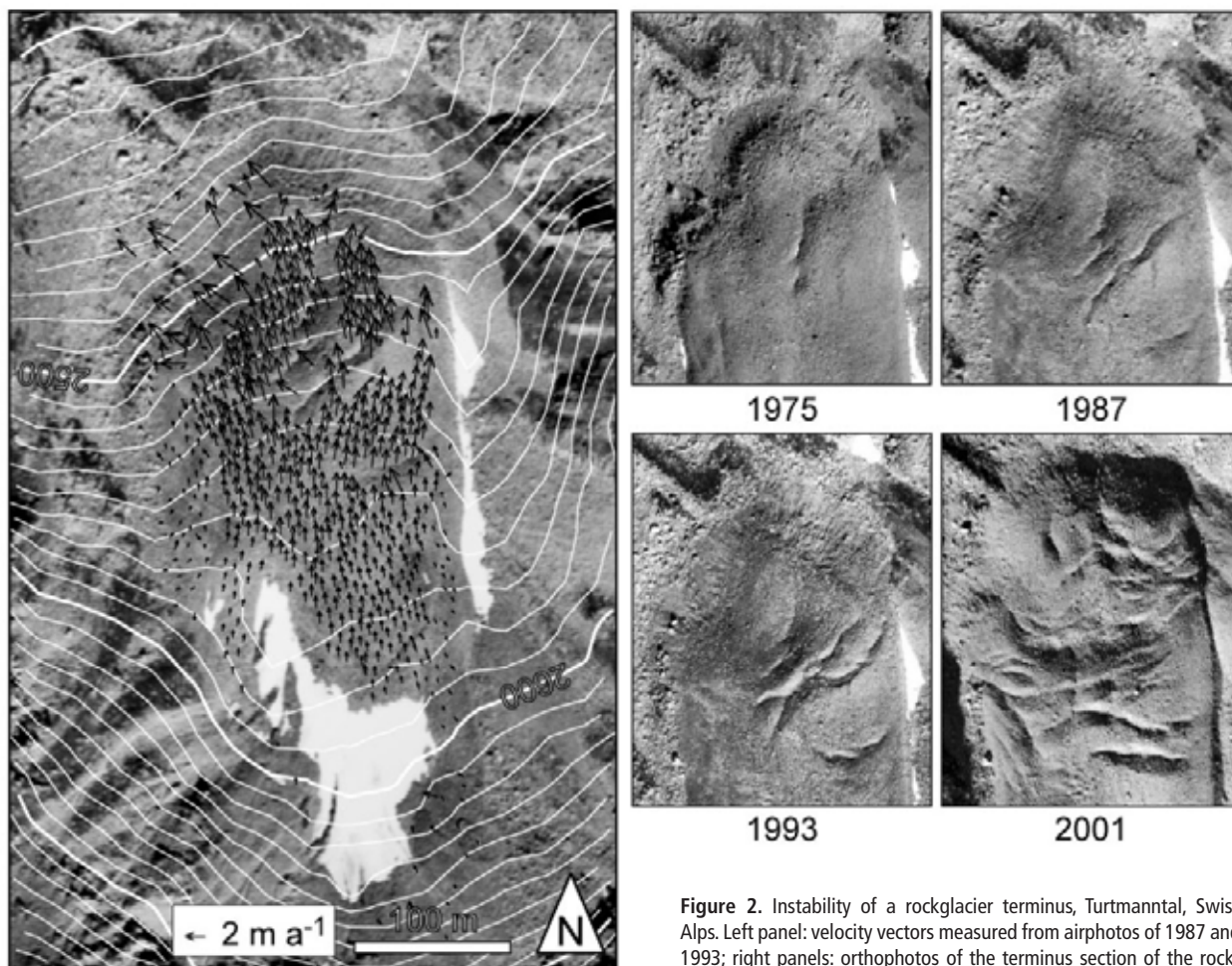


Figure 2. Instability of a rockglacier terminus, Turtmanntal, Swiss Alps. Left panel: velocity vectors measured from airphotos of 1987 and 1993; right panels: orthophotos of the terminus section of the rockglacier. Images of 1975, 1987, and 1993 are courtesy of swisstopo; the 2001 image is a linear array CCD (pushbroom) image taken by the HRSC-A camera, courtesy of Department of Geography, University of Bonn. The rockglacier instability led to enhanced rockfall and required construction of a protection dam (not depicted) (see also Roer et al., 2005).

- Where direct access to the hazard sources is hindered, and/or large areas have to be covered, remote sensing techniques represent often the most cost-efficient solution for mapping and monitoring.

Recent developments in ground-based, airborne and spaceborne remote sensing open up new possibilities for the assessment of permafrost related hazards (Kääb et al., 2005b). Remote sensing will therefore substantially gain importance for such works in the near future.

Frozen debris

a) Hazards from frozen debris slopes

Creeping mountain permafrost, often forming so-called rockglaciers, may be the source of a number of natural hazards:

- Rockglaciers represent an efficient long-term debris transport system. They are able to displace debris volumes in the order of 10^3 to 10^4 m³ per millennium into steep flanks or channels, where they contribute to the formation of potential debris flow starting volumes (Hoelzle et al., 1998) (Fig. 1).
- Rockglacier advance leads to frequent rock falls along the steep rock glacier front. This process represents a hazard endangering e.g. hiking paths or other infrastructure, under special topographic conditions, however, also larger areas.
- Rock glacier sections might become unstable. Such rockglacier slides enhance the rock fall activity or debris flow formation (Kaufmann and Ladstädter, 2003; Kääb et al., 2005b; Roer et al., 2005) (Fig. 2).

Ground warming as recently observed in some mountain ranges is able to increase the above-cited hazards. Increasing creep rates are, for instance, currently

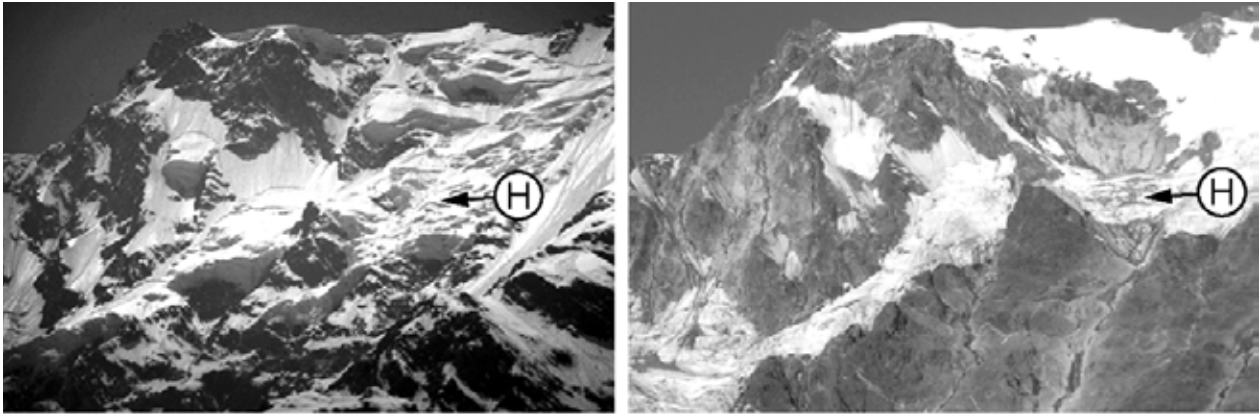


Figure 3. Upper part of the Mont Rosa east face, Italian Alps, in the mid-1980s (left, photo W. Haeberli) and on 6 August 2003 (right, photo A. Kääh). Some steep glaciers have totally disappeared; some have significantly lost mass. In the recently de-glaciated zones drastic mechanical, thermal, hydraulic and hydrological changes affect the frozen and unfrozen rock and debris deposits, and cause increased rock fall activity. Zones of increased rock-fall activity are to the right of the right image, above and below a steep hanging glacier (H).

observed for a number of rockglaciers in the European Alps (Kääh et al., 2006).

Ice-rich permafrost influences the hydrology and the geotechnical properties of debris slopes. Ground water concentration above the permafrost table is able to trigger active layer detachments or debris flows. Thawing permafrost in debris slopes might lead to complex hydrological interactions including water storage in unfrozen caverns, and enhanced melt water release. Ground ice cements debris slopes. In the case of thaw, slope stability is decreased. On the other hand, ice-cemented debris prevents retrogressive erosion caused by debris flows (Zimmermann and Haeberli, 1992).

In cold mountain regions, ground thermal conditions in moraines are often a crucial factor in the damming of moraine lakes. Permafrost or near-permafrost conditions support the long-term preservation of dead ice bodies, which leave cavities when they melt (Richardson and Reynolds, 2000). For another class of lakes – thermokarst lakes – permafrost represents the fundamental condition of their formation through positive feedback mechanisms of water convection and ground ice melt.

In these cold mountain regions, glaciers and permafrost often coexist in close spatio-temporal proximity. For instance, permafrost may be able to penetrate into recently deglaciated glacier forefields, to alter the thermal, hydrological and dynamic conditions of thick glacial deposits, and to influence related hazards. Such effects are of increasing interest in the light of the current drastic worldwide glacier retreat.

b) Remote sensing of frozen debris slopes

A number of remote sensing methods are able to assist the observation of frozen debris slopes (Kääh et al., 2005b):

- Monitoring of ground displacements is possible from repeat terrestrial photographs, air-photos or high resolution satellite images using image matching techniques (Figs 1 and 2). This method is particularly interesting where, like in Norway, old air-photos exist and can be compared to more recent ones. The accuracy of the method is in the cm-dm range.
- Ground-based or spaceborne radar interferometry is able to measure ground deformation with mm-accuracy for suitable terrain and imaging conditions.
- Thaw settlement or frost heave, or other processes which result in a change in terrain geometry can be quantified by subtracting repeat high-precision digital terrain models (DTM). Such DTMs can be obtained from terrestrial or aerial photogrammetry, terrestrial and airborne laserscanning, or airborne radar interferometry.
- Furthermore, repeat visual inspection of repeat remotely sensed data or other change detection techniques can be quite useful in order to identify changes on the terrain surface, which might hint to hazards (e.g. formation of ground cracks, small landslides and debris flows, changes in vegetation, etc.).
- Where permafrost-glacier interactions play a role in a hazard potential, monitoring of glacier changes can be advisable using mapping and change detection techniques based on repeat air-photos or satellite imagery (Kääh, 2005).

Frozen rock walls

a) Hazards from frozen rock walls

A second class of permafrost hazards concerns frozen rock walls. Permafrost in rock faces leads to ice-filled discontinuities, and influences the rock hydrology and the hydrostatic pressure. Steep temperature gradients

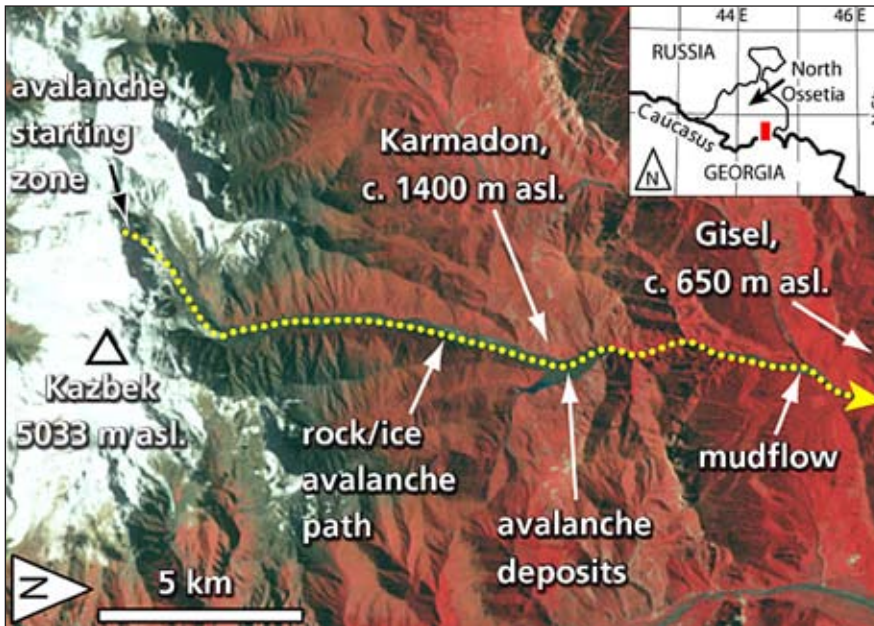


Figure 4. Upper panel: Overview of the 20 September 2002 rock-ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus. Lower panel: avalanche starting zone (see upper panel) shortly after the event (photo: I. Galuschkin).

Complex thermal (permafrost, steep glaciers), hydraulic and geological conditions in the rock face to the upper right of the photo are believed to have been involved in the formation of rock-ice avalanches which finally triggered the rupture and shearing off of the entire tongue of Kolka glacier (right and lower middle of the photo).



at the surface zones cause the transport and refreezing of free water and subsequent growth of ice lenses. The resulting increase in pressure is able to destabilize the rock locally (Haerberli et al., 1997; Wegmann et al., 1998).

With a rise in temperature, frozen rock joints reach minimal stability at temperatures between $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, i.e. even before thaw (Davies et al., 2001). In parallel, the hydrostatic pressure within the rock wall might change. As a consequence, enhanced rockfall activity and rock avalanches are expected in particular for the lower boundary of permafrost distribution (Noetzli et al., 2003).

Complex thermo-mechanical conditions are found for partially glacier-covered alpine rock faces (Fischer et al., 2006). Through advection of temperate firn, the base of steep glaciers might be temperate or compa-

rably warm. At the same time, enhanced heat flux at the front of such glaciers leads to cold frontal sections stabilizing the glacier front. Though little understood, it is clear that changes in the surface temperatures can cause highly complicated feedback mechanisms and chain reactions both for rock and glacier stability. In that context, the retreat of steep glaciers and the connected uncovering of rock might have even more drastic and rapid consequences than a rise in mean annual air temperature itself. Beside the thermally-governed impacts, retreat of steep glaciers leads to mechanic changes in the underlying and surrounding rock wall (de-buttressing).

Indeed, increasing rockfall activity, as currently observed in the European Alps, and a number of recent large rock avalanche disasters might have been influenced by thermo-mechanical changes in the source

rock-faces (Fig. 3). Under the most recent events is the 20 September 2002 rock-ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus, where a combined rock-ice avalanche of approximately 10 million m³ triggered the disastrous shear-off of an entire glacier tongue (over 100 million m³). The resulting avalanche and mudflow killed more than 120 people (Haeberli et al., 2005) (Fig. 4).

b) Remote sensing of frozen rock walls

In principle, similar remote sensing methods can be applied to frozen rock walls as useful for debris slopes. However, the difficult topographic conditions of rock walls severely limit the application of most remote sensing methods. Often, parts or entire rock faces are hidden in the images due to adjacent topography or depicted with strong distortion due to the steep surface slope. The most promising remote sensing techniques for monitoring rock faces include thus

- aerial photogrammetry for mapping and quantifying surface changes,
- terrestrial imaging, for instance using automatic cameras,
- terrestrial non-contact laser-ranging or laserscanning for deriving (repeat) high-resolution DTMs of rock faces,
- ground-based radar interferometry.

The three latter techniques can be installed as automatic sensor stations with direct data transfer through telecommunication. The techniques can thus also be used in early warning systems.

Challenges and perspectives

Present atmospheric warming especially affects terrestrial systems with surface and subsurface ice involved. Norway with its significant areas covered by glaciers and underlain by permafrost is thus highly vulnerable to climate change. Permafrost (and glacier) hazard assessments may become increasingly difficult because estimates of hazard potentials based on empirical data from the past (e.g. historical documents, statistics, geomorphological evidence) will not be directly applicable under new environmental conditions. Empirical knowledge will have to be replaced in parts by improved process understanding (in particular concerning slope stability), spatial modelling of hazard potentials, and intensified monitoring activities, not least using remote sensing methods.

Downscaling approaches from initial regional-scale assessments of hazard potentials towards high-resolution and -precision observations and simulations at selected sites are needed as a response to the current environmental changes. High-magnitude low-fre-

quency events such as huge rock or combined rock-ice avalanches and their relation to changes in permafrost conditions represent a special challenge in risk assessment. In that view, particular scientific efforts are necessary for understanding the complex spatio-temporal, thermo-mechanical processes in glacierized and frozen rock walls, and large debris bodies under permafrost conditions. The impacts of environmental change on hazard potential need to be continually monitored and a rapid transfer of this information is critical for the successful mitigation of hazards in highly sensitive mountain environments.

References

- Davies, M.C.R., O. Hamza and C. Harris. 2001. The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*. 12(1): 137-144.
- Fischer, L., A. Kääb, C. Huggel and J. Noetzi. 2006. Geology, glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high-mountain rock wall: The Monte Rosa east face. *Natural Hazards and Earth System Sciences*: in press.
- Haeberli, W. 1992. Construction, environmental problems and natural hazards in periglacial mountain belts. *Permafrost and Periglacial Processes*. 3(2): 111-124.
- Haeberli, W., M. Wegmann and D. Vonder Mühll. 1997. Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Eclogae Geologicae Helvetiae*. 90: 407-414.
- Haeberli, W., C. Huggel, A. Kääb, S. Oswald, A. Polvoj, I. Zotikov and N. Osokin. 2005. The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002 - an extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia (Russian Caucasus). *Journal of Glaciology*. 47(156): 111-122.
- Heggem E.S.F. 2005. Mountain permafrost distribution and ground surface temperature variability in Southern Norway and Northern Mongolia - spatial modelling and validation. Series of dissertations submitted to the Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo. No. 419.
- Hoelzle, M., S. Wagner, A. Kääb and D. Vonder Mühll. 1998. Surface movement and internal deformation of ice-rock mixtures within rock glaciers in the Upper Engadin, Switzerland. 7th International Conference on Permafrost. 57. Collection Nordicana. 465-472.

Isaksen, K, Sollid JL. 2005. Permafrosten i Norge i dag. Frost i Jord 2005. Statens vegvesen, Teknologivdelingen. 108: 25-30.

Instanes, A. 2005. Klimaendringer og konsekvenser for fundamentering og infrastruktur I kalde strøk. Frost i Jord 2005. Statens vegvesen, Teknologivdelingen. 108: 13-19.

Kääb, A. 2005. Remote sensing of mountain glaciers and permafrost creep. Schriftenreihe Physische Geographie. Glaziologie und Geomorphodynamik. 48. University of Zurich.

Kääb, A., J.M. Reynolds and W. Haeberli. 2005a. Glacier and permafrost hazards in high mountains. In: U.M. Huber, H.K.M. Bugmann and M.A. Reasoner (Eds.), Global Change and Mountain Regions (A State of Knowledge Overview). Advances in Global Change Research. Springer, Dordrecht. 225-234.

Kääb, A., C. Huggel, L. Fischer, S. Guex, F. Paul, I. Roer, N. Salzmann, S. Schlaefli, K. Schmutz, D. Schneider, T. Strozzi and W. Weidmann. 2005b. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. Natural Hazards and Earth System Sciences. 5: 527-554.

Kääb, A., R. Frauenfelder and I. Roer. 2005. On the reaction of rockglacier creep to surface temperature variations. Global and Planetary Change: In press.

Kaufmann, V. and R. Ladstädter. 2003. Quantitative analysis of rock glacier creep by means of digital photogrammetry using multi-temporal aerial photographs: two case studies in the Austrian Alps. Eighth International Conference on Permafrost. 1. Balkema. 525-530.

Noetzli, J., M. Hoelzle and W. Haeberli. 2003. Mountain permafrost and recent Alpine rock-fall events: a GIS-based approach to determine critical factors. 8th International Conference on Permafrost. Balkema. 827-832.

Richardson, S.D. and J.M. Reynolds. 2000. Degradation of ice-cored moraine dams: implications for hazard development, Debris Covered Glaciers. 187-197.

Roer, I., A. Kääb and R. Dikau. 2005. Rockglacier kinematics derived from small-scale aerial photography and digital airborne pushbroom imagery. Zeitschrift für Geomorphologie. 49(1): 73-87.

Wegmann, M., G.H. Gudmundsson and W. Haeberli. 1998. Permafrost changes in rock walls and the retreat of alpine glaciers: a thermal modelling approach. Permafrost and Periglacial Processes. 9(1): 23-33.

Zimmermann, M. and W. Haeberli. 1992. Climatic change and debris flow activity in high-mountain areas - a case study in the Swiss Alps. In: M. Boer and E. Koster (Eds.), Catena Supplement 22. 59-72.

Protection against differential icing on insulated pavements: Applying the Quebec approach to Scandinavia

Beskyttelse mot økt ising på isolerte vegoverbygninger: Anvendelse av Quebec-metoden for skandinaviske forhold

Jean Côté, Department of civil engineering, Laval University, Quebec, Canada. (Jean.Cote@gci.ulaval.ca)

Jean-Marie Konrad, Department of civil engineering, Laval University, Quebec, Canada. (Jean-marie.konrad@gci.ulaval.ca)

Summary

The presence of an insulating layer in pavement structures generates a cooling effect at the surface which can lead to slippery conditions on insulated pavement sections while adjacent conventional pavement sections have dry surfaces. One way to control the occurrence of this phenomenon called differential icing is to place a granular protection layer atop of the insulation. A comprehensive research project that was lead in the Province of Quebec where the results of a field study were integrated in numerical thermal analyses in pavements to evaluate the risk of differential icing and to develop a new rational design tool based on local climate conditions and pavement material properties. The article summarizes the Quebec design approach and discusses the challenges of generalisation to Scandinavian conditions.

Sammendrag

Bruk av isolasjon i vegoverbygning medfører under visse forhold en avkjølingseffekt på overflaten som kan gi ising og glatt føre på delstrekninger med isolasjon, mens tilstøtende konvensjonelt oppbygde (ikke-isolerte) delstrekninger har tørr overflate. En måte å kontrollere dette fenomenet på (isingsforskjell) er å legge et granulært beskyttelseslag med tilstrekkelig tykkelse over isolasjonen. Et omfattende studium av dette er utført i den kanadiske provisen Quebec. Resultatene fra feltundersøkelser er benyttet i numeriske termiske analyser for vegoverbygning for å vurdere risikoen for isingsforskjell og å utvikle et nytt rasjonelt beregningsverktøy basert på lokale klimaforhold og overbygningens materialegenskaper. Artikkelen oppsummerer denne

beregningsmetoden (Quebec-metoden) og diskuterer utfordringene ved en generalisert tilpasning til skandinaviske forhold.

Introduction

Innovative pavement design using materials with contrasting thermal properties compared to conventional pavement materials can induce drastic changes in the heat balance at the pavement surface. This situation occurs in roads where polystyrene thermal insulation is used to reduce frost penetration into subgrade soils for the prevention of severe pavement degradation caused by frost heave. Early in the freezing season, the heat flow from the underlying soil layers towards the surface is considerably reduced in insulated sections, which leads to higher surface cooling than in adjacent conventional pavement sections. This in turn, may result in icing conditions on insulated sections while the adjacent conventional sections may still be ice free. This phenomenon is commonly called differential icing.

Refsdal (1973), Gustafson (1981), Gandahl (1987) and Gustavsson et al. (2002) observed that the occurrence of differential surface icing is generally reduced with increasing depths of insulating layer. Based on test field studies of Gustafson (1981), Scandinavian countries specify to place a 300 to 600 mm thick granular protection above the insulation. In the Province of Quebec, Canada, the Ministry of Transportation (MTQ) recommends to use a 450 mm thick granular protection regardless of the local climate conditions and pavement properties. However, despite the use of this granular protection layer, differential icing situations on insulat-

ed pavement sections are reported regularly in colder areas of Quebec. The predominant insulation type used in Quebec is the high density extruded polystyrene ($\rho = 40 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0.03 \text{ W/mK}$).

To enhance the understanding of the differential icing phenomenon, a research program was initiated by Quebec Ministry of Transportation and CREIG (NSERC industrial research chair on operation of civil engineering infrastructures submitted to frost action). The research consisted of three parts: the first part was devoted to a field study of hoarfrost on a full scale instrumented test site, the second part was concerned with the numerical modelling of surface temperature as a function of local climate conditions and pavement configuration and the third part dealt with the development of new design approach to minimize the risk of differential icing on insulated pavements.

The article briefly summarizes the major findings of the study of differential icing on insulated pavements in the climate context of the Province of Quebec and exposes the main challenges for possible generalisation to other cold regions of the world, such as Scandinavian countries.

Field study of differential icing on insulated pavement test section

A comprehensive field study has been lead in Sweden (Gustafson 1981) to assess the influence of insulation in pavements on the surface temperature. This study inspired numerous road administrations for the development of design guidelines taking into account the risk of differential icing formation on insulated pavements. However, given the differences in the climatic conditions between Scandinavia and the Province of Quebec, it appeared that the Swedish study needed to be complemented with a field study in local climate conditions. Therefore, a full-scale test site was built in a parking lot of the Campus of Laval University in Quebec (1999) where three test sections were instrumented with soil and surface temperature sensors, and with a climate weather station (Côté and Konrad 2002). Based on the knowledge acquired in the Swedish study on the effect of the insulation layer on the pavement surface temperature, it was decided to build two sections (no. 1 and no. 3) with very shallow depth of insulation in order to create as much as possible icing events in a short period of time. The insulation depth were equal to 65 mm in section no. 1, which is directly below the asphalt layer and equal to 230 mm in section no. 3 which is below an asphalt layer of 65 mm and a granular protection of 165 mm. Control section no. 2 was built without insulation.

Figure 1 shows a picture taken in December 1999 where test section no. 1 experienced surface icing and while the surface of the two other sections remained ice



Figure 1. Hoarfrost observation on section 3 (front) in the morning of Dec. 2nd 1999.

free. During the winter season 1999 – 2000, several differential icing situations were observed for various surface temperature conditions ranging from 0°C to -15°C . No icing situations on the surface of the control test section were observed during the period of the study.

The differential icing situations observed in this field study are related to the movement of air moisture to the cold surfaces which created sheets of white ice crystals called hoarfrost. These observations agree with those from Gustafson (1981). Differential icing situations related to hoarfrost formation on pavements with insulated sections occur when the surface temperature of the insulated sections ($T_{s \text{ ins}}$) became lower than the frost point temperature (T_f) while the surface temperature of the adjacent conventional sections ($T_{s \text{ conv}}$) remained higher than T_f (eq. [1]). It is noted that the frost point is the sub-zero equivalent of the dew point ($T_d \geq 0^{\circ}\text{C}$ and $T_f < 0^{\circ}\text{C}$) and both these parameters are computed from the temperature and relative humidity of air using relationships given in Côté and Konrad (2002).

$$[1] T_{s \text{ ins}} < T_f < T_{s \text{ conv}}$$

Similarly, at temperature above 0°C , air moisture can condensate on a cold surface when T_s is smaller than T_d . Subsequent surface cooling can then lead to differential icing situations (eq. [2]) by the formation of a transparent ice film also known as black ice. It is noted that no black ice formation has been observed during the field study.

$$[2] (0^{\circ}\text{C} < T_{s \text{ ins}} < T_d < T_{s \text{ conv}}) \text{ OR } (0^{\circ}\text{C} < T_{s \text{ ins}} < T_{s \text{ conv}} < T_d) \\ \Rightarrow T_{s \text{ ins}} < 0^{\circ}\text{C} < T_{s \text{ conv}}$$

It was observed that every differential icing event occurred during nights with clear sky and low wind speed where the radiation balance was approximately

equal to -70 W/m^2 to -90 W/m^2 (heat loss). Similar observations were made by Gustafson (1981). Moreover, the differential icing events were observed on test section 3 only when the base-course layer was completely frozen. The freezing of water in the granular materials released sufficient latent heat towards the surface to compensate for the presence of the insulation. After complete freezing of the granular material placed above the insulation (dry polystyrene), the surface became more sensitive to rapidly changing climate conditions and cooled down more easily than that of the conventional test section (without insulation) in which latent heat was still released towards the surface from the freezing of moist granular materials.

Therefore, two conditions must be present to create differential icing situations in the climate context of Quebec:

- frost penetration front into or below the insulation layer
- highly negative surface heat balance encounter during nights with cleared sky conditions and low wind speed.

Numerical modelling of differential icing conditions

Field studies are generally time consuming and expensive. Therefore, a numerical model able to simulate climate conditions leading to differential icing formation as well as associated thermal regime in pavements was developed to further study the influence of insulation on the pavement surface temperature and the risk of differential icing in the Province of Quebec.

The numerical model was formulated to consider the surface heat balance, the ground heat conduction and the phase change due to soil moisture freezing/thawing. The numerical model and the climate modelling for differential icing conditions are described in details in Côté and Konrad (2005a). The thermal properties of soils and granular materials used for modelling were established using a generalised thermal conductivity model (Côté and Konrad 2005b).

The numerical model allowed to evaluate period of time where there was a risk of icing for different pavement configurations submitted to different climate conditions of the Province of Quebec. It was established that the risks of icing or differential icing formation becomes the highest during the period from mid-October to mid-December for 8 locations covering the different inhabited regions of the Province of Quebec. Figure 2 shows the surface temperature of a typical conventional pavement and a typical insulated pavement (granular protection of 450 mm) as computed for early morning conditions (6h00) and for surface heat balances similar to that observed on the field during monitored differential icing events. The graphs also

show the early morning air temperature and associated frost point temperature as obtained from the Meteorological Service of Canada. It was established that for a conventional pavement without insulation built in Val-d'Or (coldest region studied), it is possible for the early morning surface temperature to drop below the frost point temperature from mid-October to the end of November, which corresponds to the period of high risk of generalised icing (period I). In an insulated pavement, the complete freezing of the granular protection leads to a sudden drop of surface temperature compared to the conventional pavement, which results in a supplementary icing period, corresponding to the period of high risk of differential icing (period DI). For the warmer conditions of Montreal (Fig. 2b), period I ends in the beginning of December. In this region, the modelling results show that the granular protection completely freezes only after the end of period I, and the sudden cooling of surface appears too late to create differential icing. This means that 450 mm of the granular protection prescribed by the Ministry of Transportation is sufficient to avoid most of the differential icing situations (no period DI).

During the remaining part of the freezing season, the general climate conditions lead to surface temperature that are much higher than the air temperature leading thus to very low risk of differential icing due to hoarfrost formation (Côté and Konrad 2005a).

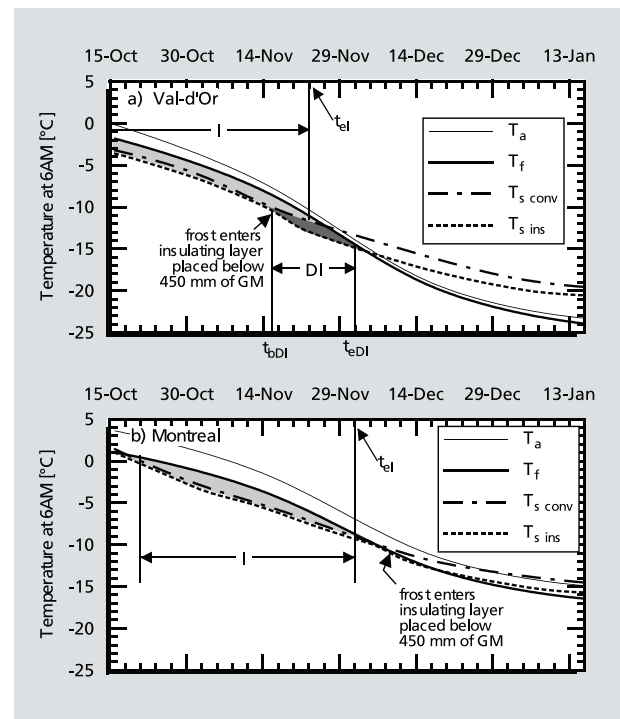


Figure 2. Periods of high risk of icing and differential icing for a) Val-d'Or and b) Montreal.

So clearly, to avoid or at least minimise differential icing on pavements with insulated sections in the climate context of the Province of Quebec, the freezing of the granular protection should be completed only after the end of the period of high risk of generalised icing. In other words, there should be no period DI as shown in Figure 2b.

Pavement design approach to consider the risk of differential icing

Knowing the rate of frost penetration for given climate and pavement conditions and knowing the time corresponding to the end of the period of high icing risk, one can establish the minimum thickness of the granular protection as shown in Figure 3. The frost depths of the conventional and insulated pavement sections are shown by the full and dotted lines, respectively. The rates of frost penetration in the conventional and the insulated pavement sections are given by a_{conv} and a_{ins} . The time at which the base-course (granular protection) begins to freeze is given by symbol t_{bFB} while time t_{el} represents the end of the period of high icing risk. The minimum thickness of the granular protection h_{GP} is thus given by:

$$[3] h_{GP} = (t_{el} - t_{bFB})a_{ins}$$

Numerical analyses (Côté 2000) and field observations (Konrad et al. 1996) revealed that the rates of frost penetration in pavements are nearly constants during the first months of the freezing season.

Given that the rate of frost propagation will depend on climate conditions as well as the thermal properties and configuration of pavement materials, several pavement conditions were analysed in the global climate context of the Province of Quebec in order to evaluate the minimum thickness of the granular protection needed to minimise the risk of differential icing on insulated pavements. Figure 4 shows an example of the thicknesses, h_{GP} , of a granular protection made of crushed granite placed at a dry density of 2200 kg/m^3 and a mean water content of 3.5% needed for different climate conditions as plotted as a function of the mean annual air temperature T_{maa} . The values of h_{GP} range from about 600 mm for the coldest regions to about 330 mm for the warmest regions. The actual standard of the Province of Quebec (dotted line: $h_{GP} = ct = 450 \text{ mm}$) seems to be adequate for the regions with annual air temperature higher than 4°C but is clearly inadequate for the colder regions as the values of h_{GP} can be under estimated by up to 150 mm. This agrees well with the differential icing observations made in the Northern part of Quebec.

Design charts similar to Figure 3 were developed

to consider the influence of insulation thicknesses as well as the water content and type of rocks used as a granular protection (Côté and Konrad 2006). This tool is now in the process of normalisation and integration to the design guides of the Ministry of Transportation of Quebec.

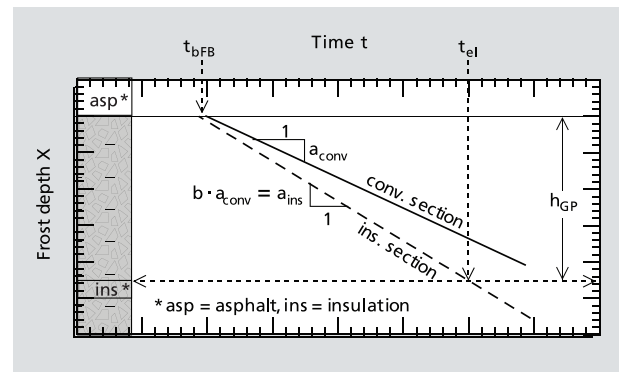


Figure 3. Determination of the minimum thickness of the granular protection in insulated pavements.

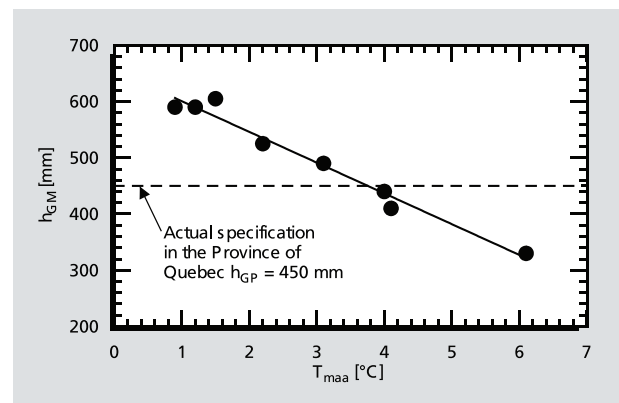


Figure 4. Minimum thickness of the granular protection of eight locations in the Province of Quebec.

Challenges for Generalisation of the Quebec design method

It is anticipated that the design method proposed for the Province of Quebec could be extended to other cold regions of the world such as Norway for the development of adapted design tools minimising the risk of differential icing on insulated pavements. These tools will have to consider the local climate conditions and the various materials that are used in local design practices as discussed below.

The Scandinavian countries are located at much higher latitudes than the inhabited part of Canada. Except for the very Northern part of Canada, the mean

Canadian and Scandinavian temperatures are approximately the same. However, the influence of the oceanic current Gulf Stream and the atmospheric current Jet Stream lead to different annual air temperature distributions. The general climate of Canada is submitted to the Jet Stream which brings warm air from the South or cold air from the North leading to great variations of temperature within one year while in Norway, the climate is regulated by the temperate waters of the Gulf Stream. This is illustrated in Figure 5a, which shows that at given mean annual air temperatures (T_{ma}), the mean freezing and thawing indices (FI, TI) of Norway are lower than those of Canada. The intermediate values for Finland are due to smaller influence of the Gulf Stream given the distance to the ocean. For example, at T_{ma} of about 6°C, which approximately corresponds to Oslo, Helsinki and Montreal, the respective freezing indices are about equal to 370°Cd, 680°Cd and 970°Cd while the respective thawing indices are about equal to 2470°Cd, 2330°Cd and 3210°Cd. The duration of the freezing and thawing seasons (t_f , t_t) are also different from those of Quebec and Canada. Figure 5b shows that for T_{ma} below 5°C, the freezing season (t_f) lasts longer in Scandinavia than in Canada while at T_{ma} above 5°C, t_f is shorter in Scandinavia than in Canada.

These climate features in combination with the high latitudes of the Scandinavian countries compared to those of Quebec and Canada will also greatly influence the surface temperature of pavements. During the freezing season, the solar radiation component to the surface heat balance is much higher in Canada than in Scandinavia. Therefore, the winter surface temperatures are higher than the air temperature in Canada, while Scandinavian studies have shown that the winter surface temperatures are generally lower than the air temperature (Gustafson 1981, Kilpeläinen and Ravaska 1998, Gustafson et al. 2002, Øiseth et al. 2006). This leads to considerably higher risk for differential icing formation on insulated pavements in Scandinavia. This may even lead high risk of differential icing formation during nights with overcast sky, which is generally not the case in Quebec and Canada.

The use of insulating materials such as lightweight clay aggregates and foamed glass as well as lower density base-course materials also differs from the general practices in Quebec and Canada. Their thermal properties and moisture retention characteristics will definitely lead to different pavement thermal behaviour, which will lead to different levels of differential icing risk than for the high density base-course and polystyrene used in Quebec.

The generalisation of the design approach developed for the Province of Quebec to the Norwegian and Scandinavian conditions will therefore necessitate the analyses of surface heat balance and pavement thermal regime with consideration to the specific climate conditions and materials features.

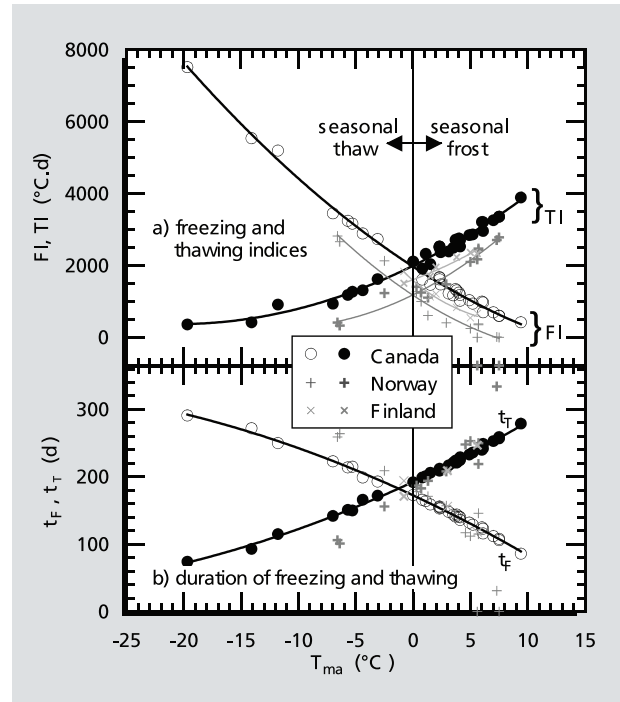


Figure 5. Average climate parameters (30-years or more) for Canada and Scandinavia, a) freezing and thawing indices, b) duration of freezing and thawing periods as analyzed from Environment Canada (2006), Norwegian Meteorological Institute (2006), Finnish meteorological institute (2006) and Saarelainen and Isotalo (2003).

Conclusion

A new rational design method considering the risk of differential icing on insulated pavements has been developed based on field observation and numerical modelling. This method considers the effect of local climate conditions and pavement configurations generally found in the Province of Quebec. The generalisation of this method to other cold regions of the world such as Norway seems to be highly feasible. However, the local climate features and representative material properties must be integrated to the analyses of surface heat balance and thermal regimes in insulated pavements.

References

- Côté, J. 2000. Influence d'un isolant thermique sur la sensibilité au verglas des routes. Ph.D. Thesis, Department of civil engineering, Laval University, Quebec, Canada.
- Côté, J., and Konrad, J.-M. 2002. A field study of hoarfrost formation on insulated pavements, Canadian Geotechnical Journal 39: 547 – 560.

Côté, J., Konrad, J.-M. 2005a. A numerical approach to evaluate the risk of differential surface icing on pavements with insulated sections. *Cold Regions Science and Technology*, vol 43, no. 3, pp 187 – 206.

Côté, J., Konrad, J.-M. 2005b. A generalised thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, pp. 443 – 458.

Côté, J., Konrad, J.-M. 2006. Granular protection design to minimise differential icing on insulated pavements, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 43, pp. 260 – 272.

Environment Canada 2006.

http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/Welcome_e.html.

Finnish Meteorological Institute 2006.

<http://www.fmi.fi/il/index.html>.

Gandahl, R. 1987. Polystyrene foam as a frost protection measure on national roads in Sweden. *Transportation Research Record* 1146: 1 – 9.

Gustafson, K. 1981. Road icing on different pavement structures, Investigation at Test Field Linköping 1976, over the period 1976 – 1980, VTI Report no. 216A. National Road and Traffic Research Institute, Linköping, Sweden.

Gustavsson, H., Ravaska, O., and Hermansson, A. 2002. The effect of insulation on road surface icing. In *Proceedings of the 11th Cold Region Engineering International Conference*, Edited by K.S. Merrill, Anchorage, Alaska, 20 – 22 May 2002. American Society of Civil Engineers, New York.

Kilpeläinen, M., and Ravaska, O. 1998. Modelling of road surface temperatures in winter, In *Proceedings of the 9th Conference on Cold Regions Engineering*, Edited by D.E. Newcomb, Duluth, Minnesota, 27 – 30 September 1998, American Society of Civil Engineers, New York pp. 304 – 315.

Konrad, J.-M., Doré, G., and Roy, M. 1996. Field observations of instrumented highway sections with different frost protections, In *Proceedings of the 8th International Conference on Cold Regions Engineering*, Edited by R.F. Carlson, Anchorage, Alaska, 12 – 16 August 1996. American Society of Civil Engineering, New-York.

Norwegian Meteorological Institute 2006.

<http://met.no/index.shtml>.

Refsdal, G. 1973. The use of thermal insulating materials in highway engineering: results from the Norwegian test roads. *Frost I Jord* 9: 27 – 39.

Saarelainen, S.M.I., Isotalo, J. 2003. Pavement design and thaw weakening in Finland. In *Proceedings of the 82nd*

Transportation Research Board Conference, Edited by TRB, Washington, 12 – 16 January 2003.

Øiseth, E., Hoff, I., Aabøe, R., 2006 Field test comparing frost insulation in road construction. In *Proceedings of the 13th International Conference on Cold Regions Engineering*, Edited by M. Davies and J.E. Zufelt, Orono, Maine, 23-26 July 2006. American Society of Civil Engineering, New York.

Feltforsøk med sammenligning av frostsikringsmaterialer anvendt i vegbygging

Field studies of frost protection materials used in road constructions

Even Øiseth, SINTEF Byggforsk, Trondheim (even.oiseth@sintef.no)

Roald Aabøe, Statens vegvesen Vegdirektoratet, Oslo (roald.aaboe@vegvesen.no)

Inge Hoff, SINTEF Byggforsk, Trondheim (inge.hoff@sintef.no)

Summary

Three products are presently used in Norway as thermal insulation in roads; lightweight clay aggregate, foam glass aggregate and extruded polystyrene boards (XPS). As an evaluation on the present design guidelines for frost insulation and in order to compare the different insulation products, a field test is established in connection with the construction of a new main road (E6) south of Trondheim in Norway. The test site has four different sections. In addition to three sections where each of the three different insulation products are used, one additional section contains ordinary pavement materials produced from crushed rock.

The measurements the first year indicate that the insulation effect is almost as expected for the foam glass section and the XPS section, requiring about 5 times as thick layer with foam glass than XPS. The insulation effect seems to be slightly lower for the expanded clay section.

Sammendrag

Tre produkter anvendes i dag som termisk isolasjonsmateriale i veger; lettklinker, granulert skumglass og plater av ekstrudert polystyren (XPS). For evaluering av foreliggende retningslinjer for frostsikring av veger og for å kunne sammenligne de ulike isolasjonsproduktene er det utført feltforsøk i tilknytning til bygging av en ny hovedveg (E6) syd for Trondheim. Forsøksfeltet er inndelt i fire ulike seksjoner. I tillegg til tre seksjoner hvor de tre isolasjonsproduktene er benyttet, er det også en seksjon med vanlige overbygningmaterialer av knust stein.

Isolasjonsmaterialer anvendt i veger – tidligere og i dag

Knust stein er det mest vanlige materialet som benyttes ved vegbygging i Norge, også for frostsikring. Tilgjengeligheten er god, men da tilfredsstillende frostsikring ved bruk av knust stein kan resultere i en meget tykk overbygning (det bygges maksimalt 1,8 m i Norge uansett frostdyp), så kan bruk av isolasjonsmaterialer for å redusere den totale overbygningstykkelsen være å foretrekke økonomisk. Statens vegvesen har en lang tradisjon med bruk av forskjellige typer isolasjonsmaterialer for vegbygging. Bark ble benyttet i 70-årene og var meget fordelaktig økonomisk på det tidspunktet (materialet var tilgjengelig nesten gratis). Plater av ekstrudert polystyren (XPS) ble anvendt første gang i Norge i 1965. I dag utgjør både lettklinker og granulert skumglass produsert av resirkulert glass alternative løsninger.

Lettklinker

Lettklinker (Figur 1 til venstre) anvendes både som lett fyllmasse og som frostsikring i vegbygging. Materialet anvendes også ofte til andre bygningsmessige formål. Ved å sintrere leire i en spesiell ovn dannes det kuler av ulik størrelse (vanligvis 0 – 32 mm). En typisk løst densitet fra fabrikk er ca. 280 kg/m³. Gjennomsnittlig vanninnhold i en vegkropp er målt til å ligge på omtrent 25 % av vekt tørr masse (7,7 volum %). Den tilsvarende varmeledningsevnen ved 10 °C er 0,18 W/mK, men kan variere betydelig med temperatur og vanninnhold.



Figur 1. Leca lettlinker til venstre, Haspor skumglass til høyre

Granulert skumglass

Skumglass (Figur 1 til høyre) er produsert av resirkulert glassavfall. Skumglassgranulatet har en maksimal kornstørrelse på omtrent 60 mm med kubisk form og kan produseres med ulike densiteter. Typiske densitetsverdier i løs form varierer i området 180 - 250 kg/m³. Deformasjoner og variasjoner i vanninnhold, densitet og kornstørrelse har blitt målt på en del nye veg-anlegg. Vanninnholdet er her funnet å ligge på rundt 20 % av vekt tørr masse (6 volum %), noe som tilsvarer en varmeledningsevne ved 10 °C på 0,155 W/mK. Varmeledningsevnen for skumglass varierer også betydelig med temperatur og vanninnhold.

Plater av ekstrudert polystyren (XPS)

Plater av ekstrudert polystyren er tilgjengelig i kvaliteter med varierende trykkstyrke. Materialets densitet er omtrent 50 kg/m³, og varmeledningsevnen er ca. 0,04 W/mK.

Materialparametere som påvirker frostdybden

Materialparametrene som påvirker frostnedtrengningen er i hovedsak varmeledningsevnen, vanninnholdet, varmekapasiteten og densiteten. Alle parametrene kan variere for ulike anvendelser, konstruksjonsmetoder og materialkvaliteter. For dimensjonering av vegoverbygninger anvendes beste overslagsverdier. Imidlertid kan meget grove materialer også føre til betydelige konveksjonseffekter som kan overstige og dermed svekke effekten av varmeledningsevnen. Parametere som kornfordeling må derfor også vurderes.

Det er mulig å anslå teoretisk frostnedtrengning for ulike materialer på grunnlag av materialparametere målt i laboratoriet. Frostisolerings-effekten for ulike isolasjonsmaterialer kan sammenlignes ved bruk av numeriske modeller for en standard vegoverbygning.

Klimatiske parametere som påvirker frostdybden

De viktigste faktorene som påvirker frostnedtrengning i undergrunnen er lufttemperatur, stråling fra sola, vind og nedbør. Tidsintegralet av lufttemperatur i frostperioden definert som frostmengde (luft) (F) anvendes ved dimensjonering og dette er den viktigste parameteren. Overflatetemperaturen vil avvike fra lufttemperaturen og påvirkes av stråling fra sola, snødybde, varmestråle-utveksling med skyer og gasslag i atmosfæren, nedbør, vind osv. En annen faktor som anvendes ved dimensjonering er årlig middeltemperatur.

FELTFORSØK VED MELHUS

Hovedhensikten med feltforsøkene

Hovedformålet med forsøkene har vært å sammenligne ulike materialer under like feltforhold både ved å undersøke de relative forskjellene og å sammenligne resultatene med beregninger og foreliggende retningslinjer. Resultatene er viktige både for å sikre at retningslinjene i vegnormalene gir ønsket frostsikring, og for å oppnå et riktig konkurranseforhold mellom ulike materialer og løsninger.

Vegnormalene var inntil 2005 hovedsakelig basert på undersøkelser utført på vegkonstruksjoner med isolasjonsplater. Nye feltforsøk og forskning utført på

lettklinker og skumglass indikerer at forholdet mellom nødvendige lagtykkelser er mindre enn det som tidligere er angitt i retningslinjene. En numerisk modell anvendt for å beregne nødvendig lagtykkelse ved bruk av lettklinker viste dessuten at anbefalt tykkelse for isolasjonsplater syntes å være for liten. Feltforsøk med bruk av lettklinker og isolasjonsplater har vært utført tidligere, men det er vanskelig å sammenligne resultatene direkte på grunn av ulike forsøksforhold.

Forsøksområdet ved Melhus

Melhus ligger i Midt-Norge syd for Trondheim. Årsmiddeltemperaturen ved Melhus er 4.5 °C.

Forsøksområdet er en del av en lokalveg nord for Ratbekkbrua som er bygd i tilknytning til den nye hovedvegen, E6. Frostmengden (luft) angitt i "timer grader Celsius" ved Melhus for ulike returperioder er vist i Figur 2 sammen med data fra enkelte andre steder i Norge (T_m = årsmiddeltemperatur). Data er hentet fra Håndbok 018 Vegbygging 2005.

Dimensjonering av vegoverbygning

Dimensjonering av overbygningstykkelser er vanligvis basert på at det oppnås tilstrekkelig bæreevne også i teleløsningen. Feltforsøkene er utført på en lavtrafikkert atkomstveg og nødvendig overbygningstykkelser ble satt til 80 cm for forsøksområdet.

Feltforsøket ble oppdelt i fire ulike seksjoner. En seksjon uten frostisolasjon (som referansefelt) og tre andre seksjoner med henholdsvis XPS, lettklinker og skumglass. Sand ble benyttet til å heve traubunnen til 61 cm under vegoverflaten på forsøksfeltet. På de isolerte seksjonene er nedre del av forsterkningslaget erstattet med isolasjonsmaterialer. På seksjonen med XPS er det benyttet 3 cm tykke plater, og på seksjonene med lettklinker og skumglass er det anvendt lagtykkelse 15 cm (etter komprimering). Oppbyggingen av vegfunda-

mentene for de fire forsøksstrekningene er vist i Figur 3. Fra vegoverflaten og nedover består vegoverbygningen av to 40 mm tykke asfaltlag, et 30 mm tykt avrettingslag og 350 mm knuste steinmaterialer med gradering 20–100 mm. Den nederste delen er forskjellig for de fire seksjonene; enten 150 mm med knuste steinmaterialer eller 150 mm lettklinker eller 150 mm skumglass eller 120 mm knuste steinmaterialer over 30 mm tykke XPS-plater.

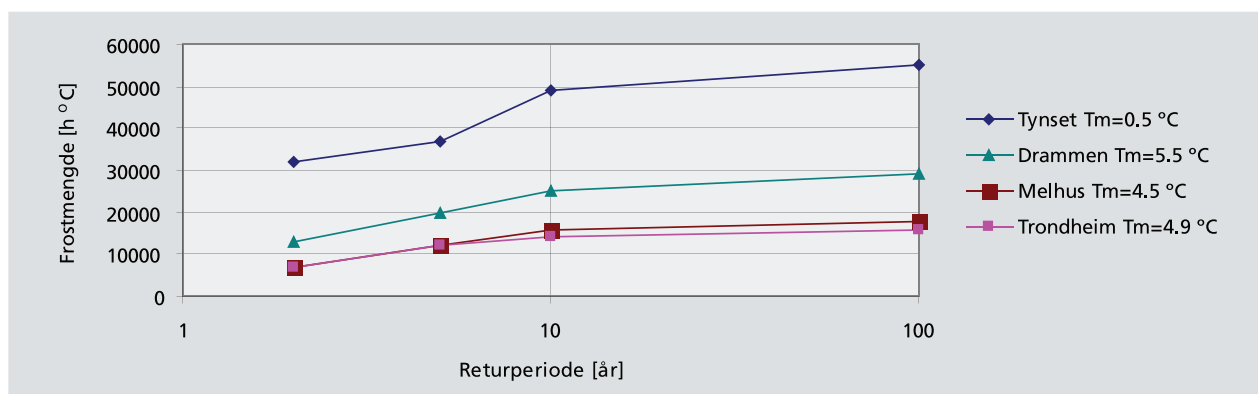
Referanseseksjonen er anslått til å kunne motstå en frostmengde på mellom 1000 og 2000 h°C. De isolerte seksjonene er antatt å kunne motstå en frostmengde på om lag 7000 h°C når en tillater at frosten trenger 5 cm ned i undergrunnen. Dette tilsvarer en gjennomsnittsvinter (2 års returperiode). Basert på beregninger for Trondheim, vil frosten trenge gjennom lettklinkerlaget ved en frostmengde nær 5600 h°C.

På grunn av varmeutveksling med gasslag i atmosfæren ved stråling etc., så er frostmengden basert på overflatetemperaturen vanligvis større enn frostmengden for luft.

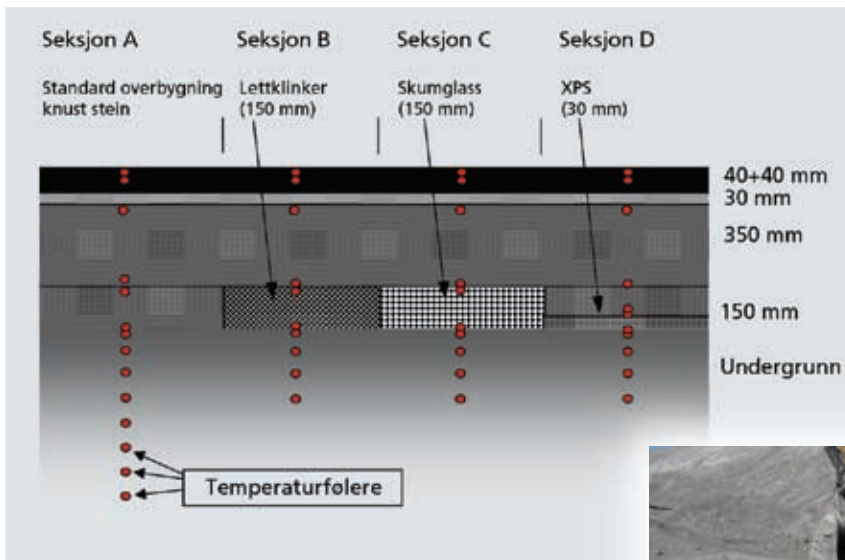
Fra Frost i Jord publikasjon 17 "Sikring mot tele-skader" er forskjellen ved Melhus omtrent 5200 h°C for seksjonen uten isolasjon og omtrent 7000 h°C for de isolerte seksjonene. Det er imidlertid forventet at vegbanen vil være dekket av snø flere ganger gjennom vinteren, noe som vil påvirke overflatetemperaturen. Både lufttemperaturen og overflatetemperaturen blir målt og registrert.

Instrumentering

Forsøksstrekningene er instrumentert med 43 temperaturfølere som er koblet til en analog registreringsenhet for automatisk registrering av temperaturen hvert 10. minutt. Måledataene blir automatisk overført til en datamaskin og middelverdien pr. time blir lagret for hver temperaturføler. Tabell 1 angir installasjonsdybden for alle temperaturfølerne i alle de fire forsøksfeltene. Følerens plassering er vist i Figur 3.

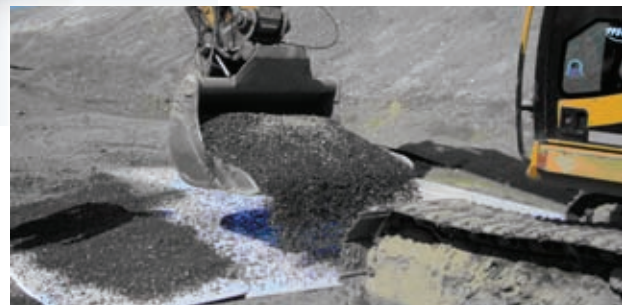


Figur 2. Frostmengde (luft)



Figur 3. Oversikt over forsøksfeltene

Figurene 4 – 7 viser hvorledes legging av isolasjonsmaterialene ble utført. I Figur 4 blir isolasjonsplatene dekket til forsiktig. I Figur 5 er lettklinkeroverflaten plan og vi kan også se skumglass til venstre. Både lettklinker og skumglass ble komprimert etter at materialene var dekket med knuste steinmaterialer (forsterkningslaget), Figur 6. To lag asfalt utgjør toppdekket, Figur 7.



Figur 4. Installasjon av XPS isolasjonsplater



Figur 5. Legging av lettklinker og skumglass

Tabell 1. Installerte temperaturfølere

Standard overbygning	Lettklinker	Skumglass	XPS
Overflate/2 cm	Overflate/2 cm	Overflate/2 cm	Overflate/2 cm
4 cm	4 cm	4 cm	4 cm
12 cm	12 cm	12 cm	12 cm
42 cm	45 cm	45 cm	45 cm
47 cm	47 cm	47 cm	58 cm
60 cm	60 cm	60 cm	58+ cm
62 cm	62 cm	62 cm	61+ cm
70 cm	70 cm	70 cm	62 cm
80 cm	80 cm	80 cm	70 cm
90 cm	90 cm	90 cm	80 cm
100 cm			90 cm
110 cm			
120 cm			
130 cm			



Figur 6. Legging av separasjonsduk og tildekking med knust stein



Figur 7. Temperaturfølere lagt mellom asfaltlagene

Oppfølging

Datainnsamlingen er planlagt å fortsette i minst tre år. For øyeblikket er bare resultater fra den første vinteren tilgjengelig (2005/2006). Under en kuldeperiode i mars 2006 trengte frosten gjennom isolasjonen på alle forsøksfeltene.

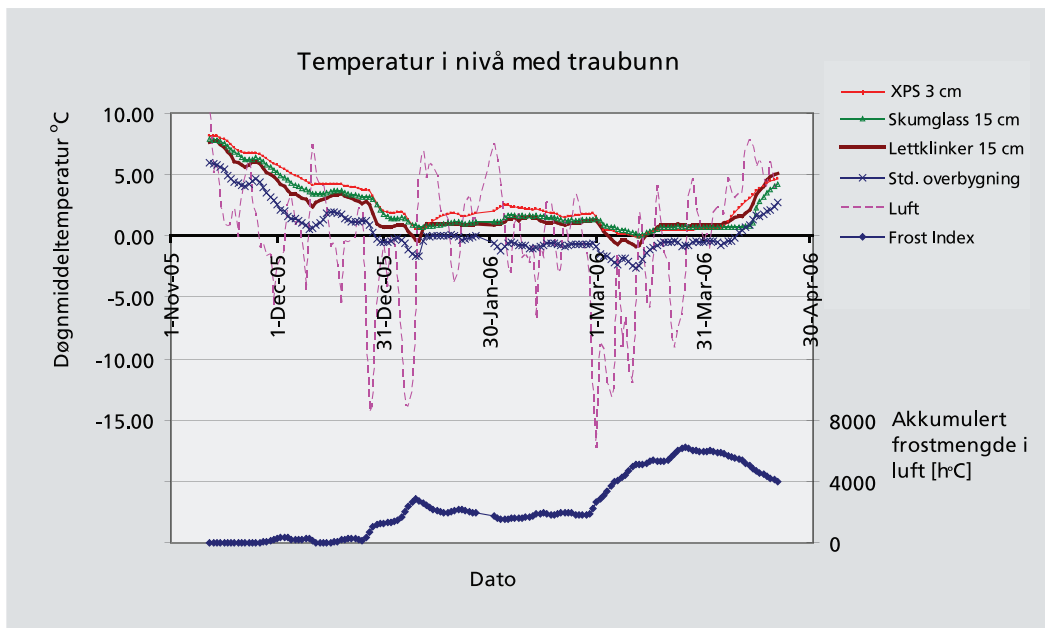
Innsamlede data og foreløpige resultater

Figur 8 viser gjennomsnittlig døgnmiddeltemperatur i nivå med traubunnen (61 cm under vegoverflaten) for alle forsøksfeltene sammen med lufttemperaturen. Figuren viser også akkumulert frostmengde (luft). Temperaturen er litt lavere i seksjonen med lettklinker enn i seksjonene med skumglass og XPS. Rundt 13. mars 2006 er temperaturen på frysepunktet under skumglasslaget og XPS-platene ved en frostmengde tilsvarende omtrent 5100 h°C (luft). Dette var samtidig den dagen hvor frostdybden var på det største denne

vinteren. Frosten trengte gjennom lettklinkerlaget om lag 10 dager tidligere (for andre gang denne vinteren) ved en frostmengde tilsvarende omtrent 3700 h°C (luft). Målingene indikerer at frostisoleringsvevnen til denne seksjonen kan være noe lavere enn antatt. Totalt akkumulert målt frostmengde i luft for vinteren er 6236 h°C.

Tabell 2 viser akkumulert frostmengde basert på målt overflatetemperatur (topp asfalt). Frostmengden målt på overflaten av XPS-seksjonen er lavere enn for overflaten av seksjonen med standard vegoverbygning og samsvarer ikke med teoretiske antagelser.

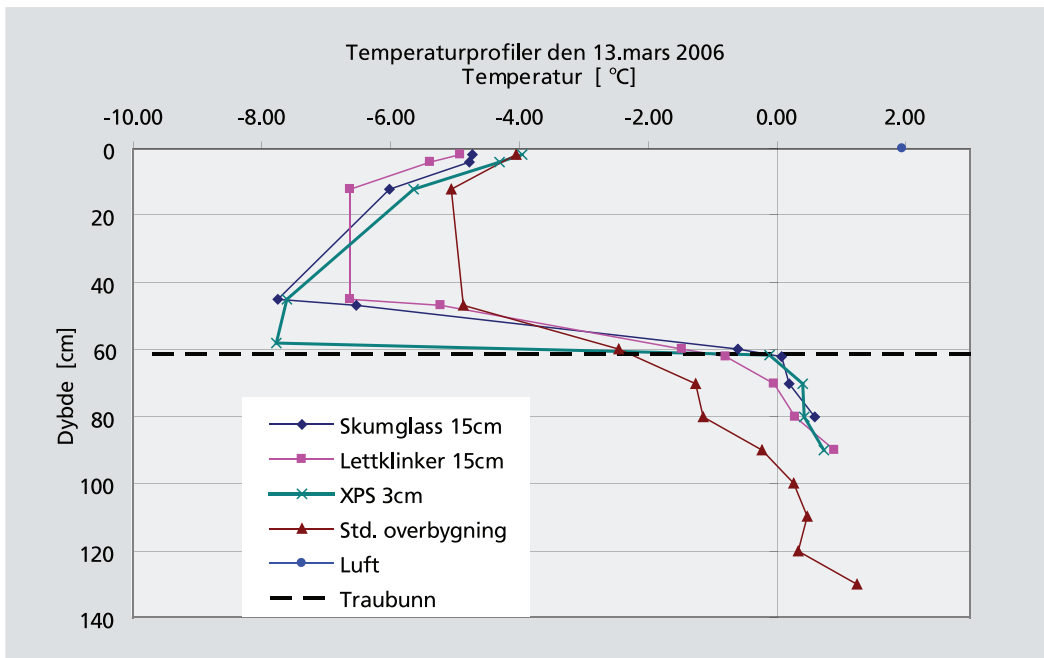
Figur 9 viser temperaturprofilene for de ulike seksjonene den 13. mars. Fra disse kan vi se at frosten hadde trengt nesten 10 cm ned i undergrunnen ved lettklinker-seksjonen og omtrent 35 cm ned i undergrunnen ved seksjonen med standard overbygning.



Figur 8. Temperatur ved traubunnen, 61 cm under vegbanen

Tabell 2. Akkumulert frostmengde [h°C] basert på overflatetemperaturen.

Seksjon Dato	Basert på lufttemperatur [h°C]	Std. overb. [h°C]	Skumglass [h°C]	Lettklinker [h°C]	XPS [h°C]
13. mars 2006	(5086)	9494	10003	10176	8473
26. mars 2006 (maks. FI i 2006)	6236	9949	10523	10707	8713



Figur 9. Temperaturprofiler den 13. mars 2006.

Observasjoner så langt

- Feltene med skumglass og XPS viser isolasjonseffekt tilnærmet teoretisk beregnet verdi (målt 6236 h°C, beregnet 5600 h°C)
- Feltet med lettklinker viser noe lavere isolasjonseffekt enn teoretisk beregnet og noe lavere isolasjonseffekt enn XPS og skumglassfeltene.
- Frostdybden ved feltet uten isolasjon samsvarer godt med beregnet frostdybde basert på målt akkumulert frostmengde (luft).
- Frostmengden ved overflaten er nær forventet verdi sammenlignet med frostmengden i luft.

Referanser

Bakløkk L. et. al. (2001). Hasopor skumglass (Hasopor foam glass). SINTEF report STF22-F01322. (in Norwegian)

European Technical Approval No. ETA-05/0187 (2005) (Teknisk godkjenning for Hasopor skumglass), Utarbeidet av Norges byggforskningsinstitutt (NBI).

Furuberg, T. et. al. (2000). Environmentally friendly insulation products for the construction and building business. Summary report SP1: Leca frost protection in roads, railways and ditches. SINTEF report STF22 F00601, Trondheim 2000.

Hoff I. et. al. (2000): Exclay Internordic Geoproject, Field test at Sandmoen, Norway - Construction and instrumentation. SINTEF rapport STF22 F00612, Trondheim 2000.

Horvli I., Øiseth E. and Henry K. (2005): A review and reliability assessment of frost penetration models, BCRA 2005, Trondheim

Statens vegvesen Vegdirektoratet: Håndbok 018 Vegbygging. Oslo, 2005

Frost i Jord publikasjon nr. 17. Sikring mot teleskader, Vegdirektoratet og NTNF, 1976. ISBN 82-7207-007-3.

Watn A. et. al. (2000): Light-weight fill aggregates for insulation in roads - strength and stiffness properties, 13th NGM-2000, Helsinki

Øiseth E. (2003). Leca lettklinker som frostisolering i veg - dimensjoneringsdiagram.

Øiseth E. (2005). Hasopor Foamglass, Freeze-thaw resistance, giant oedometer tests. SINTEF report STF22 F04154.

Øiseth E. (2005). Hasopor Foamglass, Long term creep tests in giant oedometer. Sintef report STF50 F05067.

Øiseth E., Refsdal G. (2006) Lightweight aggregates as frost insulation in roads - design chart. 13th ICCRE, Maine 2006.

Øiseth E., Aabøe R., Hoff I. (2006) Field test comparing frost insulation materials in road construction 13th ICCRE, Maine 2006.

Telehivmålinger med laserutstyr

Measuring frost heave using laser device

Torleif Haugødegård, Statens vegvesen Vegdirektoratet (torleif.haugodegard@vegvesen.no)

Summary

This article presents preliminary results from laser measurements of variations in unevenness (frost heave) during the seasons of the year. The laser measuring device is commonly known as ALFRED. Measurements taken during spring months show IRI values 100-150 % higher than in September for some roads. A method for detailed documentation of changes in the longitudinal profile of local road sections is also included.

Sammendrag

Denne artikkelen beskriver foreløpige resultater fra et måleprosjekt som skal kartlegge de store variasjonene i ujevnheter på vegdekkene gjennom årstidene. Det er benyttet laserbasert måleutstyr av typen ALFRED. Det dokumenteres stor økning i IRI-verdi (telehiv) om våren i forhold til sommer og høst. En mulig metode for lokal kartlegging av telehivstrekninger er også beskrevet.

Bakgrunn

Vegdirektoratets seksjon for veg- og ferjeforvaltning tok i 2004 initiativet til et måleprosjekt som skulle dokumentere velkjente variasjoner i ujevnheter IRI* og hjulspordybde over året både på bar veg og på veg med snø og isdekke. Hensikten var å finne hvilket konkret tillegg i IRI det må regnes med under forskjellige føreforhold og under ulike årstider, da en erfaringsmessig vet at telehiv oppstår.

IRI har vanligvis kun blitt målt sommer/høst, etter at foregående vinters telehiv er gått ut av vegen. Tidligere, da det var gjort utbredt bruk av aksellastrestriksjoner i teleløsningsperioden på veger med dårlig teleteknisk standard, var det vanlig å vurdere

tiltak (lastrestriksjoner) i teleløsningsperioden bl.a. ved hjelp av såkalte telegrensemålere. Telegrensemålere ble plassert nede i vegkroppen og avlest manuelt, og viste hvor dypt telen hadde gått og når det begynte å tine ovenfra i teleløsningen. Dette ga imidlertid ikke noe direkte mål på teleløfting og dermed endringer i kjørekomfort (IRI) gjennom vintersesongen. Telegrensemålerne er stort sett gått ut av bruk nå, som en følge av at aksellastrestriksjoner er vesentlig mindre benyttet etter 1995. Telehivproblemene og deres betydning for kjørekomforten er imidlertid ikke utryddet. Med en utvidet registrering av IRI, gjennom jevnhetsmålinger over hele sesongen, kan en få bedre dokumentasjon av vegstrekninger som er spesielt utsatt for telehiv.

**) IRI = International Roughness Index, brukes internasjonalt for å beskrive kjørekomfort eller vegdekkets ujevnheter i lengderetningen. Måleverdier angis i mm/m for 20m-strekninger og varierer fra under 1 for nylagt asfalt til over 7 for svært ujevne strekninger.*

Orientering

Målingene med flere ALFRED-biler startet i januar 2005 og ble kjørt med 2-4 ukers mellomrom utover året, noe sjeldnere i sommerhalvåret. Strekninger på 9-15 km ble valgt ut på veger med kjente telehivproblemer.

ALFRED, som Statens vegvesen bruker til årlige dekketilstandsmålinger på hele vegnettet, ble også brukt til disse spesialmålingene. En laser måler et lengdeprofil i ytre hjulspor og dette profilet er beregningsgrunnlaget for den internasjonalt standardiserte indeksen IRI med én IRI-verdi for hver 20 m. På dette grunnlaget ble det beregnet statistiske verdier for 1 km delstrekninger og for hele målestrekningens lengde (gjennomsnitt av delstrekningenes verdier).

Det lasermålte lengdeprofilet kan også brukes til beregning av høydeprofil for strekninger på noen hun-

Tabell 1. Strekningene som er målt fra januar 2005 i fire fylker:

Strekning	Fylke	Veg	fra hp	fra meter	til hp	til meter	Lengde (m)	kjørefelt
A+B	Hedm	RV. 212	1	100	1	9584	9000	1+2
C+D	Hedm	RV. 213	1	100	2	4234	12000	1+2
E+F	Hedm	RV. 216	2	4700	3	4437	13000	1+2
G+H	Oppl	E6	6	100	9	8612	17000	1+2
I+J	M&R	RV. 64	10	100	10	10085	10000	1+2
K+L	M&R	FV. 215	2	100	2	15068	15000	1+2
M+N	M&R	RV. 663	2	100	2	9100	9000	1+2
O+P	M&R	RV. 665	1	100	1	9100	9000	1+2
Q+R	AuA	RV. 417	1	100	1	10434	10000	1+2
S+T	AuA	E18	2	1600	2	11600	10000	1+2
20 strekninger i 4 fylker i 3 regioner						total lengde:	228 km	

dre meter. Dette profilet kan igjen brukes til beregning av avviket fra en glidende, matematisk lengderettholt på for eksempel 3 m lengde.

Både 20m IRI-verdier, høydeprofilet og avvikene fra rettholt vil avdekke lokale telehiv og ujevnheter. Når et lengdeprofil målt sommer/høst sammenlignes med lengdeprofil for samme strekning målt i mars/april vil systematisk telehivkartlegging være mulig.

Resultater

Nedenfor vises noen resultater fra to av målestrekningene, 9 km fra starten av rv. 212 i Hedmark og 12 km fra starten av rv. 213 i samme fylke. Disse strekningene har store sesongvariasjoner i IRI og spordybde. Til sammenligning vises også resultat fra en målestrekning hvor IRI og spordybde varierer lite med årstida (E6 i Øyer, Oppland, se figur 10).

Målestrekningene er beregningsmessig delt inn i hele 1000m-strekninger, hver med 50 delstrekninger à 20m. Det beregnes statistiske verdier for IRI og spordybde; middelerdi, 50%- og 90%-fraktil samt totale middelerdier for hele strekningen.

Grafene i figur 2 og 3 (rv. 212) og figur 8 og 9 (rv. 213) viser variasjoner i IRI og spordybde for hele målestrekningen fra sommeren 2004 til januar 2007. Vi ser at det er målt over 100% større IRI i april enn i sommer-/høstmånedene. Det er ikke stor forskjell på maksimalverdiene i årene 2005 og 2006. Økende IRI-verdier for vinteren 2006-2007 er nå registrert. Spordybdevariasjonene skyldes som regel snø og is på asfalten. Korte strekninger med flatelapping sommeren 2006 vil trolig påvirke gjennomsnittsverdiene fra 2007.

I figur 4 vises lokale variasjoner langs hele målestrekningen (rv. 212), statistikk for hver 1000m og for hver 20m. Vi ser at det er målt store forskjeller i IRI



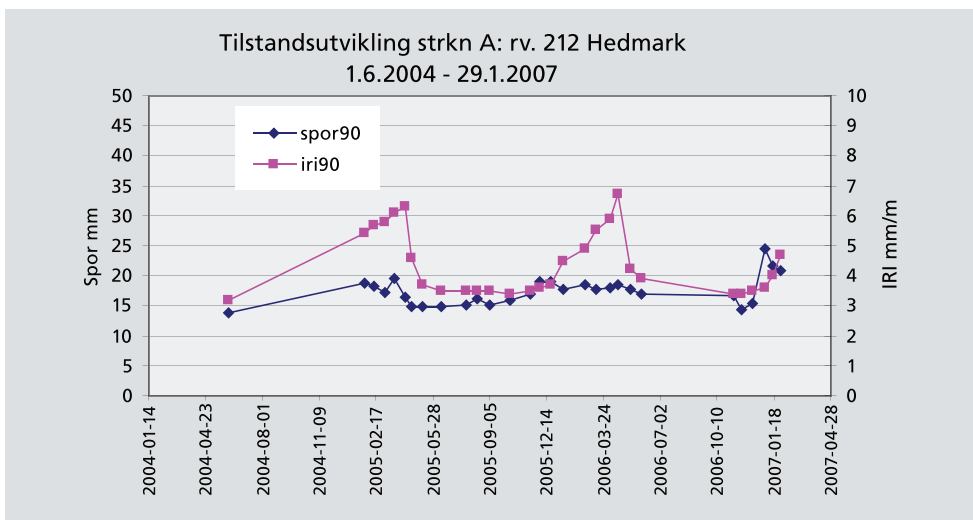
Figur 1. Bildet viser et typisk resultat av årvis økning i skader og ujevnheter (telehiv) om våren.

også mellom delstrekningene, over 300% økt IRI i april 2006 i forhold til oktober 2005 for flere strekninger.

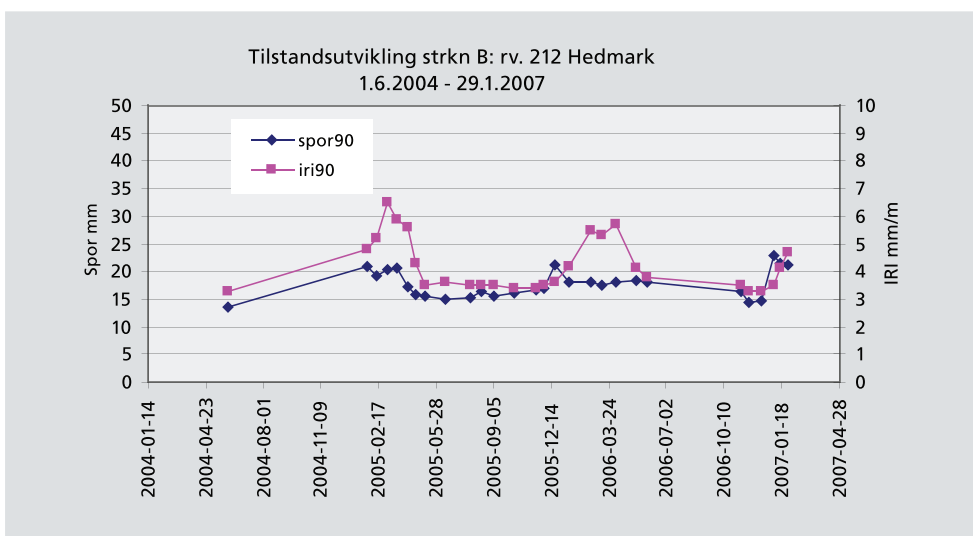
Mer detaljert oversikt over telehivstrekninger kan vises ved å plote 20m IRI-verdier grafisk for den enkelte 1000m-strekning. I figur 5 vises situasjonen for en 1000 m delstrekning (2564-3584) av den dårligste strekningen målt i september/oktober 2005 og april 2006. Vi ser tydelig de største IRI-verdiene i april (to måleserier med 2 ukers mellomrom) og forskjellene

fra sommer-/høsttilstand (også to måleserier). Det er også lett å se at siste halvpart av strekningen stort sett er nesten like jevn i april som på sommerføre. Figur 6 og 7 viser et lokalt parti med stor IRI-verdi.

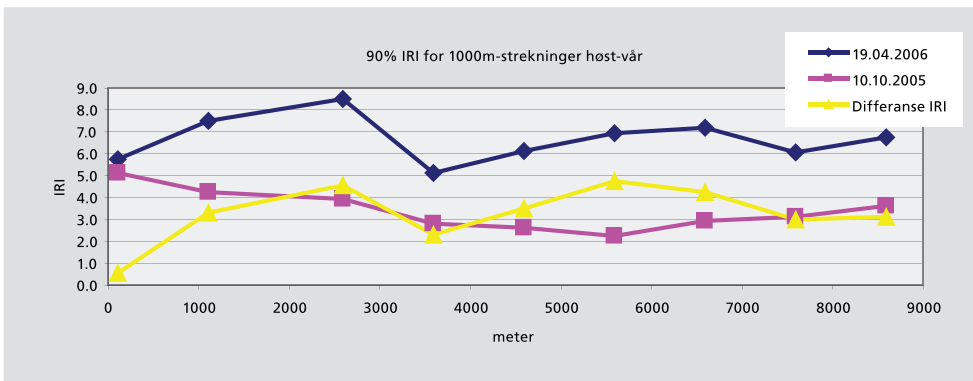
Til sammenligning med rv. 212 og rv. 213 – som begge har stor sesongvariasjon i IRI – vises også måleresultater fra E6, Oppland/Øyer, hvor sesongvariasjoner i IRI er liten (figur 10).



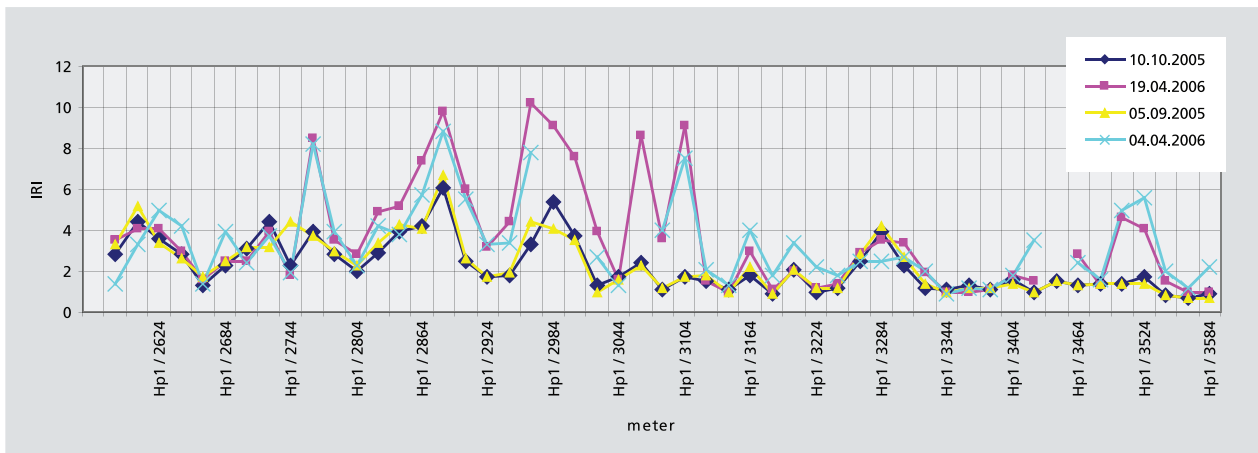
Figur 2. Gjennomsnittlig IRI- og spordybdeverdi for de 9 første km av riksveg 212 i Hedmark (kjørefelt 1).



Figur 3. Gjennomsnittlig IRI- og spordybdeverdi for de 9 første km av riksveg 212 i Hedmark (kjørefelt 2).



Figur 4. 90% IRI-verdi for hver 1000m av de 9 første km av riksveg 212 i Hedmark (kjørefelt 1).



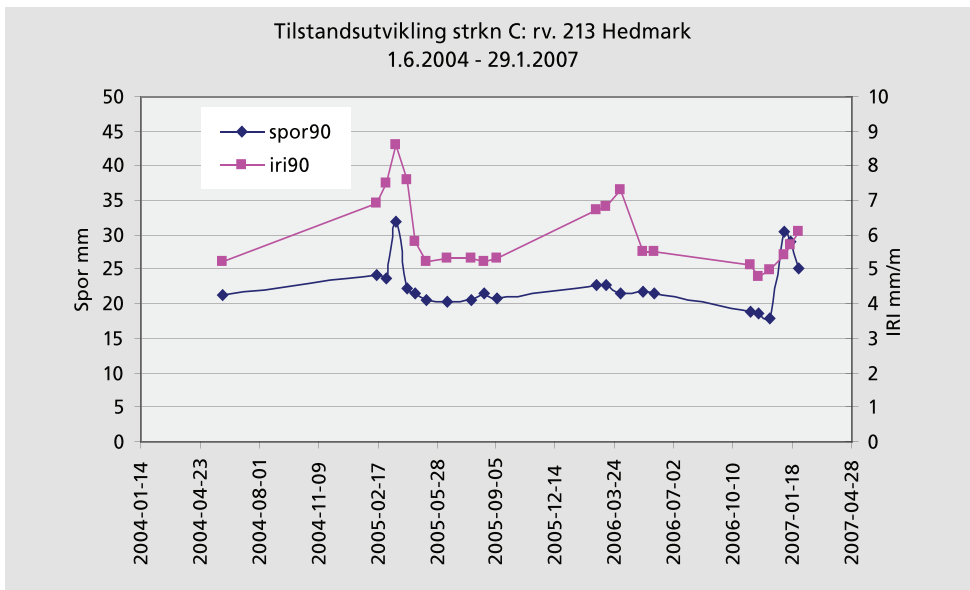
Figur 5. Lengdeprofil 20m IRI for to måleserier på riksveg 212 i sep/okt 2005 og april 2006.



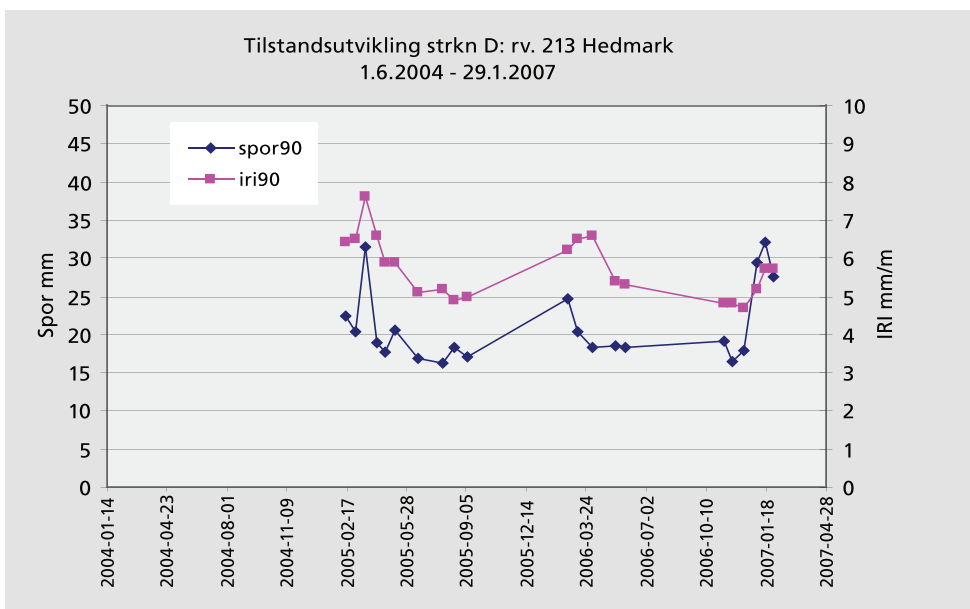
Figur 6. Foto fra riksveg 212 den 19.4.2006 km 2,852 (lokal strekning med store IRI-verdier, se figur 5).



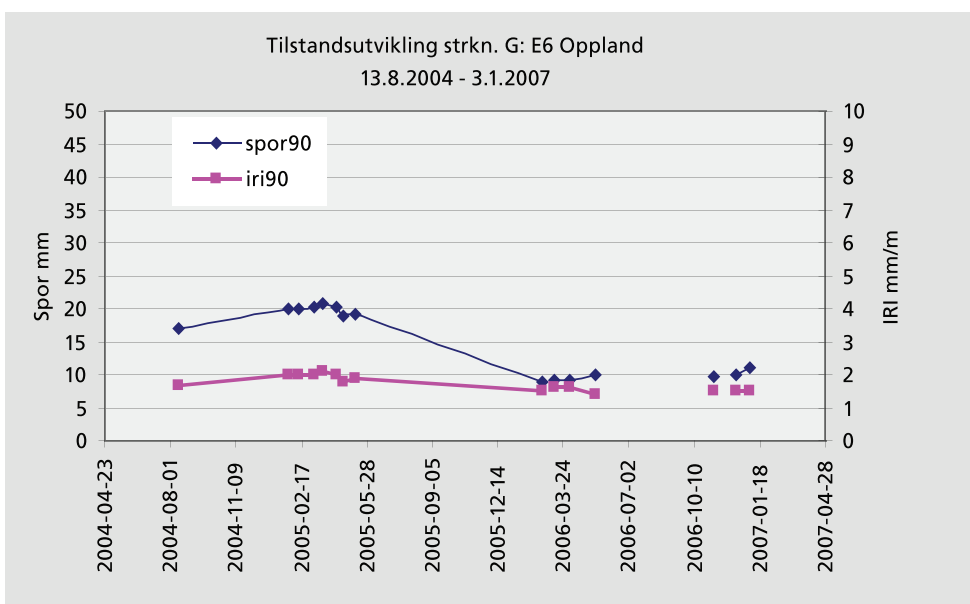
Figur 7. Foto fra riksveg 212 den 19.4.2006 km 2,892 (lokal strekning med store IRI-verdier, se figur 5).



Figur 8. Gjennomsnittlig IRI- og spordybdeverdi for de 9 første km av riksveg 213 i Hedmark (kjørefelt 1).



Figur 9. Gjennomsnittlig IRI- og spordybdeverdi for de 9 første km av riksveg 213 i Hedmark (kjørefelt 2).



Figur 10. Gjennomsnittlig IRI- og spordybdeverdi for E6 på strekningen Lillehammer-Øyer i Oppland (kjørefelt 1)

Mulighet for detaljert kartlegging av telehiv

De mest detaljerte rådata fra lasermåleren kan brukes til svært detaljert kartlegging av telehivene som vist grafisk i figur 11. Lengdeprofilen har én høydeverdi for hver 25 cm langs hjulsporet. På grunn av noe avdrift i laserverdiene vil lengdeprofilen bare kunne brukes lokalt for noen hundre meters delstrekninger om gangen.

Basert på dette detaljerte lengdeprofilen kan en 3 m (eller valgfri lengde) matematisk rettholt flyttes i lengderetningen med 25 cm trinn, og avvikene fra denne til asfalterflata beregnes som vist i nederste kurve i figuren.

Konklusjoner

For noen av de målte strekningene er det dokumentert stor økning i IRI-verdi (pga. telehiv) om våren i forhold til sommer og høst. For målestrekningene på rv. 212 og rv. 213 er det nesten en dobling i IRI-verdien i vinter/vår-månedene sammenlignet med IRI-verdiene i resten

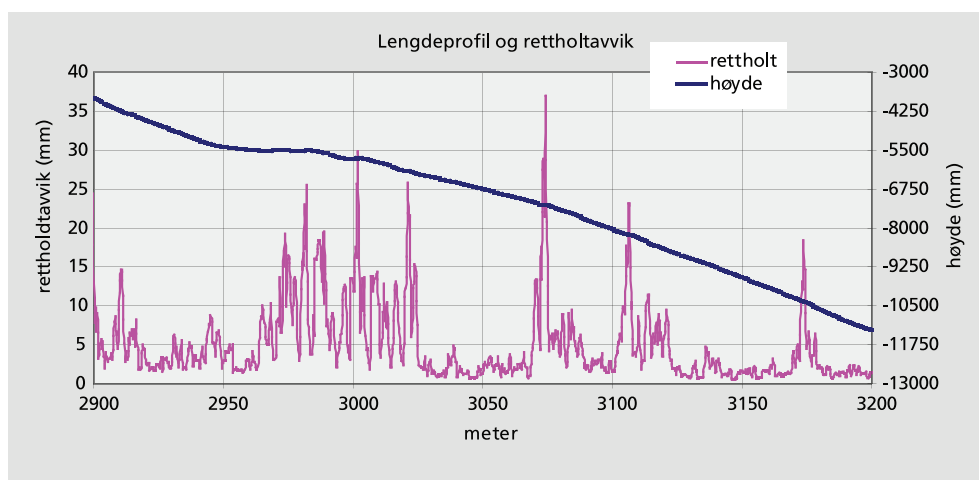
av året. Mønsteret er omtrent det samme for hver av de to vintrene som måleperioden omfatter. Spordybden øker også, men i mindre grad, i de samme periodene som IRI øker. Økningen i spordybde skyldes som regel snø og is på asfalten.

For målestrekningen på E6 er det kun en liten økning i IRI-verdien i vinter/vår-månedene, men en mer markert økning i spordybden.

Laserdata fra ALFRED-målingene inneholder mye informasjon som Vegvesenet hittil ikke har utnyttet systematisk, bortsett fra til beregning av IRI-verdier. Med bedre koordinering av målebilene på landsbasis og målesesongstart mye tidligere om våren vil vi kunne etablere et bedre grunnlag for planlegging av tiltak mot ujevne telehiv og dokumentasjon av den store merbelastning som disse påfører trafikantene i opptil en tredjedel av året.

Det bør undersøkes videre om lasermålingene kan samkjøres med data fra georadarmålinger, nedbøyningsmålinger o.a.

Planleggingssystemet PMS (Pavement Management System) for dekkevedlikehold kan også utnytte tilleggsinformasjon om lokale problemstrekninger mht. telehiv og ta inn tiltak for utbedringer i asfaltkontraktene.



Figur 11. Høydeprofil og avvik fra 3m rettholt for en 300m lang strekning på riksveg 212.

Frosttekniske egenskaper til knust betong i vegbygging

Frost susceptibility and durability of demolished concrete under frost action

Ivar Horvli, NTNU (ivar.horvli@ntnu.no)

Per Otto Aursand, Statens vegvesen Region Nord (per.otto.aursand@vegvesen.no)

Summary

As a part of the Recycled Materials Project (2002-2005) run by the Norwegian Public Roads Administration, demolished concrete has been tested in the laboratory as well as in road test sections. Frost heave testing in the laboratory gave unexpected high frost heave compared to reference natural unbound materials. These findings have been followed up in a Master of Science project at NTNU being referred in this article. Laboratory testing was made on unbound aggregate from two sources of demolished concrete; Melhus and RiT, the last having some brick content in addition. The laboratory program includes frost heave testing, durability testing by freeze/thaw, investigation of specific area of fines and water susceptibility by Tube Suction Test (TST). The main findings was that unbound aggregate from demolished concrete seems to be more frost susceptible according to frost heave testing than expected from the material grading and fines content. This might be caused by the high porosity of the aggregate and the relative high specific area of the fines. The durability is found to be sufficient if the material is used in dry conditions and not exposed to salt. It is however a need to do more investigations on material from different sources and with different material fractions.

Sammendrag

Gjennom Statens vegvesens Gjenbruksprosjekt (2002-2005), er det blant annet utført utprøving i felt og testing i laboratoriet med gjenbruksbetong. Telehivforsøk på gjenbruksmasse gav noe uventa resultat i forhold til naturlig grus og pukk. Dette ble fulgt videre opp ved en Masteroppgave ved NTNU som er hovedgrunnlaget for denne artikkelen. Her er det utført laboratorieundersøkelser på to materialer av knust betong; Melhus Gjb, som er en ren knust betong og RiT Gjb

(Regionsykehuset i Trondheim) som inneholder noe tegl (Gjb=gjenbruksbetong). Det ble utført telehivforsøk, frostbestandighetsforsøk, undersøkelse av spesifikt overflateareal på finstoffandelen og vannømfintlighet ved Tube Suction Test (TST). Hovedkonklusjonen er at gjenbruksbetong ser ut til å være vesentlig mer telefarlig ut fra telehivforsøk enn det korngraderingskriteriene skulle tilsi. Dette antas å ha sammenheng med materialenes store porøsitet og spesifikke overflateareal som gjør dem mer vannømfintlige. Frostbestandigheten er funnet å være tilfredsstillende så lenge materialene ligger tørt og ikke utsatt for tinesalter. Det er behov for å undersøke flere typer og fraksjoner av gjenbruksbetong, og å utvikle relevante testprosedyrer som gjenspeiler feltforhold under ulike betingelser.

Innledning

I den senere tid er nedknust/resirkulert betong blitt benyttet til vegbygging i bærelag og til dels forsterkningslag. Dette er særlig aktuelt i og nær byer og tettsteder der det kan være betydelige ressurser av tunge rivingsmaterialer. Det er imidlertid behov for økt kunnskap om de frosttekniske egenskapene til slike materialer for å kunne anvende disse på en sikker måte i områder med frost. I første rekke gjelder dette telefarlighet og frostbestandighet. Det er også viktig å samle erfaring for å medvirke til at de nye materialspesifikasjonene i CEN også blir tilpassa våre klimatiske forhold. En aktuell test i den forbindelse er prøving av bestandighet ved fryse/tineforsøk. Testen har vært modifisert for omgivelser med salt (aktuell for situasjon med salting av vinterveg). En annen testmetode som er aktuell å standardisere i Europa er en telehivtest. Interessen for å delta i dette arbeidet har nettopp vært på høring.

Denne artikkelen presenterer noen av de viktigste resultatene fra en masteroppgave som ble utført ved NTNU våren 2006 av Per Otto Aursand med Ivar Horvli som veileder. Oppgaven er utført i samarbeid med Statens vegvesen og er en del av Gjenbruksprosjektet 2002-2005.

Metoder for å karakterisere telefarlighet

For at det skal oppstå telehiv er det tre forhold som må være tilstede:

- Temperaturer under frysepunktet
- Telefarlige materialer
- Tilgjengelighet på vann

Telefarligheten til et materiale vil variere med ulike parametere som korngradering og densitet, porestørrelse- og fordeling, kapillaritet, termiske parametere osv. I tillegg vil ytre faktorer som temperaturgradient, fuktforhold og overdekning også virke inn på materialets telefarlighet. Med de ulike laboratoriemetoder forsøker en indirekte å inkludere en eller flere av disse nøkkelfaktorene. Det er imidlertid ikke mulig med enkle kriterier å beskrive et materiales telefarlighet fullt ut. Mange metoder viser seg ofte å være gode for det materialet de er kalibrert mot, men fungerer dårligere for andre materialer. Det er derfor usikkert om telefarlighetskriterier som er benyttet for naturmaterialer er brukbare for alternative materialer som for eksempel gjenbruksbetong.

De viktigste metodene som er i bruk for å karakterisere telefarlighet er vurdering av finstoffinnhold/korngradering (Nordals kriterium vist i tabell 1) og telehivforsøk i laboratoriet (CRREL's kriterium vist i tabell 2). Andre kjente metoder er beregning av segresjonspotensiale (SP) og måling av dielektrisit.

Tabell 1. Nordals telefarlighetskriterium, gjengitt etter Håndbok 018 (2005).

Klassifisering	Vekt-% av materiale < 20 mm			
		<2 µm	<20 µm	<200 µm
Ikke telefarlig	T1		< 3	
Litt telefarlig	T2		3 – 12	
Middels telefarlig	T3	> 40	> 12	< 50
Mye telefarlig	T4	< 40	> 12	> 50

Tabell 2. Telefarlighetskriterium for CRREL-testen. Gjengitt etter Chamberlain (1981).

Midlere telehivshastighet mm/døgn	Teleskytende evne
0,0 – 0,5	Ubetydelig
0,5 – 1,0	Svært liten
1,0 – 2,0	Liten
2,0 – 4,0	Middels
4,0 – 8,0	Stor
> 8,0	Svært stor

RESULTAT FRA LABORATORIEFORSØK

Materialene

Med bakgrunn i tidligere undersøkelser av Aurstad og Hoff (2005) ble gjenbruksbetong fra Melhus (Melhus Gjb) og Regionsykehuset i Trondheim (RiT Gjb) valgt ut for videre undersøkelse i laboratoriet. Begge materialene er relativt rene med få forurensninger, men RiT Gjb inneholder også noe tegl (~10 %). Alle forsøkene er utført på fraksjon 0/10 mm med unntak av fryse-/tineforsøket som er utført på fraksjon 8/16 mm som er standard for denne testen. Det ble komponert tre ulike kornkurver med forskjellig finstoffinnhold som vist i tabell 3 for å se effekten av finstoffinnhold og korngradering (andel <0,063 mm varierer fra 0-10%). Som man ser av tabell 3 økte finstoffinnholdet også noe under testing, og dette er det tatt hensyn til i de videre vurderingene. I noen av de påfølgende figurene vil materialene være kodet MaterialeKurve-Serie. Eks: M1-1 betyr Melhus Kurve 1 – Serie 1.

Følgende metoder ble valgt ut for å bestemme frosttekniske egenskaper til materialene: Coulteranalyse for å finne finstoffordelingen <0,063 mm, BET-analyse for å finne spesifikt overflateareal på finstoffet <0,063 mm, telehivforsøk for å simulere teleløfting i felt,

Tabell 3. Kornkurver brukt i forsøkene. Massegjennomgang i % før/etter forsøk.

Kurve 1			
Sikt	Før	Melhus Etter	RiT Etter
10	100	100	100
4	60	63,8	63,3
1	30	32,2	33,0
0,25	16	16,5	17,6
0,063	10	10,2	9,8
Kurve 2			
Sikt	Før	Melhus Etter	RiT Etter
10	100	100	100
4	60	62,7	63,5
1	30	32,0	32,1
0,25	14	16,4	14,9
0,063	3	7,9	5,2
Kurve 3			
Sikt	Før	Melhus Etter	RiT Etter
10	100	100	100
4	60	62,2	63,4
1	27	23,8	25,7
0,25	9	9,7	9,4
0,063	0	4,7	2,8

fryse-/tine-forsøk for å finne bestandighet og Tube Suction Test (TST) for å finne vannoppsugningsevne/vannømfintlighet.

- Temperaturgradient
- Overflatelast
- Vanntilgang
- Testperiode/tid

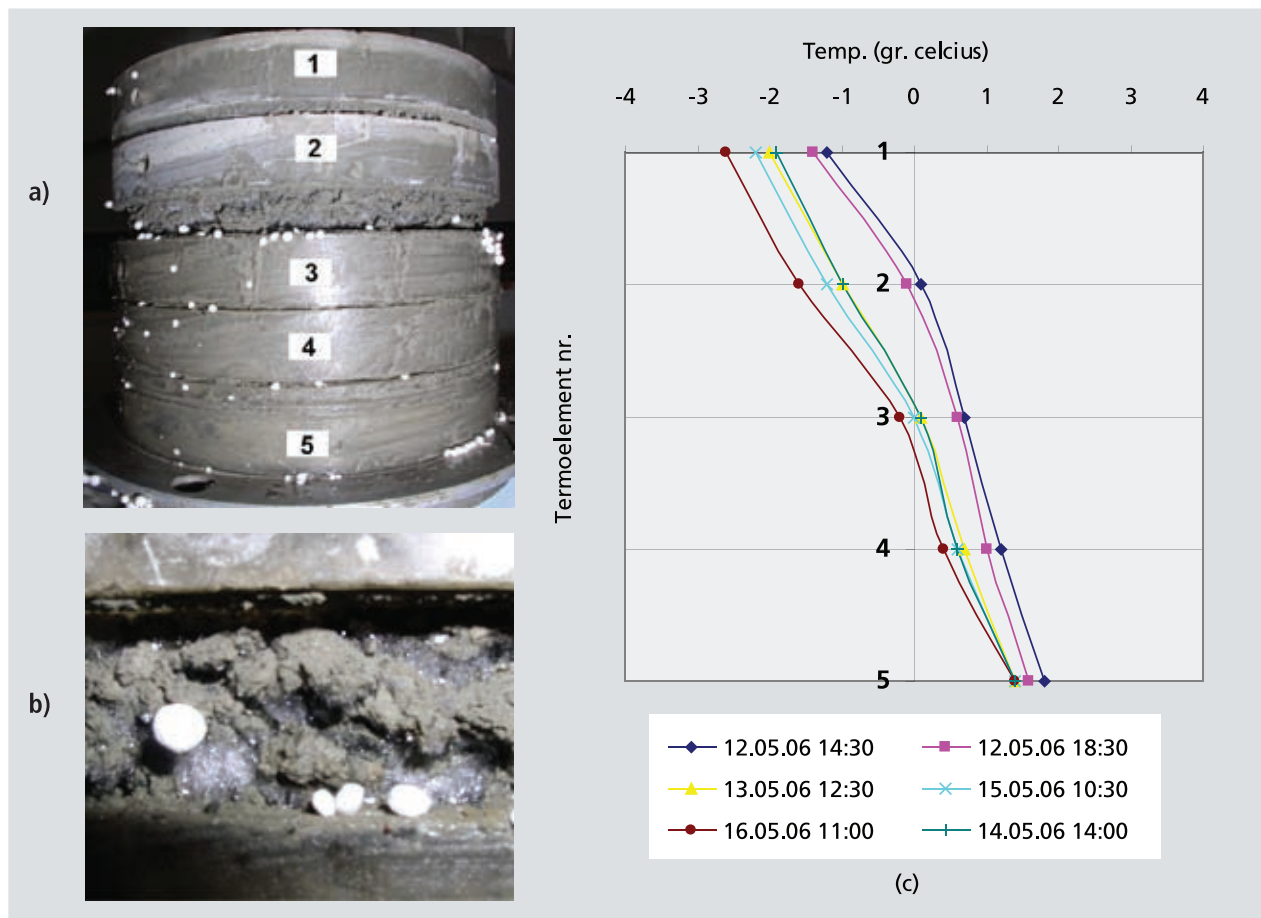
Telehivforsøk

Laboratorieforsøkene med telehiv er utført etter en prosedyre som er utviklet ved CRREL, men med noen modifikasjoner som er gjort på grunn av praktiske forhold og begrensninger med vårt utstyr (NTNU/Sintef). Materialet komprimeres i henhold til Standard Proctor i prøvesylindere som består av 5 akrylringer som kan bevege seg uavhengig av hverandre vertikalt, og dermed hindre sidefriksjon ved telehiving slik figur 1(a) viser. Sylindere blir så utsatt for temperaturer på +1 °C i bunn og -4 °C på toppen. Prøven har vann-tilgang nedenfra, og fryses over 4 døgn mens telehiv registreres og vannivået etterfylles. Faktorer som virker inn på telehiv under laboratorieforsøk er:

- Materialfraksjoner
- Komprimering
- Prøvehøyde
- Sidefriksjon
- Frostnedtrengning og -hastighet

Valg av kriterium vil være avgjørende for tolking av resultatene med hensyn til å karakterisere materialets telefarlighet. Tolkningen er grunnlaget for å kunne overføre observasjonene fra laboratoriet til opplysninger som er relevante for materialenes oppførsel i felt under gitte forutsetninger. I vårt arbeid er telefarlighet tolket etter kriterier fra CRREL som vist i tabell 2. Figur 1(c) viser et typisk temperaturprofil over testperioden for telehivforsøkene. Figur 1(a) viser et bilde av Melhus Gjb etter forsøkslutt med temperaturprofil som i 1(c). Det ble dannet markerte islinsener i området rundt termoelement nr. 3 der frysefronten stod i tre døgn.

Coulteranalysen viser at RiT Gjb har mindre finstoff <20 µm enn Melhus Gjb. Etter Nordals finstoffkriterium vil kurve 1 for begge materialene klassifiseres som T2. For kurve 2 og 3 vil RiT Gjb komme i teleklasse T1 mens Melhus Gjb fortsatt er i T2 med unntak av kurve 3 som ligger på grensen til T1 etter dette kriteriet.



Figur 1. (a) M1-3 etter forsøkets slutt. (b) Nærbilde av islinsene i samme prøve. (c) Temperaturprofil for samme prøve.

Oppsummeringen av resultatene i tabell 4 viser imidlertid at gjenbruksbetong generelt er mer telefarlig enn det korngraderingskriteriet skulle tilsi dersom telehiv i laboratoriet legges til grunn. Melhus Gjb som er klassifisert som T2 etter Nordals kriterium, klassifiseres som T3-T4 etter telehivforsøk. RiT Gjb som klassifiseres som T1 etter Nordals kriterium, klassifiseres som T2-T3 etter telehivforsøk. Referansematerialene Klæbu Silt og Ramlo Sand viser imidlertid godt samsvar mellom klassifisering ved Nordal og telehivforsøk.

Siden samme finstoffinnhold på RiT Gjb og Melhus Gjb gav forskjellig telehiv; tyder det på at også andre faktorer som teglinnhold, mineralogi og spesifikt overflateareal på finstoffandelen spiller inn på telefarligheten. Undersøkelser av spesifikt overflateareal viser at gjenbruksbetongen har mye større overflateareal på finstoffandelen av materialet enn naturmaterialer. RiT Gjb har også noe mindre spesifikt overflateareal enn Melhus Gjb, noe som også samsvarer med resultatene fra telehivforsøkene. Dette gjør at materialet får større affinitet overfor vann, og betydningen av finstoff med hensyn til telefarlighet er derfor større her enn i de fleste naturmaterialer. Disse resultatene tyder derfor på at Nordals telefarlighetskriterium ikke er strengt nok for gjenbruksbetong.

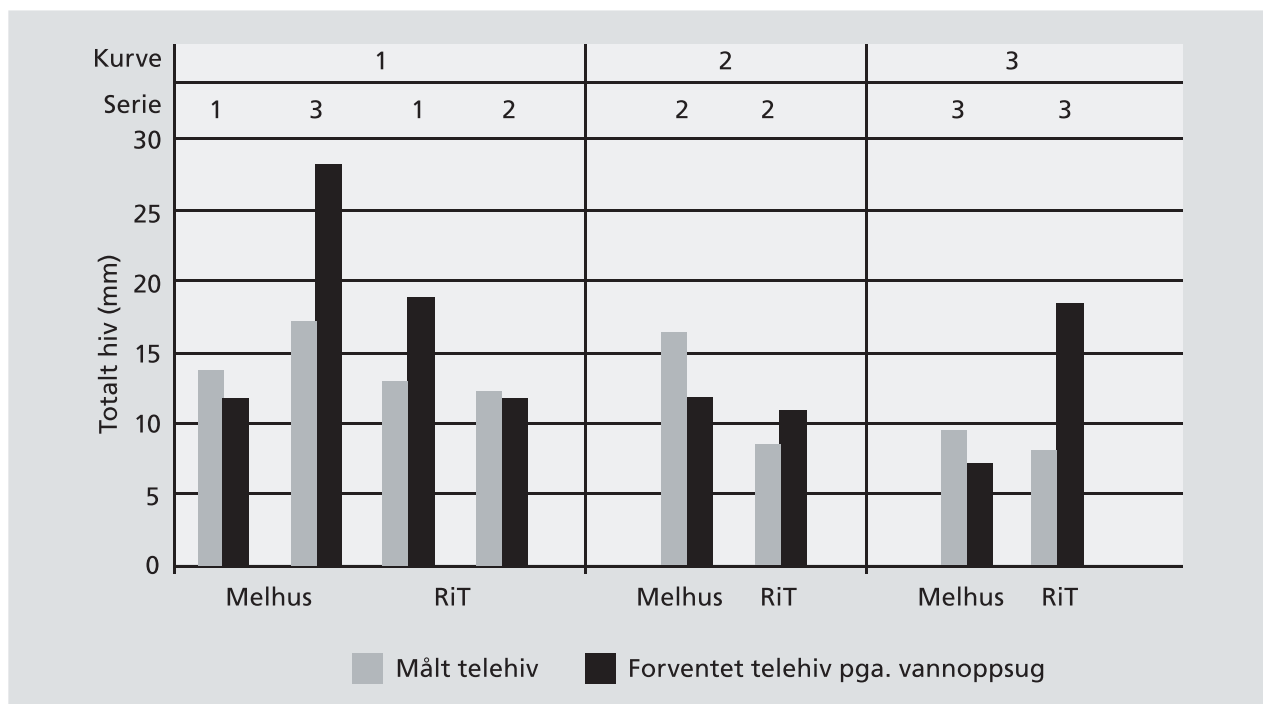
Sammenhengen mellom vannopptak og telehiv vil være spesielt interessant for gjenbruksbetong på grunn av den store porøsiteten og flere transportveger for vannet (i poresystemet mellom korn og gjennom korn). Figur 2 viser forskjellen i forventet telehiv på grunn av vannoppsuget og det faktisk målte telehivet. For Melhus Gjb viser 3 av 4 prøver større telehiv enn det

vannoppsuget skulle tilsi, mens for RiT Gjb viser 3 av 4 prøver mindre telehiv enn det vannoppsuget skulle tilsi. Det er nærliggende å tro at mye av vannoppsuget i RiT Gjb foregår i teglkornene og ikke forårsaker telehiv da vannet fryser inne i selve kornene. Dette kan forklare hvorfor Melhus Gjb synes mer telefarlig enn RiT Gjb, selv om kornkurven er den samme. Dette kan også være noe av årsaken til forskjellene i massetap ved fryse/tineforsøk som vist i tabell 5 under neste kapittel.

Tabell 4. Oppsummering av resultater etter telefarlighetsklassifisering etter korngradering og telehivforsøk.

Materiale Kurve	Korngradering (Nordal)	Telehivforsøk nr.1	Telehivforsøk nr.2	Telehivforsøk nr.3	Telehivforsøk Aurstad og Hoff (2005)
Melhus1	T2	T2 ¹⁾	T3/T4	T3/T4	T3/T4
Melhus2	T2	T2 ¹⁾	T3/T4	-	-
Melhus3	T1/T2	-	-	T2/T3	-
Melhus 0/10 mm	T2	-	-	-	T3 (T3/T4) ²⁾
RiT1	T2	T2/T3	T2/T3	T2 ¹⁾	-
RiT2	T1	T1 ¹⁾	T2/T3	-	-
RiT3	T1	-	-	T2	-
Klæbu Silt	T4	-	-	-	T2/T3 (T3/T4) ²⁾
Ramlo Sand	T1	-	-	-	T1

1) Feil i vanntilgang, derfor underestimert telefarlighet.
2) Lagret 100 døgn.



Figur 2. Målt telehiv og forventet telehiv på grunn av vannoppsuget.

Bestandighet ved fryse/tineforsøk

Testen er en modifisert CEN-test etter Myren (2005) og utføres på fraksjon 8/16 mm. Materialene vannmettes i 1 % NaCl-løsning i 24 timer og tørkes til de blir overflatetørre. Prøvene settes så inn i klimaskapet der de utsettes for 10 fryse-/tinesykluser som innebærer å kjøle ned prøvene til $-17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ og deretter varme dem opp til $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ før en ny syklus starter. Forvitring på grunn av frost fører til et massetap som finnes ved å sikte prøvene på 4 mm sikt etter testing, og massetapet gis da som % av materialet som passerer dette siktet. Massetapet (F) beregnes etter følgende formel:

$$F = \left(1 - \frac{m_{>4\text{ mm}}}{m_{>4\text{ mm}} + m_{<4\text{ mm}}} \right) \cdot 100$$

der $m_{>4\text{ mm}}$ = masse av rest på sikt 4 mm
 $m_{<4\text{ mm}}$ = masse passert sikt 4 mm

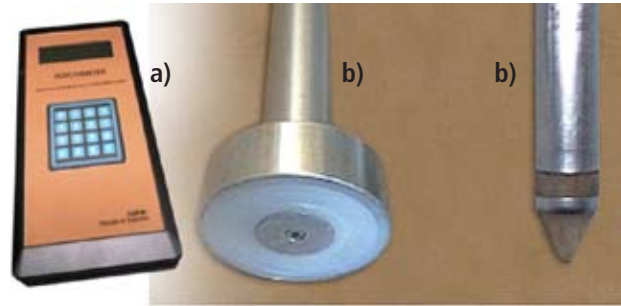
Resultatene som vist i tabell 5 viser at massetapet til knustbetong fra Melhus testet i henhold til NS-EN 1367-1 tilfredsstillende kravene til den strengeste kategorien (F_1) i NS-EN 13242. RiT Gjb ligger i "grenseland", da kravet til massetap i kategori F_4 er $\leq 4\%$. Det er behov for flere undersøkelser for å kunne si med sikkerhet at materialet tilfredsstillende kravene i NS-EN 13242 hvis de ligger tørt og ikke utsatt for tinesalter. Kravene til massetap i NS-EN 13242 er imidlertid utviklet for naturmaterialer, og det er derfor ikke umiddelbart sikkert at disse kravene kan brukes direkte for gjenbruksbetong da det ser ut til at finstoffet her har større innvirkning på telehiv. Det bør derfor undersøkes om det bør lages egne krav til gjenbruksbetong i NS-EN 13242 som er strengere enn for naturmaterialene.

Tabell 5. Gjennomsnittlig massetap ved fryse-/tineforsøkene.

Materiale	Gj. Snitt massetap
RiT 8/16	~ 3 %
Melhus 8/16	0,9 %

Vannoppsug og måling av poresug/suction

Tube Suction Test (TST), er en ny metode for å undersøke poresug (suction) og indirekte vannømfintlighet til ulike ubundne vegbyggingsmaterialer. Et såkalt "Percometer" som vist i figur 3 benyttes til å måle de dielektriske egenskapene som gir en indikasjon på ubundet vanninnhold i materialet. Materialer innenfor fraksjonen 0/25 mm komprimeres i 200 mm høyde i henhold til Modifisert Proctor i sylindere med perforert bunn og



Figur 3. (a) Percometer og (b) prober

Tabell 6. Rangering av materialer etter TST. Basert på Guthrie m.fl. (2002).

Dielektrisk verdi	Rangering etter vannømfintlighet
<10	Liten
10-16	Middels
>16	Stor

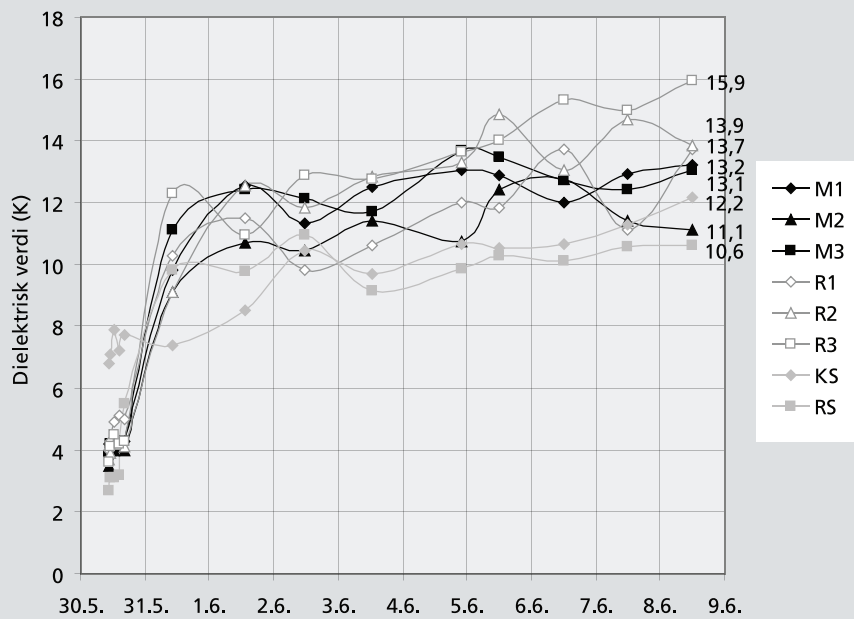
Tabell 7. Telefarlighetskriteriet etter TST. Basert på Guthrie m.fl. (2002).

Dielektrisk verdi	Rangering etter TST	Telefarlighet
<10	God	Ikke-telefarlig
>10	Middels/Dårlig	Suppler med andre metoder: - Korngradering - Telehivtest - Porøsitet

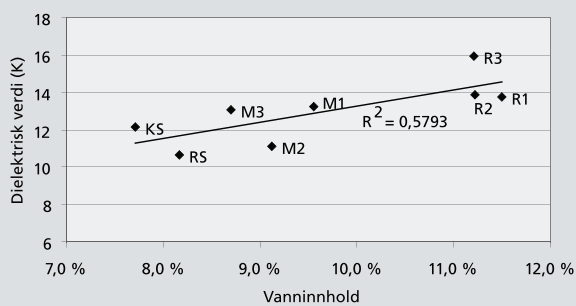
plasseres i vannbad for en 10 dagers vannoppsugingsperiode. Klassifiseringen etter vannømfintlighet er basert på den gjennomsnittlige dielektrisiteten i toppen av prøven etter 10 dagers vannoppsug som vist i tabell 6. Tabell 7 viser telefarlighetsklassifiseringen etter denne metoden.

I tillegg til betongmaterialene ble Klæbu silt og Ramlo sand testet som referansematerialer. Resultatene er vist i figur 4. Alle materialene kom i gruppen middels vannømfintlig. Vi ser at gjenbruksbetongen kommer signifikant over 10 i dielektrisitet, typisk i området 11-16 med middel på ca. 12. Man kan generelt ikke si at en dielektrisk verdi over 10 angir at et materiale er telefarlig. Det må da suppleres med telehivforsøk. I vårt tilfelle viste disse at materialene er telefarlige slik at indikasjonen fra TST stemmer i dette tilfellet.

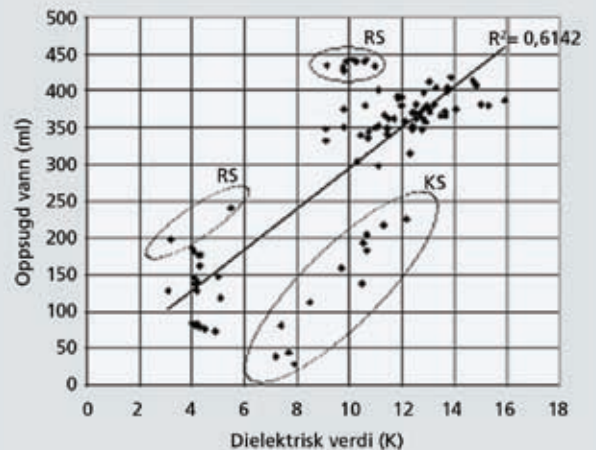
Figur 5 viser sammenheng mellom dielektrisk verdi og vanninnhold i øverste 5 cm av prøven etter testing. Den viser at med økende vanninnhold øker dielektrisiteten som ventet. Stigningen på trendlinjen er relativt liten, og med den usikkerheten en opererer med kan en ikke ved hjelp av TST skille materialer med mindre forskjell i vanninnhold etter testing enn ca. 2,5%.



Figur 4. Utvikling i dielektrisk verdi gjennom forsøksperioden.. KS=Klæbu Silt, RS=Ramlo Sand.



Figur 5. Sammenheng mellom dielektrisk verdi og vanninnhold i øverste 5 cm av prøven etter testing. KS=Klæbu Silt, RS=Ramlo Sand.



Figur 6. Sammenheng mellom dielektrisk verdi og oppsugd vann. KS=Klæbu Silt, RS=Ramlo Sand, resten er betongmaterialene.

Sammenhengen mellom dielektrisitet og vanninnhold ser ut til å være uavhengig av materialtype, og dette tyder på at mye av vannet inne i kornene er ubundet. Det ser derfor ut som om TST også fanger opp vann som finnes inne i betongmaterialenes korn, og dette vil ha konsekvenser for hvordan materialene blir rangert etter TST.

Figur 6 viser sammenhengen mellom oppsugd vann og dielektrisk verdi. Det er interessant å se at betongmaterialene ligger samlet rundt trendlinjen, mens silt- og sandmaterialet ligger henholdsvis under og over linjen. Det trengs altså mindre vannopsug i silten før det gir seg utslag på den dielektriske verdien, og motsatt for sanden.

TST viste at betongmaterialene har middels vannømfintlighet, men kunne ikke skille mellom de ulike materialene/kornkurvene. Testen gav imidlertid et skille

mellom gjenbruksmaterialene og referansematerialet sand, der gjenbruksmaterialene fikk verdier omkring 12 sammenlignet med 10 for det ikke-telefarlige sandmaterialet som vist i figur 6, og dette er rimelig i samsvar med telehivforsøkene. Referansen av silt kom derimot ikke ut i samsvar med telehivresultatene, sannsynligvis på grunn av for hard tørking (sammenklebing av siltpartiklene) før testing.

Det er samlet en del erfaring rundt metoden, og den bør undersøkes nærmere for brukbarhet av alternative materialer, og om den kan være en aktuell test som supplement til korngraderingskriteriet.

Konklusjon og anbefaling for videre arbeid

Disse forsøkene tyder på at gjenbruksbetong er vesentlig mer telefarlig enn hva finstoff-/korngradningskriteriene skulle tilsi, og at disse kriteriene ikke er strenge nok for gjenbruksbetong. Noe av årsaken til dette antas å ha sammenheng med materialenes store porøsitet og det store spesifikke overflatearealet på finstoffet.

Det er funnet at begge materialene som er undersøkt tilfredsstillende til bestandighet etter fryse/tine-vekslinger gitt i NS-EN 13242 forutsatt at de ligger tørt og ikke er utsatt for tinesalter.

“Tube suction test”, TST, som er en relativt ny og lovende test for naturmaterialer, viste at betongmaterialene har middels vannømfintlighet, men kunne ikke skille mellom de ulike gjenbruksmaterialene og de ulike kornkurvene i vår undersøkelse. Testens potensiale for bruk også for gjenbruksmaterialer bør undersøkes nærmere.

Det ser ut til at telefarlighetskriteriene gitt i Hb018 ikke uten videre kan brukes på gjenbruksbetong som ubundet materiale. Det anbefales derfor å utføre videre forsøk med fokus på finstoffinnhold, mineralogi, overflateareal og hvordan langtidsegenskaper som fasthetsøkning virker inn på telefarligheten i gjenbruksbetong.

Litteraturliste

Aurstad, J. (2001). RIT 2002: Oppfølging av forsøksfelt med gjenbruksmaterialer 1999-2000. SINTEF bygg- og miljøteknikk, vegteknikk. Prosjektnr: 22g177.02.

Aurstad, J. (2003). Gjenbruk av knust betong og tegl i vegbygging. Testing av mekaniske egenskaper – erfaringsinnsamling. Gjenbruksprosjektet, prosjektrapport nr. 1. Statens vegvesen Vegdirektoratet, Teknologivdelingen. Intern rapport nr. 2309.

Aurstad, J. (2005). Gjenbruk av betong. Gjenbruk av knust betong i vegbygging. Mekaniske egenskaper og testmetoder. Gjenbruksprosjektet prosjektrapport nr. 11. SINTEF/Statens vegvesen Vegdirektoratet, Teknologivdelingen, desember 2005.

Aurstad, J. og Hoff, I. (2005). Finstoffets betydning i knust betong. Undersøkelse av teleegenskaper. SINTEF Teknologi og Samfunn, Veg- og jernbaneteknisk. Prosjektnr. 503516.

Blankenagel, B. J. & Guthrie, W. S. (2006). Laboratory Characterization of Recycled Concrete for Use as Pavement Base Material. Transportation Research Board, 85th Annual Meeting, January 22-26, 2006, Washington, D. C.

Chamberlain, E. J. (1981). Frost Susceptibility of Soil. Review of Index Tests. CRREL monograph 81-2. Hanover, N.H., 1981.

Guthrie, W. S. m.fl. (2001). Repetability and Reliability of the Tube Suction Test. Transportation Research Record 1772, Paper No. 01-2486. pp. 151-157.

Guthrie, W. S. m.fl. (2002). Determining Aggregate Frost Susceptibility with the Tube Suction Test. Cold Regions Engineering. Cold Regions Impacts on Transportation and Infrastructure. Proceedings of the eleventh international conference. May 20-22, 2002. Anchorage, Alaska. Edited by Merrill, K. S.

Jacobsen, S. & Solberg, S. (2001). Frost Testing of Porous and Recycled Aggregates. NORDTEST Project 1440-99. Technical Report 458. Project report 2001. ISBN 82-536-0719-9.

Kaplar, C. W. (1974). Freezing Test for Evaluating Relative Frost Susceptibility of Various Soils. Technical report 250. CRREL, Hanover, New Hampshire.

Karlsson, M. (1998). Reactivity in Recycled Concrete Aggregate. Chalmers University of Technology, Division of Building Technology. 2nd PhD International Symposium in Civil Engineering, Budapest, 1998.

Konrad, J.-M. (1999). Frost susceptibility related to soil index properties. Department of civil engineering, Université Laval, Canada.

Mehus, J. m.fl. (2000). Bruk av resirkulert tilslag i bygg og anlegg – status 2000. RESIBA – prosjektrapport 01/2001. ISBN 82-536-0705-9.

Myhre, Ø. m.fl. (2003). Ubunden bruk av resirkulert tilslag i vegger og plasser. RESIBA – prosjektrapport 05/2002. ISBN 82-536-0791-1.

Myren, S. A. (2005). Frostbestandighet av resirkulert tilslag. Gjenbruksprosjektet, prosjektrapport nr. 10. Teknologirapport nr. 4211. Statens vegvesen, vegdirektoratet, teknologivdelingen, november 2005.

Petkovic, G. & Lillestøl, B. (2002). Materialeegenskaper for resirkulert tilslag. RESIBA – prosjektrapport 02/2002. ISBN 82-536-0770-9.

Saarenketo, T. m.fl. (1998): Moisture susceptibility and electrical properties of base course aggregates. Proceedings of BCRA'98, Vol.3, July 6-8, Trondheim, Norway, pp. 1401-1410.

Statens vegvesen (2005). Håndbok 018 Vegbygging. ISBN 82-7207-564-4. Vegdirektoratet, 2005.

Syed, I. m.fl. (2000). Tube Suction Test for Evaluating Aggregate Base Materials in Frost- and Moisture-susceptible

Environments. Transportation research record. Journal of the transportation research board. No. 1709. Geotechnical aspects of pavements, 2000.

NS-EN 13242 Utgave 1, 2003. Tilslag for mekanisk og hydraulisk stabiliserte materialer til bruk i bygg- og anleggsarbeid og vegbygging (innbefattet rettelsesblad AC:2004)

NS-EN 1367-1 Utgave 1, 2000. Prøvningsmetoder for termiske egenskaper og forvittringsmotstand for tilslag – Del 1: Bestemmelse av motstand mot frysing og tining.

Nettsteder

<http://www.roadscanners.com/>

<http://www.gjenbruksprosjektet.net/>

Telefarlighet eller vannfølsomhet – hva er viktig?

Frost susceptibility or water sensitivity – what is important?

Lillian Uthus, Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) (Lillian.Uthus@ntnu.no)

Nils Sigurd Uthus, Vegdirektoratet, Teknologiværdningen (Nils.Uthus@vegvesen.no)

Summary

Frost heave and spring thaw are big challenges for the countries in the cold regions. These processes have a deteriorating effect on the roads and cause delays and extra maintenance. The question is whether we may be able to detect materials that are frost susceptible and/or sensitive to water before we build them into the road by having criteria that detect these properties. Over 100 different frost susceptibility criteria exist, based on soil properties and other parameters. Still, none of the current criteria seems to give the whole truth about the frost susceptibility of soils.

Most of the current criteria are based on grading and the amount of fines, developed from the Casagrande criterion. The Austrian Mineral Criterion adds a new dimension to frost susceptibility criteria as it limits the amount of certain minerals in material less than 0,02 mm. Still, the most reliable method for laboratory testing of frost susceptibility is direct frost heave testing. The challenge is to choose a reliable test method from the number of test methods available. When it comes to water sensitivity, several simple methods are available. Tube Suction Test is a new and interesting method for testing the water susceptibility of a material. Cyclic load triaxial testing is a good method for testing the functional properties of the material with different water contents, and thereby also the water sensitivity.

Innledning

Norge er et land med relativt store årstidsvariasjoner når det gjelder klima, som igjen gir oss utfordringer når vi skal bygge vei. Vinteren i store deler av Norge består ofte av perioder med lave temperaturer og perioder med mildere vær, som igjen gir gjentatt frysing og tining av vegkonstruksjonen gjennom vinteren. I tillegg har vi store variasjoner i klima fra sør til nord og fra kyst- til innlandsklima. Dette gir i mange tilfeller, spesielt på sekundærveinettet vårt, telehivproblemer gjennom vinteren og teleløsningsproblemer

på våren. Effekten av disse utfordringene er økte kostnader til veivedlikehold, forsinkelser i personbiltrafikk, godstransport, kollektivtrafikk o.s.v som igjen fører til store kostnader for samfunnet.

En vegkonstruksjon skal fordele belastningen fra trafikken til undergrunnen slik at det ikke oppstår skader. Den må derfor bygges av bæredyktige, ikke telefarlige og vannømfintlige materialer slik at tilstrekkelig bæreevne beholdes hele året. Hvordan skal man få til dette? For å kunne gjøre noe med problemet må man identifisere hvilke faktorer som er mest avgjørende for at det oppstår telehiv og teleløsning. Det man vet er bl.a. at vannet spiller en sentral rolle i begge prosessene.

Utviklingen i Håndbok 018 har gått fra en tankegang basert på å unngå telefarlige materialer i overbygningen (frem til 1990-utgaven) til å vurdere materialene ut fra vannfølsomhet. Bakgrunnen for dette var bl.a. arbeid gjort av Christine Hauck (Hauck, 1989), og erfaringer hvor man så at enkelte materialer med høyere innhold av materiale mindre enn 0,02 mm ikke gav problemer med verken telehiv eller teleløsning.

I denne artikkelen ønsker vi å belyse temaet rundt vannfølsomhet og telefarlighet i overbygningsmaterialer og se på mulige retninger Norge kan se på for å sikre at man ikke bygger veier med telefarlige eller vannfølsomme materialer i fremtiden.

Norske retningslinjer for telefarlighet og vannfølsomhet

Det norske telekriteriet har som så mange andre telekriterier sin opprinnelse i Casagrandes telekriterium. I 1932 fremla Arthur Casagrande en "tommelfingerregel" til bruk som veiledning til ingeniører (Casagrande, 1932). Han satte telefarlighet i forbindelse med porestørrelse i ubundne materialer og fant ut at et materiale er ikke telefarlig dersom den karakteristiske

porestørrelsen er større enn 0,01 mm. Porestørrelsen er direkte knyttet til gradering og finstoffinnhold. Dette kriteriet viste seg å identifisere 85 % av de telefarlige materialene. (Kaplar, 1974)

Krav til materialer til bruk i bærelag tillater ikke mer enn 8 % mindre enn 0,063 mm av materiale mindre enn 20 mm. Dette kravet ble innført i 1990 og var basert på arbeid gjort av Hauck (1989). Dette kriteriet er mer basert på å unngå vannfølsomhet i materialene enn telefarlighet. Kravet til alle overbygningsmaterialer er i tillegg at de skal være ikke telefarlige, dvs. at ikke mer enn 3% (av materiale mindre enn 20 mm) skal være mindre enn 0,02 mm og at innholdet av humus ikke skal overstige 1 % av materiale mindre enn 0,5 mm. Kravet til humusinnhold er basert på erfaringer gjort i Statens vegvesen. I tillegg er det også et krav om at dersom innhold av kalk eller glimmer overstiger 12% skal materialene vurderes spesielt, da mest med tanke på abrasiv motstand. Kravene til bærelagsmaterialer gjelder ferdig utlagt materiale.

Et materiales telefarlighet defineres i Håndbok 018 (Vegdirektoratet, 2005) ut fra en skala fra T1, ikke telefarlig til T4 meget telefarlig. Tabell 1 viser klassifiseringskravene.

Tabell 1. Klassifisering av materialer etter telefarlighet (Håndbok 018, 2005)

Telefarlighetsgruppe	Av materiale <20mm (masse %)		
	<2µm	<20µm	<200µm
Ikke telefarlig T1		<3	
Litt telefarlig T2		3-12	
Middels telefarlig T3		>12	<50
Meget telefarlig T4	<40	>12	>50

Norsk standard

I 2003 kom NS-EN 13242 Tilslag for mekanisk stabiliserte og hydraulisk stabiliserte materialer til bruk i bygg- og anleggsarbeid og vegbygging og NS-EN 13285 Ubundne tilslag – spesifikasjon (Standard Norge, 2003), Begge standardene er europeiske CEN standarder og er dermed gjeldende for Norge også, som har forpliktet seg til å følge CEN standarder gjennom å være EØS medlem.

NS-EN 13242 spesifiserer egenskapene for tilslag som fås ved produksjon av naturlige, industrielt fremstilte eller resirkulerte materialer brukt som mekanisk og hydraulisk stabiliserte materialer for bygg- og anleggsarbeid og vegbygging.

Her er det satt krav til at finstoffinnhold skal deklarerer for alle typer tilslag (grovt, fint og samfengt). Hvis finstoffinnholdet (<0,063 mm) i fint tilslag (≤6,3 mm) er større enn 3 masseprosent og det foreligger

dokumentert bevis på tilfredsstillende bruk, er det ikke behov for videre testing. Når det kreves skal skadeligheten av finstoff i tilslaget vurderes i samsvar med tillegg A i standarden, som er et normativt tillegg.

Finstoffet anses som ikke-skadelig når én av følgende fire betingelser er oppfylt:

- det totale innholdet av finstoff i fint tilslag er høyst 3% eller annen verdi i følge bestemmelsene som gjelder på stedet der tilslaget skal brukes
- sandekvivalentverdien (SE), ved prøving i samsvar med NS-EN 933-8, overskrider en angitt lavere grenseverdi
- metylenblåttprøvingen (MB), ved prøving i samsvar med NS-EN 933-9, gir en verdi som er mindre enn en bestemt angitt grenseverdi
- samme ytelse som kjent, tilfredsstillende tilslag, eller det foreligger bevis på tilfredsstillende bruk

Per i dag er det ikke satt noen nøyaktige grenseverdier for testresultatene, da det ikke foreligger tilstrekkelig bevis fra bruk av prøvingsmetodene. Standarden anbefaler at grenseverdiene blir fastsatt på grunnlag av erfaring fra det stedet materialene blir brukt.

NS-EN 13285 gjelder ubundne tilslag til bruk i bygging og vedlikehold med øvre kornstørrelse fra 8 til 80 mm og nedre kornstørrelse 0 mm ved leveringstidspunktet. Denne standarden er gjeldende, men ikke tatt i bruk i Norge.

Her kreves det bl.a. at kravene til finstoffkvalitet i NS-EN 13242 skal følges. Mengden finstoff <0,063 mm i den kategorien materialet faller under må deklarerer, både maksimumskategorien for mengde finstoff og en minimumskategori for mengde finstoff. Disse to klassene må velges slik at ikke forskjellen blir mindre enn 3 % mellom dem.

Under spesielle forhold skal telefarlighet, permeabilitet og utvasking vurderes. Det finnes per i dag ikke nok erfaring med testmetoder for å sette toleransegrenser som kan brukes i hele Europa. En slik testmetode kan være direkte telehivstest, permeabilitet eller en mer indirekte metode.

For resirkulert tilslag gir tillegg A i standarden en anbefaling om at innhold av organisk materiale (humus) ikke må overstige 0,1 %.

Tele-/vannfølsomhetskriterier fra andre land

Sverige

I Sverige benyttes ATB VÄG (2005) til dimensjonering av veg. I tillegg er det utviklet et dataprogram som

heter PMS Objekt, som er mer et hjelpemiddel for å kunne utføre beregningene i ATB VÅG fra kapittel C3 og utover. Formelt er det ATB Våg som gjelder, så PMS Objekt vil neppe ta over.

Kravene til materialene i overbygningen her er at materialene skal være ikke-telefarlige, uten at man bruker klassifiseringen 1-4 for telefarlige materialer som gjelder jordarter i undergrunnen. Det finnes ingen sikring mot telefarlighet/vannfølsomhet i PMS objekt. Det er opp til utbygger å sørge for at materialene som brukes ikke er telefarlige/vannfølsomme.

Østerrike

I Østerrike er det såkalte mineralkriteriet sentralt i vurderingen av telefarlige materialer. Dersom materialet inneholder mer enn 4 % mindre enn 0,063 mm etter kompaktering må man undersøke hvor stor mengde materiale som passerer 0,02 mm. Dersom mer enn 3 masse-% passerer 0,02 mm (Casagrandes prinsipp) må mineralkriteriet undersøkes. For identifikasjon av de aktuelle mineralene benyttes i hovedsak XRD-analyse (røntgendiffraksjon), som er en semikvantitativ metode for bestemmelse.

Selv om det østerrikske kriteriet er noe mer komplekst enn et kriterium kun basert på gradering og finstoffinnhold, viser det seg at dette ikke gir den fulle sannheten heller. Kügler m.fl. (2005) konkluderte med at mineralkriteriet i noen tilfeller utelukker materialer som ikke er telefarlige og er dermed for rigid. Uthus m.fl (2006) konkluderte at mineralkriteriet identifiserte det telefarlige materialet i studiet, men at XRD-metoden er for unøyaktig til slik bruk. Ved identifikasjon av omvandlede mineraler er SEM-analyse (sveipeelektronmikroskop) mer nøyaktig.

En annen ting man bør merke seg er at stort sett alle de mineralene som er listet opp i mineralkriteriet er mineraler som er kjent for å ha en form for interaksjon med vann, dvs. vannfølsomme mineraler.

Klassifisering av materialer etter vannfølsomhet

I Norge har man valgt å klassifisere materialenes vannfølsomhet ved å stille krav til at ikke mer enn 8 % av materiale mindre enn 20 mm skal passere 0,063 mm siktet. Dette er et krav som ikke tar hensyn til ulikheter i materialenes mineralogi, kornform eller andre egenskaper som har betydning for et materiales vannfølsomhet. For å kunne være mer spesifikk når det gjelder enkeltmaterialers evne til å suge opp og holde på vann, finnes det flere testmetoder som kan være egnet til dette. En testmetode som har vist interessante resultater er Tube Suction test.

Tabell 2. Klassifisering av telefarlighet etter det østerrikske mineralkriteriet (Önorm B 4811)

Mengde <0.02 mm	Mineralogisk sammensetning av fraksjonen <0.02 mm	Klassifisering
< 3 masse%	Ingen mineralogisk analyse nødvendig	Ikke telefarlig
≥ 3-5 masse%	1. Ikke-aktive mineraler: 100 % 2. Blandinger av ikke-aktive og aktive mineraler (relatert til 5 masse% <0.02 mm). Både grenseverdiene a) til e) og i tillegg f) til j) må ikke overskrides a) 10 % kaolin b) 30 % kloritt c) 30 % vermikulitt d) 40 % smektitt e) 50 % glimmer f) 60 % glimmer + kloritt g) 50 % glimmer + kloritt + kaolin h) 50 % glimmer + kaolin i) 40 % glimmer + kloritt + kaolin + smektitt j) 40 % blanding av andre phyllosilikater Mellom 3 masse% (100 % aktive mineraler tillatt) og 5 masse% må grenseverdiene interpoleres lineært 3. I tilfelle intens rødbrun farge og ved mistanke om jernoksider/hydroksider må telehivtest utføres	Ikke telefarlig dersom ingen av grenseverdiene overstiges. Dersom disse overstiges må telehivtest utføres for å bestemme om materialet er telefarlig
>5-8 masse%	Lineær interpolasjon mellom 5 masse% (a) til j)) og 8 masse% <0.02 mm (ingen aktive mineraler tillatt)	Ikke telefarlig dersom ingen av grenseverdiene overstiges. Dersom disse overstiges må telehivtest utføres for å bestemme om materialet er telefarlig

Tube Suction Test (TST)

TST er en ny testmetode som ble utviklet av FINNRA – Finnish National Road Administration (det finske vegvesen) i samarbeid med TTI – Texas Transportation Institute (Saarenketo og Scullion, 1995) for å kunne undersøke sugepotensialet og vannfølsomheten til ulike vegbyggingsmaterialer. TST baserer seg på den dielektriske verdien til materialene, som er en indikasjon på hvor stor lagringskapasitet materialene har av ladninger i et elektrisk felt.

Den dielektriske verdien er følsom for mengden ubundet vann i materialet, dvs. vann som ikke er bundet til partiklene. Mengden av dette ubundne vannet er funnet å ha stor betydning for den ødeleggende virkningen vann kan ha på ubundne materialer i vegbygging, både når det gjelder tap av bæreevne og telefarlighet, fordi det er mobilt. (Kommentar: Greit, men det finnes en overgang mellom bundet og ubundet da det

er det ubundne vannet som skaper problem.)

I TST finnes vannfølsomheten ved å måle den gjennomsnittlige dielektriske verdien på overflaten av en kompaktet, sylindrisk prøve etter en 10 dagers periode med vannoppsug. Dielektrisiteten måles ved hjelp av et Percometer, som er et spesialmåleutstyr for dielektrisitetmåling og måling av elektrisk konduktivitet (ledningsevne).

Guthrie m.fl. (2002) foreslo en klassifisering av materialer etter vannfølsomhet ved målt dielektrisitet som vist i tabell 3.

Tabell 3. Klassifisering av materialer etter vannfølsomhet (Guthrie m.fl., 2002)

Dielektrisk verdi	Vannfølsomhet
< 10	Liten
10-16	Middels
>16	Stor

Bruk av telehivtest for klassifisering av materialer etter telefarlighet

Per i dag er bruk av telehivtest for klassifisering av materialer etter telefarlighet mest brukt til forskningsformål – selv om det til nå er den mest komplette metoden for å teste om et materiale er telefarlig eller ikke, og derfor kunne hatt større praktisk anvendelse. Det finnes mange typer telehivtester som tar utgangspunkt i ulike teorier, og det er ikke lett å vite hvilken test man bør velge. Den mest kjente metoden er CRRELS metode (Kaplars, 1974).

CRREL - metoden

Formålet med denne testen var å teste materialers potensial for telehiving under tilsvarende forhold som i felt. Det ble utført utallige studier av felldata fra mange steder i USA som dannet grunnlaget for bestemmelse av frostnedtrengningshastigheten i teleforsøket.

I dette teleforsøket bygges materialet inn i en sylindrisk form og komprimeres til en standardisert komprimeringsgrad med optimalt vanninnhold. Den ferdig komprimerte prøven har en høyde på 152 mm og en diameter på 143 mm. Grunnvannsstanden settes i underkant av prøven og det settes en last på toppen av prøven på 3,5 kPa som tilsvarer vekten av et 15 cm tykt dekke. Prøven fryses fra toppen med en konstant frostnedtrengningshastighet på 5 til 20 mm pr døgn. Opprinnelig ble det brukt voksbelagte pappsyndere, mens det i dag brukes sylindere i pleksiglass. Veggen i den sylindriske formen er delt opp i 5 ringer som kan løfte seg i takt med telehivingen, på denne måten vil veggfriksjonen ha minimal betydning for telehivingen. Telehivingen avleses manuelt på et mekanisk måleut-

styr på toppen av prøven. Temperaturen måles ved hjelp av kopper-termoelementer i minst tre nivåer på prøven.

Ut fra erfaringer med testing av ulike materialer er det etablert en klassifisering som vist i Tabell 4.

Tabell 4. Klassifisering av materialer etter teleskytende evne (Kaplars, 1974)

Gjennomsnittlig telehiv (mm/døgn)	Klassifisering (teleskytende evne)
0 – 0,5	Ubetydelig
0,5 – 1,0	Svært liten
1,0 – 2,0	Liten
2,0 – 4,0	Middels
4,0 – 8,0	Stor
> 8,0	Svært stor

Metoden er beskrevet på mange ulike måter ettersom ulike laboratorier har tatt i bruk testen og endret litt på enkelte komponenter for å gjøre testen bedre. Ved SINTEF/NTNU i Trondheim har de laget sin modifikasjon av dette utstyret.

VTI - metoden

Ved VTI i Sverige er det utarbeidet en telehivtest (Hermansson og Guthrie, 2005) for bruk til ubundne materialer. Hensikten med denne testen var å teste materialene under forhold mest mulig lik de forholdene man har i Sverige. Det finnes per i dag ingen standard som beskriver denne testen da den kun er beskrevet i artikler av Åke Hermansson. Uthus m.fl. (2006) benyttet også denne testen for bestemmelse av materialers telefarlighet. Testmetoden har vist gode korrelasjoner mot felldata.

Prøvene er ca 600 mm i lengde og har en diameter på 122 mm. Prøvesylinderen består av to deler laget i pleksiglass; en nedre sylinder på 480 mm for vannoppsug og en "hette" på 200 mm på toppen. Hensikten med et slikt design er at prøven fryses inni "hetten" som lar seg løfte uten fare for fastfrysing. Kun de øverste 100 mm av prøven er frosset under testing, mens de nederste 500 mm simulerer den kapillære stigningen av vann til frysefronten, gjennom for eksempel et forsterkningslag og opp i bærelaget.

En vekt på 10 kg er plassert på toppen av prøven for å simulere 0,5 m overlaging. På toppen av prøven er det også plassert en LVDT som er knyttet opp mot en datamaskin for å logge telehivingen. I tillegg er det påmontert hele 24 temperatursensorer med 5 mm mellomrom inni "hetten", og frysingene er datamaskin-kontrollert.

Det finnes foreløpig ingen klassifiseringstabell for inndeling av materialer etter telefarlighet, men gjennom videre utvikling og testing vil dette mest sannsynlig komme på plass. Den eneste referansen man har er en meget telefarlig silt som gav en telehivingshastighet på 0,25 mm/time eller 6 mm/døgn.

Segresjonspotensiale

Teorien rundt segregasjonspotensialet eller telehivingspotensialet ble utviklet av Konrad og Morgenstern tidlig på åttitallet (Konrad og Morgenstern, 1981). Segresjonspotensialet, SP, er en faktor som beskriver opptaket av vann i forhold til temperaturgradienten i fryseseonen. Segresjonspotensialet er definert som tilstrømningshastigheten for vann ($v(t)$) dividert på temperaturgradienten i fryseseonen (grad $T_f(t)$). Segresjonspotensialet uttrykker et materiales evne til å utskille vann i underkant av en islinse;

$$SP = \frac{v(t)}{\text{grad } T_f(t)}$$

Ved Universitetet i Laval er det utviklet en telehivtest for undersøkelse av materialers segregasjonspotensiale (Konrad, 2005). Prøvene har en diameter på 100 mm og en høyde på mellom 120 og 160 mm. Sylinderveggene består av ringer i PVC for å hindre fastfrysing. Temperatursensorer monteres på innsiden av sylinderveggene og kalibreres jevnlig for å sikre en nøyaktighet på ± 0.02 °C. Prøvene fryses fra toppen og ned og prøven har fri tilgang på vann i bunnen av prøven. Temperaturen i topp og bunn av prøven holdes konstant lik henholdsvis -3 – 4 °C og $+1,0$ – $1,5$ °C. Etter en viss tid inntrer en stabil situasjon med en stasjonær frysefront og temperaturgradienten og den totale telehivingen blir logget av en datamaskin. Etter frysing blir vanninnholdsprøver tatt både fra den frosne og den ikke-frosne delen, og SP beregnes.

Det er ikke etablert noe system for klassifisering av materialer etter segregasjonspotensialet.

Konrad og Lemieux (2005) fant bl.a. at segregasjonspotensialet for et velgradert materiale med en viss andel av leirmineralet kaolin økte lineært med økende finstoffandel, inntil finstoffet dannet en matriks som omsluttet de grovere partiklene. I tillegg fant de at ved en viss finstoffandel så økte segregasjonspotensialet med økende kaolininnhold, som igjen illustrerer betydningen av mineralogi for telehiv.

Norske studier av vannfølsomhet/telefarlighet

Studie av grusmaterialers vannømfintlighet

Christine Hauck (Hauck, 1989) gjorde en studie av grusmaterialers vannømfintlighet. Spørsmålene hun ønsket å besvare var;

- Hvordan oppfører et grusmateriale seg under vibrerende last?
- Kan det danne seg høye poretrykk idet lasten blir påført, dersom bærelaget er vannmettet?
- Hva skjer med finstoffet under slike trykkvariasjoner?

- Hvilken rolle spiller mineralsammensetning og kornstørrelsesforhold?
- Er kornskjelettets struktur avhengig av mengden finstoff og i så fall, hvilken kornstørrelse er av betydning?

For å kunne besvare disse spørsmålene søkte hun svar i litteraturen og i materialenes iboende egenskaper, i tillegg til at hun utførte forsøk med vibrerende belastning (CBR). For å kunne si noe om hvordan kornskjelettet forandret seg med mengden finstoff stabiliserte hun en rekke av grusprøvene med epoksy. Disse ble preparert til tynnslip og tolket ved polarisasjonsmikroskopi.

Ut fra erfaringene Hauck samlet både i laboratoriet og fra litteraturen ble det konkludert med at grusmaterialers vannømfintlighet bør klassifiseres ut fra materialenes kornfordeling, der gjennomgang tilsvarende en korndiameter på 0,075 mm av materiale mindre enn 19 mm er utslagsgivende. Hun fant at prosentandel materiale mindre enn 0,020 mm kan variere mellom 50 og 90 % av den totale mengde materiale $< 0,075$ mm uten at dette har virkning på grusmaterialers stabilitet målt ved CBR-metoden.

Videre konkluderte hun med at når et grusmateriale klassifiseres ut fra kornkurven, uten hensyn til bergartsammensetning, bør mengde finstoff mindre enn eller lik 0,075 mm ikke overskride 7%. Innhold av skiferbergarter, kalksteinsbergarter eller plastisk finstoff fører til nedsatt friksjon og oppbygging av poreovertrykk. Dersom skiferbergarter ikke er tilstede og finstoffet ikke er plastisk, kan finstoffinnhold mindre enn eller lik 0,075 mm være opptil 9%.

Haucks arbeid dannet grunnlaget for de kravene vi har til finstoffinnhold i håndbok 018 i dag, men kravene er justert i forhold til nye siktstørrelser (0,063 mm i stedet for 0,075 mm, 20 mm i stedet for 19 mm). Det man kan merke seg er at alle tester ble utført på grusmaterialer, ingen på knust fjell. I dag er bruken av grus svært begrenset høyt oppe i konstruksjonen, og da som knust grus.

Studie av vannømfintlighet og telefarlighet for knust fjell

Uthus m.fl. (2006) gjorde en begrenset studie av vannfølsomhet og telefarlighet med fokus på betydningen av gradering, finstoffinnhold og mineralogi. Utgangspunktet for studiet var en finstoffrik Fuller-kurve 0-22 mm med graderingstall $n=0.35$ som ikke er tillatt i følge bærelagskurver i 018 og telekriteriene for ubundne materialer.

I studiet (Uthus m.fl., 2006) ble det brukt tre materialer, to materialer tatt fra to forskjellige steder i Askøy Pukkverk i Norge og et materiale fra et pukkverk utenfor Göteborg i Sverige. Alle tre materialene var av bergarten gneiss, men materialet fra Sverige var

ekstremt og inneholdt hele 30 % glimmer ved undersøkelse av mineralogi gjennom tynnslipanalyse. Det viste seg imidlertid at ved undersøkelse av mineralogi i finstoff <0,020 mm at den inneholdt mindre glimmer enn bergarten totalt, bare 11% ved XRD-analyse og 24 % ved SEM-analyse.

Uthus m. fl. (2006) omfattet en vurdering av materialenes vannfølsomhet og telefarlighet ut fra Casagrandes telekriterium, det norske klassifiserings-systemet for telefarlige materialer, det østerrikske mineralkriteriet, telehivtest utført ved VTI i Sverige og syklisk treaksialtesting av materialene ved ulike vanninnhold.

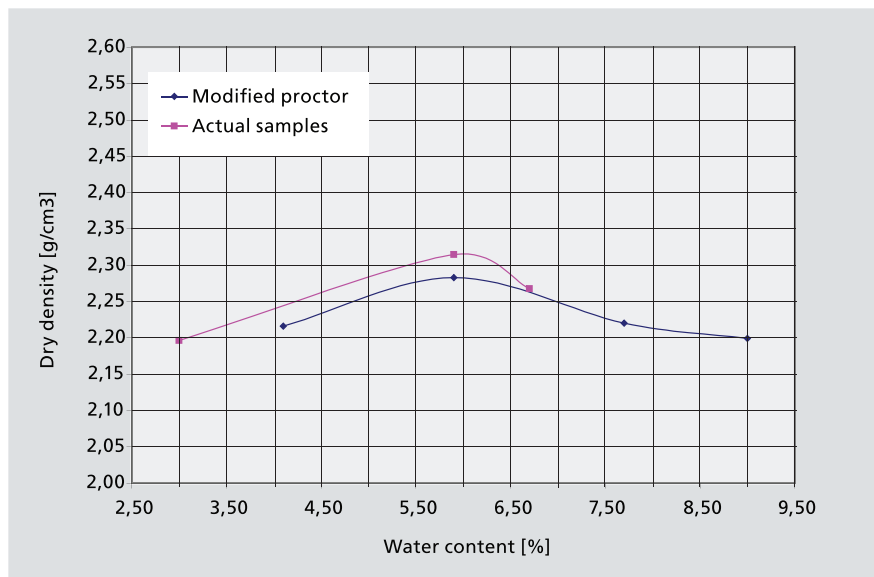
Figur 1b viser et eksempel på resultater fra syklisk treaksialtesting på kubisk Askøy materiale. En kan se ut fra figuren at resilientmodulen reduseres ved økende vanninnhold (selv om materialets tørrdensitet øker).

En enda mer tydelig tendens ser vi på figur 2, som

viser akkumulerte permanente aksielle tøyninger for testing ved et sidetrykk på 150 kPa og en økende deviatorspenning, hvor en ved økende vanninnhold får en betydelig økning i utviklingen av permanente deformasjoner.

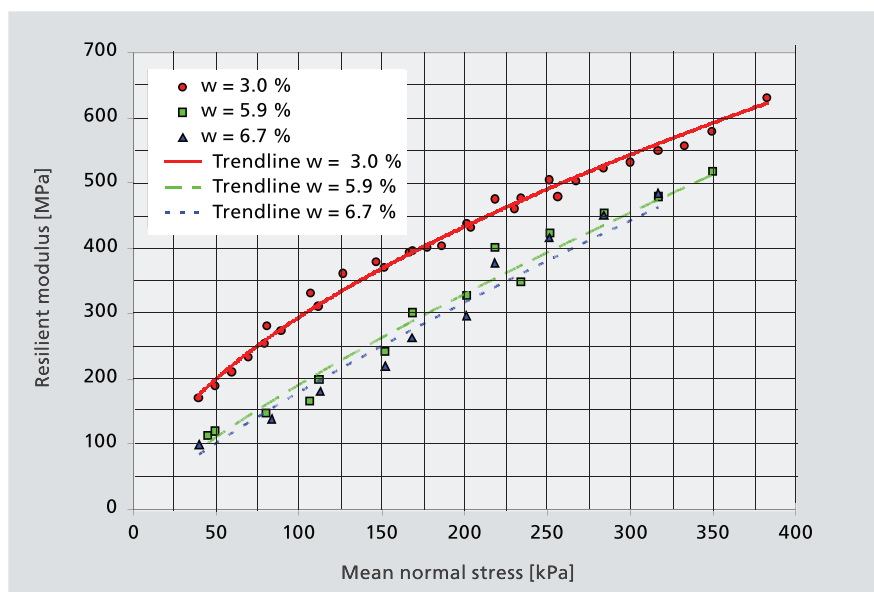
Figur 3 viser resultatene fra telehivtest utført på materialene med to parallelle tester per materiale. Materiale 1, representert ved den grønne og den lilla linjen, er et kubisk materiale fra Askøy. Materiale 2, representert ved den turkise og den gule linjen, er et mer flisig produkt fra Askøy og materiale 3, representert ved den blå og rosa linjen, er materialet fra Sverige med høyt glimmerinnhold. Figuren viser en klar forskjell mellom materiale 1 og 2 og materiale 3 når det gjelder telehivingshastighet.

Studien konkluderte med at enkle kriterier basert på finstoffinnhold og gradering kan gi verdifull informasjon og fungere som tommelfingerregler, men at de



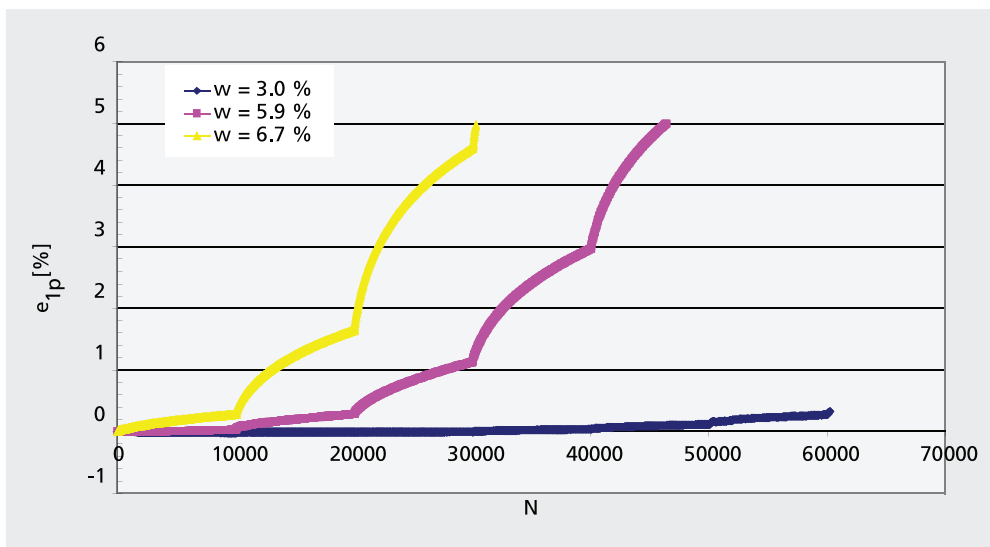
Figur 1a og 1b. Syklisk treaksialtesting på kubisk Askøy materiale. Sammenhengen mellom prøvenes vanninnhold og tørrdensitet er også vist.

1a. Modifisert Proctor for kubisk Askøy 0-22 mm (Uthus m.fl, 2006)

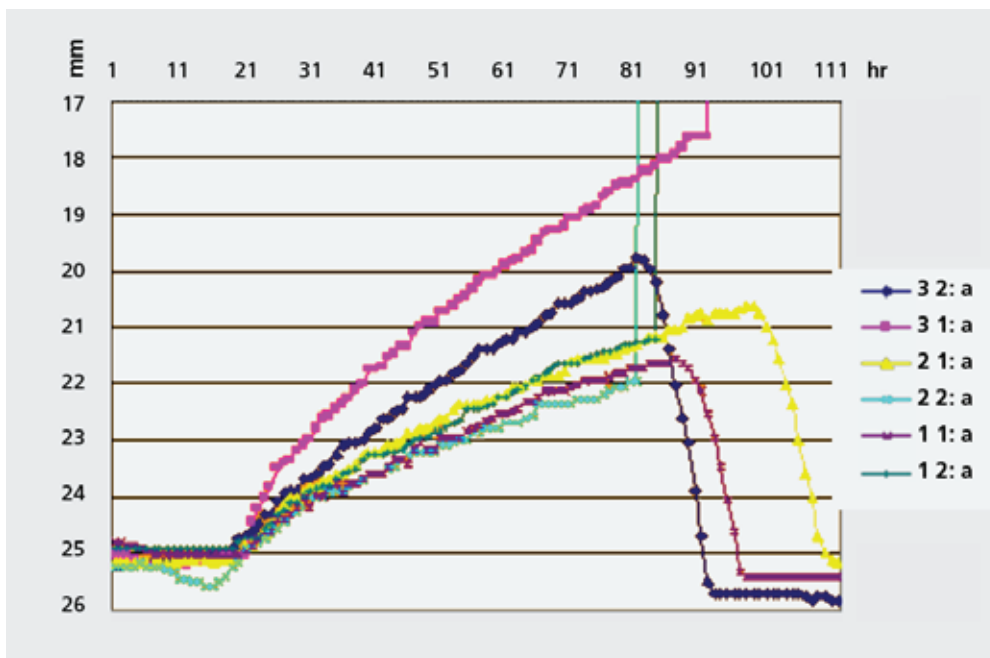


1b. Resilientmodul mot middelspenning for kubisk Askøy 0-22 mm (Uthus m.fl, 2006)

Figur 2. Akkumulerte permanente aksielle tøyninger som funksjon av antallet lastrepetisjoner (Uthus m.fl, 2006)



Figur 3. Resultater fra telehivtest utført på tre materialer med samme gradering (Uthus m.fl, 2006)



ikke holder mål i alle tilfeller. Det østerrikske mineralkriteriet tilfører en ekstra dimensjon til vurderingen av telefarlighet/vannfølsomhet ved å begrense mengden av spesielt vann-/frostfølsomme mineraler og dermed tillate høyere finstoffinnhold dersom disse ikke finnes. Det viser seg at dette kriteriet også har sine svakheter, da det i mange tilfeller er for strengt og diskvalifiserer fullt brukbare materialer.

Når det gjelder vannfølsomhet konkluderte studien med at alle tre materialene var mer eller mindre vannfølsomme, men at materialet med mest glimmer var mest følsomt for økt vanninnhold spesielt for utviklingen av permanente tøyninger. Dette studiet viser en klar sammenheng mellom materialers vannfølsomhet og telefarlighet da det mest vannfølsomme materialet også gav størst telehiv ved telehivtest i laboratoriet.

Studier av telefarlighet i alternative materialer

Aurstad og Hoff (2005) gjorde en viktig studie av finstoffets betydning for telefarlighet i knust betong. Her ble ulike metoder for klassifisering benyttet, både kriterier basert på gradering og finstoff og telehivtest, for å se hvilke kriterier som gav best resultat for knust betong.

Her ble det konkludert med at kriteriene basert på gradering og finstoffinnhold ikke fanger opp materialenes telefarlighet når det gjelder knust betong, da disse kriteriene forutså lite eller ingen telehiv, mens man i realiteten så at man ved telehivtesting fikk stor telehiv.

Aursand (2006) gikk litt videre i sin masteroppgave og så på både telefarlighet ved frysetest og vannfølsomhet ved Tube Suction Test (TST) for knust

betong. Han kom til mye av de samme konklusjonene som Aurstad og Hoff (2005) når det gjelder telefarlighetskriterier. Det ble funnet at knust betong var telefarlig selv ved lave finstoffinnhold, noe som ble satt i sammenheng med stor porøsitet og stort spesifikt overflateareal på fin-stoff. I tillegg fant han at betong blandet med tegl gav mindre telehiv enn ren betong. Bruk av TST viste seg ikke å være like vellykket på betong som på naturlig forekommende materialer.

Konklusjoner

Kriterier basert på finstoffinnhold og gradering fungerer bra som tommelfingerregler i vegbygging, og vil i de aller fleste tilfeller ekskludere telefarlige/vannfølsomme materialer. Man har imidlertid sett flere eksempler på at disse kriteriene ikke holder mål, for eksempel ved materialer med en spesiell mineralogi eller alternative materialer som for eksempel knust betong. I Sverige er ansvaret for eventuelle problemer med telehiv eller teleløsning lagt over på entreprenøren som selv må sørge for at materialene som bygges inn i konstruksjonen er gode nok. Noe som bør bemerkes er at teleløsningsproblematikken ikke bare handler om materialenes vannfølsomhet, men også om bl.a. dreneringsforhold, permeabilitet, grunnvannstand, frysefront o.s.v. Dette bør også tas i betraktning ved bygging av nye veier.

Det viser seg foreløpig at den sikreste måten å finne ut om et materiale virkelig er telefarlig i laboratoriet, er å benytte telehivtesting. Utfordringen her er å velge en metode som ligner mest mulig på de forholdene man har i felt. I tillegg tar denne type testing forholdsvis lang tid å utføre.

Når det gjelder vannfølsomhet kan syklisk treak-sialtesting være et godt alternativ for å se på funksjonsegenskapene til materialene ved ulike vanninnhold. Utfordringen med denne testen ligger i å ha en grense for hvor vannfølsomt et materiale kan være, dvs. hvor store deformasjoner vi tillater.

Et alternativ til å teste materialenes deformasjonsegenskaper ved ulike vanninnhold er å benytte tester for vannoppsugingsevne eller permeabilitet, som også sier noe om materialenes oppførsel i tilknytning til vann. Tube Suction Test er en interessant test for undersøkelse av materialers vannfølsomhet.

Christine Hauck gjorde interessante funn i sin studie (Hauck, 1989) av grusmaterialer. For knust fjell er det ikke gjort noe arbeid som direkte kan sammenlignes med dette. Uthus m. fl. (2006) fant at materialer med mye finstoff (ca 13 % mindre enn 0,063 mm) ikke gav nevneverdig telehiv for to av materialene, men at de hadde en viss følsomhet for endringer i vanninnhold spesielt for utvikling av permanente deformasjoner. Det ene materialet som gav telehiv, hadde et høyt

innhold av glimmer. Studiet viste en klar sammenheng mellom telefarlighet og vannfølsomhet, da det mest telefarlige materialet også var mest følsomt for endringer i vanninnhold. Det ble ikke utført nok tester i dette tilfellet for å kunne si noe om hvor grensen for finstoff går for knust fjell.

Aurstad og Hoff (2005) og Aursand (2006) fant at ordinære kriterier for telefarlighet/vannfølsomhet ikke passer for karakterisering av alternative materialer. For disse materialene er frysetest foreløpig det beste alternativet.

Man vet at vannfølsomhet og telefarlighet i materialer er egenskaper som henger tett sammen i de fleste tilfeller. Spørsmålet er bare hvilken av disse egenskapene som er mest kritisk og dermed dimensjonerende? Ser vi på hva som er problemene ute på veiene er teleløsningsperioden dimensjonerende for vegens levetid, og dermed blir vannfølsomheten det viktigste man undersøker ved et materiale.

Utviklingen videre, hva bør skje i Norge?

Det burde utføres lignende studier av kornskjelett ved ulike finstoffinnhold som i Haucks arbeid for knust fjell, og studier av vann/frostfølsomhet ved ulike finstoffinnhold for norske bergarter. Her burde det også undersøkes hvilke faktorer som påvirker vannfølsomheten for norske materialer.

Norge er medlem av EØS og er dermed forpliktet til å innføre CEN-standardene for ubundne materialer. NS-EN 13242 og NS-EN 13285 er i ferd med å tas i bruk. For videreutvikling av standardene er det behov for nye studier av vannfølsomhet og telefarlighet som kan danne grunnlag for bedre krav til finstoffinnhold og kvalitet. Arbeidsgruppe WG4 i standardiseringskomiteén CEN/TC 227 (Road materials) skal se på dette i europeisk sammenheng i sitt videre arbeid.

I sammenheng med håndbok 018 bør man også se på standardene og formulere finstoffkravene i henhold til det arbeidet som gjøres i CEN. En bør nok gå over til å stille finstoffkrav til hele kurven i stedet for materiale mindre enn 20 mm slik vi gjør i dag.

Bruken av testmetodene metylenblåtest og sandekvivalenttest bør utredes for norske materialer for å se om disse gir nyttig informasjon om materialenes oppførsel. I Norge har man brukt metylenblåtesten i en periode for undersøkelse av svelleleire i finstoff for asfalttilslag, og hittil er 13 analyser utført ved SINTEF. I følge Marit Haugen ved SINTEF har verdiene på de 13 prøvene vært svært lave sammenlignet med grenseverdiene for testen. Man bør diskutere hvor nyttig denne testen er for norske materialer, og evt. omfang av testing ut fra det.

Når det gjelder sandekvivalenttesten er dette også en enkel test som skal avdekke innholdet av "ødeleggende" materiale i leirpartikkeldelen av

vegbyggingsmaterialene. Testen er mye brukt i USA og har vist lovende resultater. Siden denne testen står beskrevet i CEN standardene bør den også utredes for å se hvilket variasjonsområde testen gir for våre materialer.

Man burde kanskje også se på materialenes motstand mot nedknusning i sammenheng med den initielle vannfølsomheten/telearligheten, da denne vil endre seg med tiden og akkumulert finstoffinnhold. Bærelag og forsterkningslag er forventet å ha lang levetid, og nedknusning av materialet over tid vil sette ned levetiden betraktelig på grunn av problemer i teleløsningsperioden. Her bør man se på mekanisk styrke på materialene og evt. hvor mye finstoff man må regne med at akkumuleres på grunn av dette over tid.

Tube Suction Test viser lovende resultater når det gjelder å identifisere vannfølsomme og også delvis telefarlige materialer, derfor bør denne testen utredes for norske materialer.

Referanser

ASI - Austrian Standards Institute (2001). Gesteinskörnung für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau - Beurteilung der Frostsicherheit. Önorm B 4811.

Aursand, P.O. (2006). Vurdering av frosttekniske egenskaper for knust betong. Hovedoppgave Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU.

Aurstad, J. og Hoff, I. (2005). Finstoffets betydning i knust betong, undersøkelse av teleegenskaper. Gjenbruksprosjektet DP 3.

Berntsen, G. (1993). Reduksjon av bæreevnen under teleløsningsperioden. Doktoringeniøravhandling 1993:64, Institutt for veg- og jernbanebygging. Medd. 25. NTH, Trondheim.

Casagrande, A. (1932). A new theory of frost heaving: discussion. Proceedings of US Highway Research Board. Vol. 11, Pt. I, s. 168–172.

Guthrie, W. S., Hermansson, Å. og Scullion, T. (2002). Determining Aggregate Frost Susceptibility with the Tube Suction Test. Paper Proceedings of the Eleventh International Conference on Cold Regions Engineering, Anchorage, Alaska. s 663-673.

Hauck, C. (1989). Grusmaterialerstelearlighet. Hovedoppgave ved UiO. Intern rapport 1403, Vegdirektoratet, Oslo.

Hauck, C. (1992). The effect of fines on the stability of base gravels. Publication no 65, Directorate of Public Roads, Norwegian Road Research Laboratory, Oslo. s. 5-14.

Hermansson, Å. og Guthrie, S. (2005). Frost Heave and Water Uptake Rates in Silty soils Subject to Variable Water Table Height During Freezing. Cold Regions Science and Technology, 43, s. 128-139.

Kaplar, C. W. (1974). Freezing test for evaluating relative frost susceptibility of various soils. Technical Report 250. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.

Konrad, J.M. and Morgenstern, N.R. (1981). The segregation potential of a freezing soil. Canadian Geotechnical Journal, Vol 18. s 482-491.

Konrad, J.M. (2005). Estimation of the segregation potential of fine grained soils using the frost heave response of two reference soils. Canadian Geotechnical Journal. Vol 42, No 2, pp 38-50.

Konrad, J.M. and Lemieux, N., (2005). Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material. Canadian Geotechnical Journal. Vol 42, No 2, pp 515-527.

Kugler, H., Ottner, F., Schwaighofer, B. og Strasser, W. (2005). Frost susceptibility of Unbound Bases - An Improved Mineralogical Assessment". Scientific note International Journal of Road Materials and Pavement Design. 6/2005. s. 119-138.

Saarenketo, T. og Scullion, T. (1995). Using Electrical Properties to Classify the Strength Properties of Base Course Aggregates. FHWA/TX-97. Texas Transportation Institute, College Station.

Standard Norge (2003). Ubundne tilslag – Spesifikasjon. NS-EN 13285:2003.

Standard Norge (2003). Tilslag for mekanisk stabiliserte og hydraulisk stabiliserte materialer til bruk i bygg- og anleggsarbeid og vegbygging (innbefattet rettelsesblad AC:2004). NS-EN 13242:2003 .

Sætersdal, R. (1976). Jordarters telefarlighet. Kap V i Sikring mot teleskader (Frost i Jord publikasjon nr. 17. Vegdirektoratet og NTNF. Oslo, 1976).

Uthus, L., Hermansson, Å., Horvli, I. og Hoff, I. (2006). A study on the influence of water and fines on the deformation properties and frost heave of unbound aggregates. Paper Cold Regions Conference 2006, Orono, Maine.

Statens vegvesen Vegdirektoratet (2005). Håndbok 018 Vegbygging. ISBN 82-7207-564-4.

Introduksjon til kunstig grunnfrysing og Berggrens krypmodell

Introduction to artificial ground freezing and the Berggren creep model

Anne-Lise Berggren, GEOFROST AS (alb@geofrost.no)

Summary

Artificial ground freezing (AGF) has a long history as a remedy for soil stabilization and groundwater cutoff. The method was first used in Wales, UK in 1862, and is today a ripe technology used all over the world. The method was in the beginning mainly used in shaft sinking, but has over the years been used for; stabilizing slopes, tunnelling, construction pits, underpinning, plugging of hydroelectric tunnels, make/maintain permafrost, cryogenic gas storage and removal/isolation of contaminated soil.

The paper briefly describes the method applications, performance of brinefreezing and nitrogenfreezing, and introduces you to the design of a frozen structure using the Berggren creep model.

With improved technology and reduced costs, the number of projects where the method will be cost effective is growing. This is especially true if the method is considered early in the planning of the project and not as a last resort solution. The method can be used on projects of all scales, from a single freezing pipe, up to several thousands. The method is environmentally friendly, and has a very good safety record.



Foto 1. Fryserørsinstallasjon. (Foto: Rana Blad)

Anvendelse, generelt

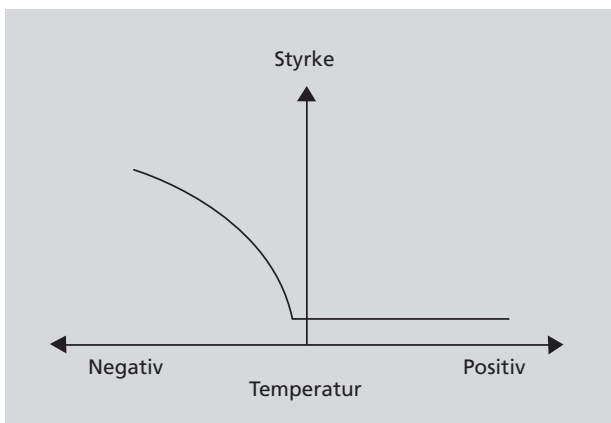
Metodens anvendelse er basert på at styrken i grunnen øker når grunnen fryser (Figur 1), og/eller at den frosne grunnen blir vanntett. Grunnfrysing benyttes oftest som støttekonstruksjon og som vanntett barriere, gjerne i kombinasjon.

Når vannet i grunnen fryser til is blir sammenbindingen av kornskjelettet mye sterkere enn i ufrosset tilstand. Jordas styrke kan øke til den kan sammenlignes med betong. (Styrken varierer dog sterkt med jordart og temperatur.)

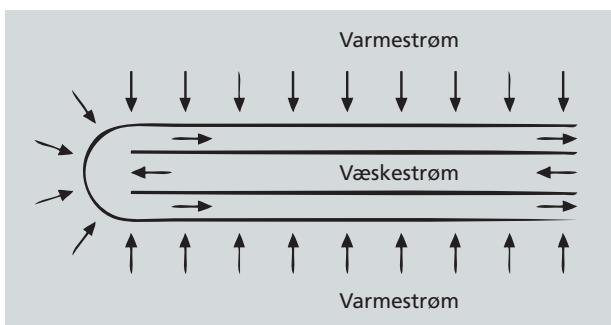
Frosten etableres ved at fryserør installeres i grunnen, vanligvis i borede hull. Fryserørene er vanligvis koaksiale, slik at et kaldt medium kan strømme inn gjennom det innerste røret og tilbake mellom indre og ytre rør (Figur 2).

Når temperaturen passerer frysepunktet, dannes frost-sylindre rundt fryserørene (Figur 3). Disse utvider seg og vokser etter hvert sammen til en ferdig frostkonstruksjon, som kan bestå av en eller flere rader. Volumet som fryses er definert og kontrollerbart.

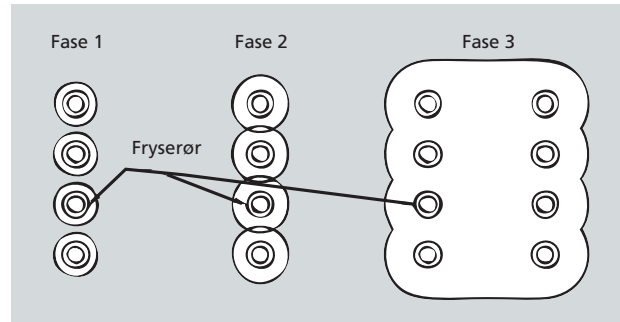
Frostkonstruksjoner kan etableres i alle geologiske formasjoner (knusningssoner i fjell, blokkig morene, deltaavsetninger, havbunn, myr etc.). Metodens eneste begrensning er relatert til strømmende vann som transporterer så mye varme at frysing blir vanskelig. Dersom man ikke finner avbøtende tiltak for en slik vannstrøm



Figur 1. Prinsipp for styrkens temperaturavhengighet.



Figur 2. Prinsipp for varmetransport som fører til frysing.



Figur 3. Prinsipp for utvikling av frost-sylindre til en frostkonstruksjon.

gjennom en planlagt frostkonstruksjon, bør andre metoder benyttes.

Fordi heftstyrken er stor, kan man også kombinere med andre konstruksjonsmaterialer som for eksempel betong og tre. Frostkonstruksjoner kan gi tette tilslutninger til uregelmessig fjell, rundt ledninger, i betongutsparinger etc. Trikkeskinner, kabler og ledninger trenger ikke kappes eller legges om fordi om de krysser traseen til en frostkonstruksjon.

Det er lite støy og rystelser forbundet med metoden, som er meget miljøvennlig.

Grunnfrysing er teknisk ansett for å være en meget sikker metode. Laboratorieforsøk og beregninger gjør resultatet forutsigbart. Temperaturmålinger og eventuell prøvetaking gjør metoden kontrollerbar.

Eksempler på bruksområder

Grunnfrysing er først og fremst en metode for midlertidig bruk, som benyttes i påvente av at den endelige konstruksjon etableres. Når behovet ikke lenger er tilstede fjernes installasjonene, og grunnen tiner.

Grunnfrysing kan imidlertid også brukes i permanente konstruksjoner, da med fordel som del av en varmepumpe.

Første dokumenterte anvendelse av metoden er fra Wales UK, 1862, hvor det ble frosset en vertikal sjakt fra terreng gjennom løsmasser ned til fjell. Metoden har vært mye anvendt i gruveindustrien, da en frosset trykkring både ivaretar stabiliteten i løsmassene og vannproblematikken i overgangen mellom løsmasser og fjell, og videre ned i fjell.

Ved tunneldriving under vanskelige forhold, eller manglende fjelloverdekning vil en frostkonstruksjon sørge for stabile og tørre forhold under driving, noe som forenkler etableringen av den endelige konstruksjon. Utviklingen innen retningsstyrt horisontalboring åpner muligheten for å tenke tunnelfremdrift på en ny måte, både i fjell og løsmasser. Ved at det etableres en vanntett frostkonstruksjon før tunnelen drives vil det være enkelt å etablere en vanntett utstøping/permanent konstruksjon etterpå.



Foto 2. Frostkonstruksjon krysser trikkeskinner. (Foto: A-L. Berggren)

I forbindelse med *tunnelpåhugg* kan en frostkonstruksjon erstatte unødig ekspropriasjon av grunnen, riving/underpinning av hus, utgraving av store volum løsmasser og/eller vanskelig sikring av høye skråninger.

I forbindelse med *byggegrop* i byområder kan en frostkonstruksjon løse flere oppgaver i samme operasjon (stabilisering og vanntetting) der man ellers må ty til flere forskjellige tiltak.

Konstruksjoner på kanten av en byggegrop kan få en *midlertidig understøtting* inntil normal stabilitet er gjenopprettet ved tilbakefylling.

Enkelte grunnforhold blir ustabile ved vann-tilgang. Da kan det være aktuelt med en *vanntett skjerming* basert på frost.

Å stoppe vannet kan det også være behov for ved rehabilitering i vannkraftbransjen. Det kan etableres en *ispropp* i en vannfylt tunnel slik at ellers utilgjengelige steder kan tømmes for vann uten at hele vannmagasinet tappes først.

På spesielt bløte underlag kan man fryse seg en *arbeidsplattform* i og med at materialet både får økt styrke og oppdrift ved frysing. En metode som også vil være velegnet i sårbar natur.

I områder med sviktende *permafrost* kan naturen gis en hjelpende hånd for å sikre stabiliteten på eksisterende og nye konstruksjoner.

Frost kan også benyttes som et *forurensningshinder*, enten ved å fryse en barriere rundt forurensningen, eller ved total innfrysing. Sistnevnte kan også være et hjelpemiddel under transport til egnet deponerings- eller destruksjonssted.

Grunnfrysing benyttes også til å fjerne forurensede sedimenter under vann (*frysemudring*) og til å plukke opp skjøre gjenstander på store vanddyp.

Ved konstruksjon av kryogene *gasslager* i fjell, kan fjellet rundt hallen vanntettes 100 % før den tas i bruk.

Prosjekter

Se www.geofrost.no for oversikt/eksempler på utførte prosjekter.



Foto 3. Samvirke mellom spunt, betong og frostkonstruksjon. (Foto: A-L. Berggren)

Utførelse

Geoteknisk settes det krav til hvilken temperatur og tykkelse frostkonstruksjonen må ha, basert på:

- hensikten med grunnfrysingen,
- ytre belastning på frostkonstruksjonen,
- laboratorieforsøk som viser hvordan det frosne materialet oppfører seg,
- prosjektets karakter med tanke på risiko og konsekvenser ved brudd.

Termisk bestemmes fryserørsmønster og frysesystem basert på:

- de temperatur- og geometrikrav som er spesifisert for frostkonstruksjonen,
- grunnens termiske egenskaper og eventuelle varmekilder,
- den tid som står til rådighet og forventet vedlikeholdsperiode,
- eventuelle andre ytre forhold og rammebetingelser.

Frysetiden, hvor lang tid det tar å fryse ned grunnen til ønsket temperatur, er avhengig av en rekke parametere der vanninnholdet er mest dominerende. Jo mer vann som skal omdannes til is, desto mer latent varme må fjernes fra materialet, og frysetiden øker. Metningsgraden og kvartsinnholdet er andre viktige parametere som påvirker de termiske egenskapene.

Dataprogram brukes for kalkulasjon av temperaturutvikling, frysetid og varmestrøm mot fryserørene. Finite element analyse (FEM) benyttes for å beregne transient varmestrøm med faseovergang.

De vanligste frysemetodene er lakefrysing og nitrogenfrysing. Ved lakefrysing (Figur 4) er saltlake blandet av CaCl_2 og vann det mest benyttede transportmediet i de koaksiale fryserørene. Andre typer saltlake og glykol kan også benyttes. Temperaturen på laken pleier å være i området mellom -20°C og -40°C . Saltlaken sirkulerer i et lukket system og blir kjølt ned i et kuldeanlegg som drives med elektrisitet.

Ved nitrogenfrysing (Figur 5) benyttes et åpent system der kondensert nitrogen (LIN) koker ved tilstrømning av varme fra omgivelsene, og slippes tilbake til atmosfæren. LIN koker ved -196°C (ved 1 atmosfæres trykk). På grunn av den lave temperaturen går nedfrysingen mye raskere enn ved lakefrysing, og tilriggingen er enkel. Vanligvis forbrukes store mengder LIN, slik at det er praktisk å benytte en mellomagringstank som jevnlig fylles fra tankbil.

Fryserørene installeres i grunnen som skal fryses. Avhengig av grunnforholdene kan man noen ganger spyle opp hull eller ramme rør, men det er mest vanlig å bore med foringsrør for å sikre at hullene ikke raser sammen før fryserørene er montert. Vanlig brønnboringsutstyr er kraftig nok til å bore gjennom morene, blokker og fjell. Det er boringen som setter begrensninger på hvor lange fryserørene kan være.

I forbindelse med tunneler kan det være spørsmål om det skal bores og fryses fra tunnelen eller fra terrenget over. Frysing fra terrenget har en stor framdriftsmessig fordel fordi nedfrysingen kan være ferdig når tunnelen kommer til det sted som har behov for frysestabilisering. Man unngår å få driftsstans for boring, installasjon av fryserør og nedfrysing. Installasjonsarbeidet, særlig boringen, er vanligvis også enklere å utføre fra terrenget enn fra tunnel.

Alle borhull må posisjonsbestemmes. Dette er viktig for:

- å sikre riktig posisjon og lengde på fryserørene,
- vurdering av plasseringen av termoelementer (for konstruksjonskontroll) og
- vurdering av behovet for ekstrahull dersom avviket er stort.

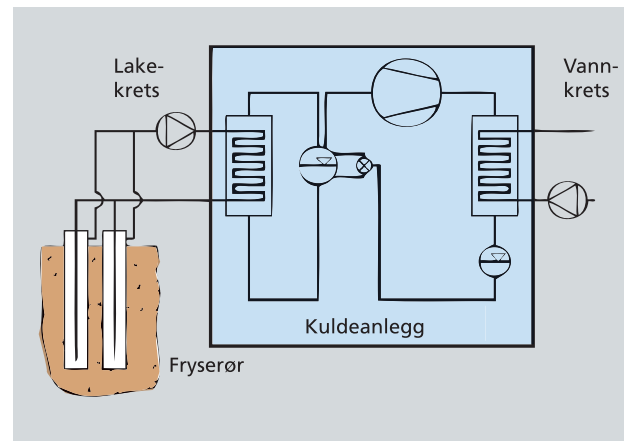
Avviksmålingen utføres før fryserørene blir montert. Temperaturmålepunkter monteres samtidig med fryserørene, i egne hull. Disse bør om mulig installeres på temperaturkritiske steder. Temperaturutviklin-

gen følges opp kontinuerlig og sammenlignes med de termiske beregningene. Dermed sikres at frostkonstruksjonen oppnås, og beholder sine krav til temperatur og styrke.

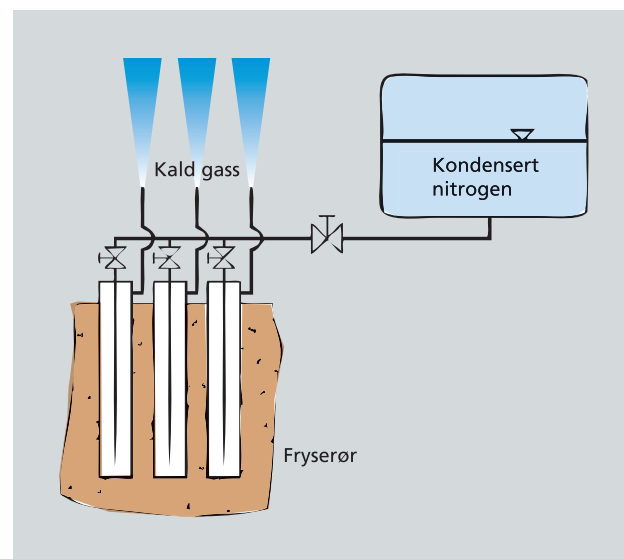
Frossen masse er i praksis ikke gravbar. Den kan sprenges. Friksjonsmasser kan også pigges eller taes ut med roterende graveredskap (roadheader). Det kan graves, bores og sprenges helt inntil en frostkonstruksjon. Frostkonstruksjoner som ved blottlegging utsettes for sol og regn må tildekkes og isolering vurderes. Støping kan utføres direkte mot den frosne grunnen.

Ved tunnelarbeider bør det legges opp til arbeid i syklus, slik at det sprenges/graves og monteres/støpes en seksjon av gangen. Derved blir tiden kortest mulig fra massen tas ut til en lastbærende konstruksjon er etablert. (Bruk av ferdigelementer kan vurderes.) Dess lengre syklostid, dess tykkere/kaldere frostkonstruksjon kreves.

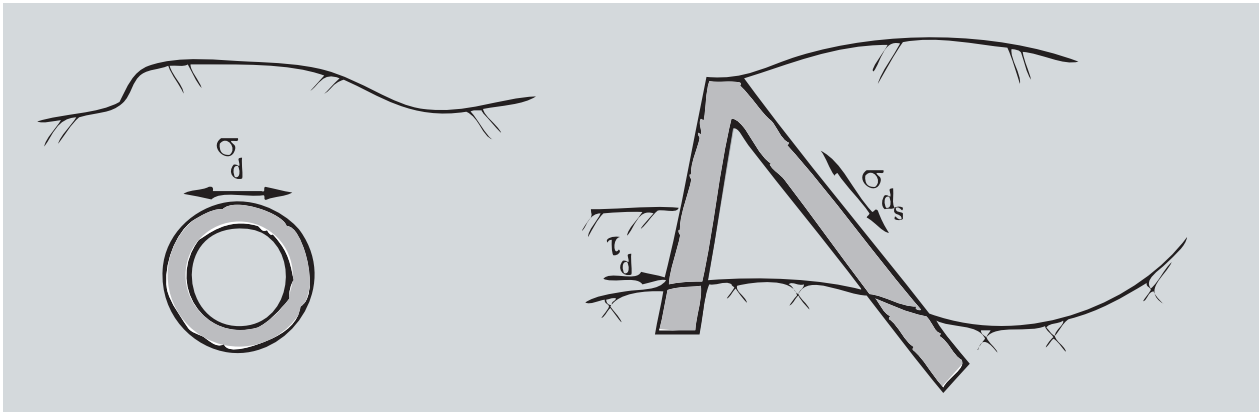
Kostnadene i forbindelse med et fryseprosjekt kan



Figur 4. Lakefrysing.



Figur 5. Nitrogenfrysing.



Figur 6. Dimensjonerende styrke.

deles i 3: Rigg, etablering og drift. Utvikling i utstyr og kompetanse har redusert kostnadsnivået på grunnfrysing betraktelig. Før arbeidet starter kan man få vite hva en gitt kvalitet etablert til et gitt tidspunkt og med en bestemt varighet vil koste. Metoden bør derfor oftere vurderes som et alternativ, helst på et tidlig stadium i prosjektet.

Geoteknisk dimensjonering

Ved dimensjonering av frostkonstruksjoner må man kjenne/vurdere dimensjonerende styrke i trykk, skjær og/eller eventuelt strekk (Figur 6).

Frossen grunn er et komplekst multifase-system, bestående av komponenter som har forskjellige egenskaper og faser (fast, plastisk, flytende, gass). Hver jord- eller bergart må derfor betraktes som et unikt materiale.

I kontrast til ufrosset jord, er temperaturen den faktor som påvirker egenskapene til frosset jord (og is) mest. Når materialet fryser øker styrken betydelig, og den fortsetter å øke når temperaturen synker.

Det er vannets overgang til is som forandrer materialet. IskrySTALLene har hexagonal struktur, og er derfor i seg selv anisotrope. Avhengig av forholdene iskrySTALLene vokser under, får man dannet forskjellige is-sorter, med forskjellige egenskaper og forskjellig grad av anisotropi. Isens egenskaper er veldig følsom for urenheter, krystallorientering og -størrelse, samt temperatur. Urenheter som luftbobler og saltlake reduserer styrken, mens faste partikler vanligvis øker styrken.

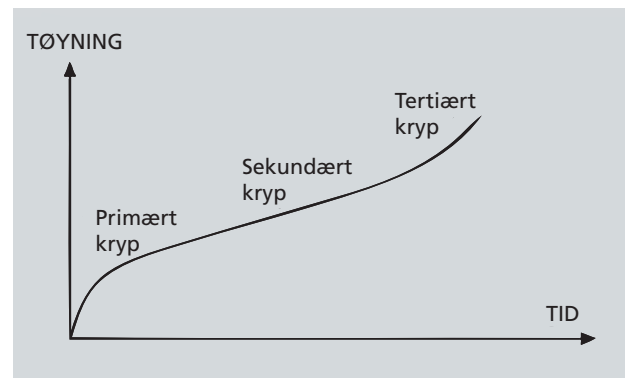
I tillegg til at frosne materialer er temperatur-avhengige, er de viskoplastiske, det vil si at flytegrensen eller styrken for materialet minker med økende belastningstid. Materialet viser "kryp"-oppførsel. Dette skyldes tilstedeværelsen av is og ufrosset vann. Det ufrosne vannet ligger som en tynn film rundt mineral-kornene og skiller de fra isen i porene. Tykkelsen av denne vannfilmen synker raskt med synkende

temperatur, men noe forblir ufrosset pga. kjemisk binding til mineral-kornene (særlig i leire). Karakter og areal på mineral-partiklens overflate har avgjørende betydning for bindingen av vannet og således for mengden av ufrosset vann i den frosne jordarten. Mengden ufrosset vann avhenger også av porevannets innhold av salter og andre "urenheter", samt det totale vanninnhold.

Modeller som skal ta hensyn til alt det som fysisk skjer i et slikt komplekst materiale blir helt uhåndterlige i praksis. Beregningsmodeller basert mer eller mindre på empiriske kurvetilpasninger, ville også bli meget komplekse dersom formen på forsøkskurvene skulle beskrives av en eksakt matematisk modell og man skulle ta hensyn til alle de parametere som påvirker resultatet. Til ingeniørbruk gjøres det derfor en rekke forenklinger, og antall parametere begrenses mest mulig. De parametere som skal tas med, bør være enkle å bestemme i laboratorium eller felt.

Viskoplastiske materialer kjennetegnes av krypoppførsel. Kryp er tidsavhengig deformasjon ved konstant spenningsnivå. Klassisk krypteori definerer 3 deformasjonsfaser: primærkryp, sekundærkryp og tertiærkryp, der tøyningshastigheten henholdsvis er avtagende, konstant og økende (Figur 7).

Krypbrudd er definert som diskontinuitet, eller ustabilitet som fører til diskontinuitet.



Figur 7. Klassisk krypturve.

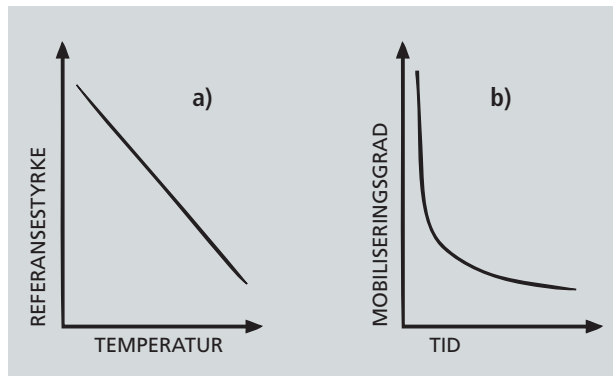
Krypstyrke er definert som det spenningsnivå som fører til brudd etter en viss tid. Krypstyrken avtar med tiden. Derfor er det kun en viss andel av momentanstyrken som kan utnyttes ved dimensjonering.

De fleste kryptmodeller definerer kryptstyrken som overgangen mellom sekundær og tertiær kryptfase. Imidlertid har det vist seg vanskelig/umulig å forutsi hvor lenge den sekundære kryptfasen vil vare. I den sekundære kryptfasen er det derfor kun et tidsspørsmål om når man går over i en reell bruddfase. Av denne grunn er definisjonen på kryptstyrke i Berggrens modell lagt i overgangen mellom primærkryp og sekundærkryp.

Dr. ing. Anne-Lise Berggren har i sin doktoravhandling (1983) utviklet en modell for frosset jord, beregnet brukt av ingeniører i praktisk arbeid. Der defineres kryptstyrke som den maksimale spenning som kan være påført materialet over en definerbar tid uten at deformasjonshastigheten slutter å minke. Videre definerer Berggren mobiliseringsgrad (f) som forholdet mellom kryptstyrke (σ) og referansestyrke (σ_θ) ved samme temperatur (θ):

$$(1) \quad f = \sigma / \sigma_\theta.$$

Referansestyrken ivaretar temperaturavhengigheten og mobiliseringsgraden ivaretar tidsavhengigheten. Disse relasjonene kan relativt enkelt finnes ved laboratorieforsøk på frosne prøver.



Figur 8. Dimensjonerende styrke er temperaturavhengig (a), og tidsavhengig (b).

Dimensjonerende trykkstyrke (σ_d) kan således uttrykkes som:

$$(2) \quad \sigma_d = \frac{f_d \cdot \sigma_\theta}{\gamma_m}$$

der

f_d = mobiliseringsgrad ved dimensjonerende belastningsvarighet t_d

σ_θ = referansestyrke ved temperaturen θ

γ_m = materialkoeffisient (prosjekt- og risikoavhengig)

Relasjonene er fremkommet ved enaksiale forsøk. Generell tredimensjonal oppførsel er noe mindre undersøkt.

For å kunne tegne opp de dimensjonerende kurvene for det enkelte materialet, må det gjøres laboratorieforsøk på frosne prøver. Ved hjelp av enaksiale trykkforsøk ved forskjellige temperaturer finner man referansestyrkens temperaturavhengighet. For mindre temperaturområder kan en lineær sammenheng benyttes. Referansestyrken (σ_θ) er definert som den maksimale spenning som oppnås når et enaksialt trykkforsøk gjennomføres ved konstant temperatur og med en konstant deformasjonshastighet på 1 % pr. minutt (Figur 9a).

For å finne tidsavhengigheten må det utføres en serie kryptforsøk ved konstant temperatur. Et kryptforsøk er et forsøk (gjærne enaksialt) med konstant spenningsbelastning der kryptdeformasjonen registreres som funksjon av tiden. Det må utføres forsøk ved flere forskjellige spenningsnivåer. For å unngå alt for stor ekstrapolering i tid er det dessuten ønskelig at minst ett av kryptforsøkene utføres ved så lav spenning at det ikke utvikler sekundært krypt i løpet av det reelle prosjektets forventede belastningsvarighet. Mobiliseringsgraden (f) kan så plottes mot varigheten av den primære kryptfase (Figur 8b).

Deformasjonene i forbindelse med grunnfrysing er normalt meget små og ikke dimensjonerende. I permafrost der temperaturnivået og tidsperspektivet oftest er et helt annet, er imidlertid deformasjonene ofte dimensjonerende. For beregning av kryptdeformasjoner må kryptforsøkene bearbeides videre (Figur 10).

Berggrens kryptmodell er basert på eksperimentelle forsøk som viser sammenhengen mellom en påtrykt "årsak" og dens "virkning" på et system.

$$(3) \quad \text{Motstand} = \frac{\text{årsaksendring}}{\text{virkningsendring}}$$

Fra forsøkene kan vi definere tidsmotstand (R) som forholdet mellom en tidsperiode og tilhørende forandring i tøyning:

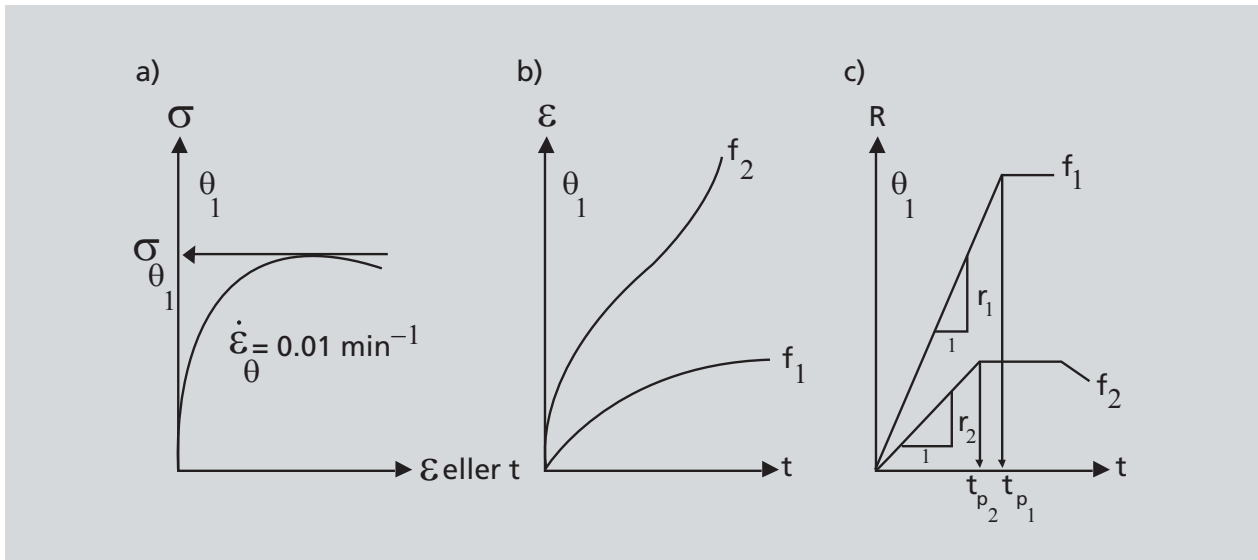
$$(4) \quad R = \frac{dt}{d\varepsilon} \quad (\text{Janbu 1969, 1970})$$

I den primære kryptfasen er R en rett linje, som matematisk kan modelleres til:

$$(5) \quad R = r \cdot t, \quad t \leq t_p$$

hvor tidsmotstandstallet (r) er helningen på linjen, og t_p er varigheten av den primære kryptfasen. Ved å kombinere (4) og (5) og integrere fra $t_0 = 1$ time (for å unngå $t=0$) til $t < t_p$:

$$(6) \quad \varepsilon_p = \frac{1}{r} \ln(t), \quad t \leq t_p$$



Figur 9. a) Enaksialt trykkforsøk.
 b) To krepforsøk; $\varepsilon = \Delta h/h$, $f = \sigma/\sigma_\theta$
 c) Tidsmotstand, $R = dt/d\varepsilon$ for forsøket i b),
 når t_p = varighet av den primære krep fase. $r = \Delta R / \Delta t$.

Plottes r og t_p fra krepforsøkene som funksjon av mobiliseringsgraden i et log-log diagram, framkommer en lineær sammenheng (se Figur 10):

$$(7) \quad \log(r) = a - i \cdot \log(f)$$

(8) For $f = 1$ blir $\log(r) = \log(r_f)$ som innsatt i (7) gir $a = \log(r_f)$, derav

$$(9) \quad r = \frac{r_f}{f^i}$$

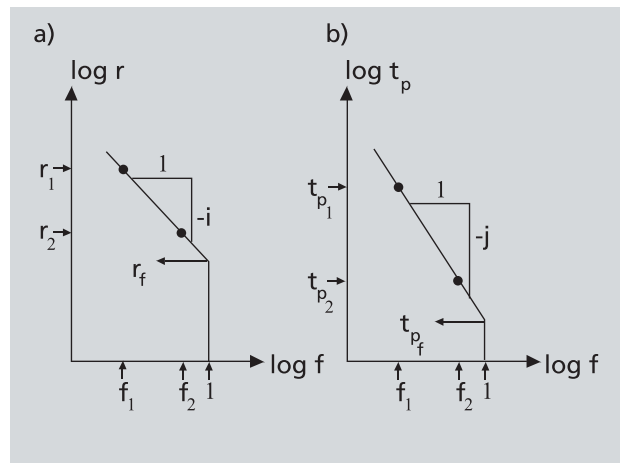
Tilsvarende gjelder for t_p . Den primære krepfasens varighet for et gitt spenningsnivå σ , når mobiliseringsgrad $f = \sigma/\sigma_\theta$, kan uttrykkes som:

$$(10) \quad t_p = \frac{(t_p)_f}{f^j} = (t_p)_f \left(\frac{\sigma_\theta}{\sigma} \right)^j$$

Den maksimale mobiliseringsgrad f_p man kan ha etter tiden t_p (og fortsatt befinne seg i den primære krepfase) blir da:

$$(11) \quad f_p = \left(\frac{(t_p)_f}{t_p} \right)^{\frac{1}{j}}$$

Kryppparametrene i og j er de negative helningene til de rette linjene i log-log diagrammene, for henholdsvis r og t_p , mens r_f og $(t_p)_f$ er de respektive grenseverdiene når $f=1$.



Figur 10. Krep-parametere i Berggrens krepmodell:
 a) $i = \Delta (\log r) / \Delta (\log f)$, $r_f = r$ når $f = 1$.
 b) $j = \Delta (\log t_p) / \Delta (\log f)$, $t_{pf} = t_p$ når $f = 1$.

Ved innsetning av (9) og (10) samt definisjonen på mobiliseringsgrad (1) i (6), fås et uttrykk for krepdeformasjonen ε_p i perioden t i det primære krepområdet:

$$(12) \quad \varepsilon_p = \frac{1}{r_f} \left(\frac{\sigma}{\sigma_\theta} \right)^i \ln(t), \quad t \leq t_p$$

I det sekundære krepområdet er deformasjonen (ε_s) en lineær funksjon av tiden.

Frosne materialer har normalt høy trykkstyrke og relativt liten strekkstyrke. Da er det gunstig med skallkonstruksjoner. Det kan ofte taes utgangspunkt i en trykkring med gjennomgående flytning der flytespenningen i henhold til klassisk plastisitetsteori erstattes av dimensjonerende trykkstyrke (σ_d) for det frosne materialet (Figur 11).

Tangentialspenningene langs indre radius vil være de kritiske. Den ytre belastningen (p_g), på trykkringen, må derfor være mindre enn:

$$(13) \quad p_g \leq \sigma_d \cdot \ln \left(\frac{r+T}{r} \right)$$

p_g = utvendig jordtrykkbelastning
 σ_d = dimensjonerende trykkstyrke
 r = innvendig radius
 T = nødvendig tykkelse på trykkringen

Ligningen løses med hensyn på T , for å finne dimensjonerende frosttykkelse:

$$(14) \quad T \geq r \left(\varepsilon^{\frac{p_g}{\sigma_d}} - 1 \right)$$

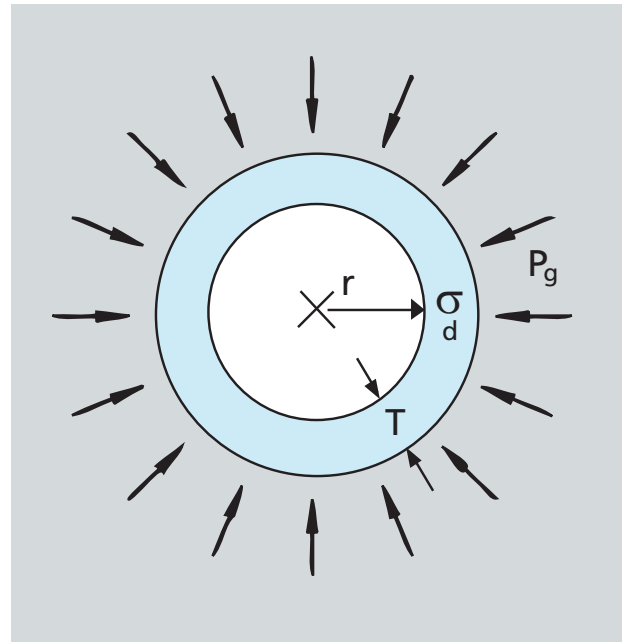
Ved plane støttekonstruksjoner der det er mulig å bore fryserørene ned i fjell (Figur 12), får man en fast innspenning som er vannnett. Oftest er skjærkapasiteten $\Sigma(\tau_d \cdot T)$ dimensjonerende for tykkelsen av frostkonstruksjonen. Denne finnes fra horisontal kraftlikevekt. Deretter kan nødvendig kombinasjon av temperatur og tykkelse velges.

Momentlikevekt om foten vil gi størrelsen på eventuell nødvendig forankringskraft eller helning for å unngå avstivning. Forankringen kan utføres som frosne sylindere med strekk-kapasitet i selve sylindere, $\Sigma(\sigma_{sd} \cdot A_s)$ og innspenning i fjell eller friksjonssone langs ytterkant av frostsylindere i løsmasser.

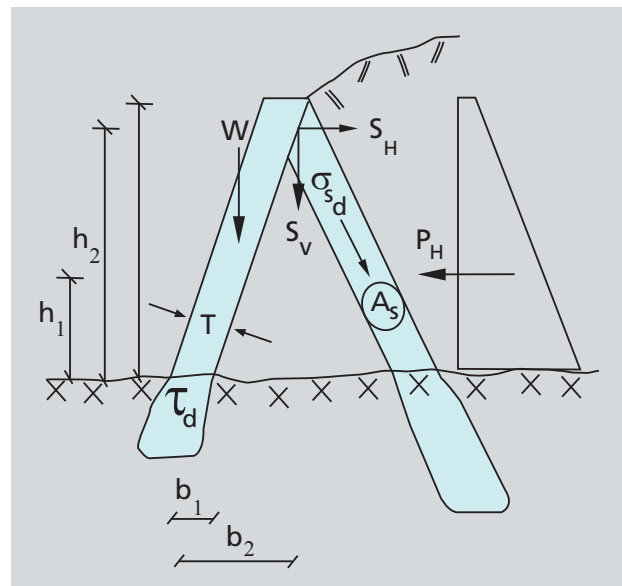
Temperaturen i frostsone varierer fra frysepunktet ytterst og ned til fryserørstemperaturen i kjernen. Frostkonstruksjonens totale styrke er derfor et integral over det temperaturprofil frostkonstruksjonen får. I praksis deles konstruksjonen oftest opp i en eller flere soner, med et krav til minimumstemperatur for hver sone. Ved en slik forenkling vil man ha innbygget en ekstra sikkerhet, ettersom materiale med lavere temperatur (som fins nærmere fryserørene) har en høyere styrke, og materiale med høyere temperatur (men likevel med økt styrke i forhold til ufrosset tilstand) er sett bort i fra.

Oppsummering

Grunnfrysing er miljøvennlig og kan benyttes i alle geologiske formasjoner og i kombinasjon med kjente bygningsmaterialer. Metoden kan benyttes på prosjekter i alle størrelser, fra enkeltrør og opp til flere tusen fryserør. Med forbedret teknologi og reduserte kostnader øker antallet prosjekter der metoden vil være kostnadseffektiv. Pålitelig har den alltid vært.



Figur 11. Sirkulær frostkonstruksjon.



Figur 12. Plan støttekonstruksjon.



Foto 4. Nitrogenfrysing i 4 rør. (Foto: A-L. Berggren)

Referanser

Berggren, A-L. (1983). Engineering Creep Models for Frozen Soil Behaviour. Dr. ing. avhandling. Institutt for geoteknikk, NTH, Trondheim.

Janbu, N. (1969). The resistance concept applied to deformations of soils. Proc. 7th ICSMFE Mexico, Vol. 1.

Janbu, N. (1970). Grunnlag i geoteknikk. s. 217-229. Tapir, Trondheim.

Harris, J.S. (1995). Ground Freezing in Practice. Thomas Telford services. ISBN: 0-7277-1995-5.

www.geofrost.no

Hjemmeside på internett.

Nye klimaindekser for bygningsfysisk prosjektering

New climate indices for building envelope design

Hans Olav Hygen, UiO, Meteorologisk institutt (hans.olav.hygen@met.no)

Kim Robert Lisø, SINTEF Byggforsk (kim.robert.liso@sintef.no)

Summary

New and improved climate indices for building envelope performance assessments are being developed as part of the Norwegian research programme "Climate 2000". In this paper three of these indices are presented in brief: Air freezing index, frost decay exposure index and a decay potential index for wood structures. The air freezing index is a degree days function used in thermal design of e.g. slab-on-grade foundations. The frost decay exposure index provides an estimate of the climatic factors governing frost decay of porous mineral materials. The decay potential index for wood structures similarly estimates the local climate driven potential for deterioration of wood. The work is carried out by SINTEF Building and Infrastructure and the Norwegian Meteorological Institute.

Sammendrag

SINTEF Byggforsks forskningsprogram Klima 2000 fokuserer blant annet på utvikling av geografisk differensierte anvisninger for utforming av bygningers klimaskjerm. Meteorologisk institutt samarbeider tett med SINTEF om utviklingen av nye og forbedrede klimadata og -indekser til anvendelse ved bygningsfysisk prosjektering. Denne artikkelen gir en kort presentasjon av tre slike indekser; klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring, frostnedbrytningsindeks for porøse, mineralske bygningsmaterialer samt klimaindeks for vurdering av potensiell risiko for råte i trematerialer i ulike deler av landet.

Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring

Korrekt termisk dimensjonering og frostsikring av konstruksjoner mot grunnen, som f.eks. fundamenter

for oppvarmede og uoppvarmede bygninger, ledninger og vegger, er helt sentralt ved forebygging av blant annet setningsskader. Dagens beregningsgrunnlag er basert på forrige normalperiode (1931-1960), og dermed utdatert. Metoden for å beregne frostmengde er også revidert i henhold til nye europeiske standarder oversatt til norsk (se referanselisten).

Tidligere ble det brukt månedsverdier av temperaturmålinger for beregning av frostmengde, der en summerte opp temperaturer under 0°C for året. Ny metode anvender døgnverdier. Videre ble det valgt å gjøre en radikal endring i beregningsmetodikken. Tidligere ble beregningene utført på lokaliteter der Meteorologisk institutt foretar målinger. I den reviderte metoden er det valgt å bruke gridet temperatur, i praksis vil det si at en nå har en beregnet frostmengde med oppløsning på 1 km for hele Norge. De kommunale temperaturverdiene er deretter beregnet som et arealmiddel for kommunen. For å unngå at vi estimerer et tall på høyfjellet for kommuner med store fjellområder (uten bebyggelsesområder) og bebyggelse i dalene er det brukt et filter som gjør at bare verdier for områder under 800 moh i Sør-Norge og 500 moh i Nord-Norge er tatt med i midlingen.

Denne måten å fastsette klimadata for kommunene medfører at målte verdier for de enkelte stasjonene ikke er gjenfinnbare i de nye kommuneverdiene, men dette gir arealmiddele verdier som representerer større deler av kommunen. Tar vi normaltemperaturen i Oslo som et eksempel finnes det tre årnormaler innen kommunen: Oslo-Blindern på 5,7°C, Studentlunden på 6,2°C og Tryvasshøgda på 3,4 °C. Det filtrerte arealmidlet for årnormal i middeltemperatur gir 4,3°C.

Disse endringene (oppdatering av tidsserie, metodikk og oppløsning i datasettet) har resultert i vesentlige økninger av frostmengde for enkelte områder. For Karasjok har eksempelvis beregnet 100-års frostmengde økt fra 78 000 h°C til 100 000 h°C.

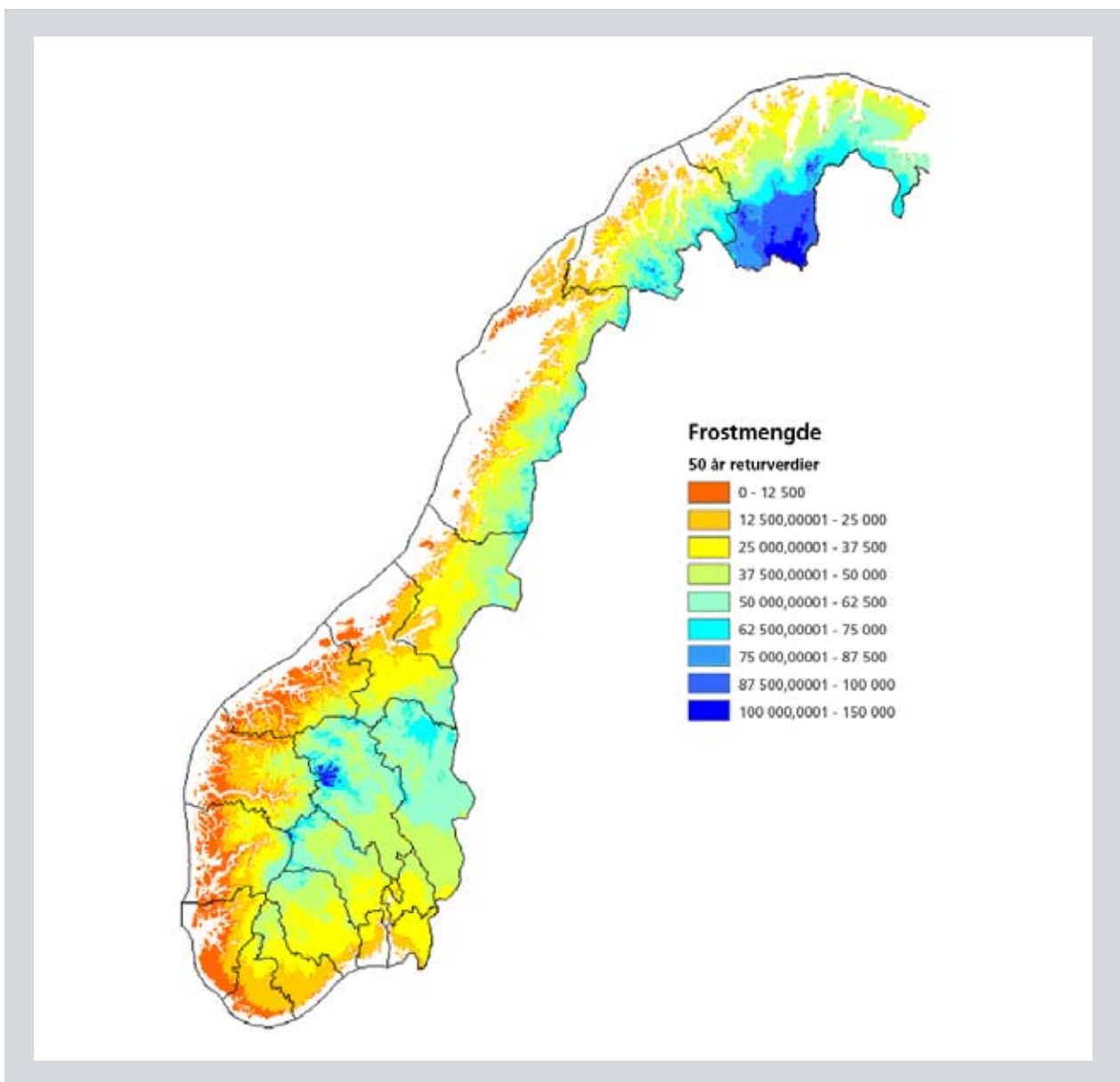
Se kart i figur 1 for nye verdier for F50 (50 års returperiode for frostmengde) (Byggdetaljer 451.021). En overgang fra normalperioden 1961-1990 til ny 30-års periode 1971-2000 ville gitt lavere verdier (Almås, 2004), i tråd med temperaturutviklingen på 90-tallet.

Byggdetaljer 451.021 angir også nye arealmidlede døgnmiddeltemperaturer for beregning av dimensjonerende effektbehov til romoppvarming.

Indeks for frostnedbrytning

Nedbrytning av porøse, mineralske bygningsmaterialer som betong og teglstein er en stor utfordring ved planlegging, prosjektering og utførelse av bygninger i Norge. I Lisø et al. (2005) presenteres en enkel metode

for å estimere potensialet for frostnedbrytning som en følge av lokalklima (geografisk differensiert risiko for frostnedbrytning). Analyser av klimadata fra 168 værstasjoner, samt kunnskap om frostskafer og -nedbrytning i Norge, viser at statistikk over 4 dager akkumulert nedbør i forkant av en frysepunktpassering gir en god geografisk informasjon om sannsynligheten for frostnedbrytning av porøse bygningsmaterialer (se figur 2). I kartbasert fremstilling (Lisø et al., 2005) ser en klart de geografiske variasjonene. En finner at det er lav frostrisiko i tørre kalde soner som indre østlandsområder, og at det er liten frostrisiko i varmere soner som er sterkt påvirket av havet utenfor. Mellom disse sonene finner en et belte med økt risiko for frostnedbrytning.



Figur 1. 50 års returperiode, luftens frostmengder basert på normalperioden 1961 – 1990 (Byggforskserien Byggdetaljer 451.021)

Vurdering av nedbrytningspotensial for trekonstruksjoner ved bruk av klimadata

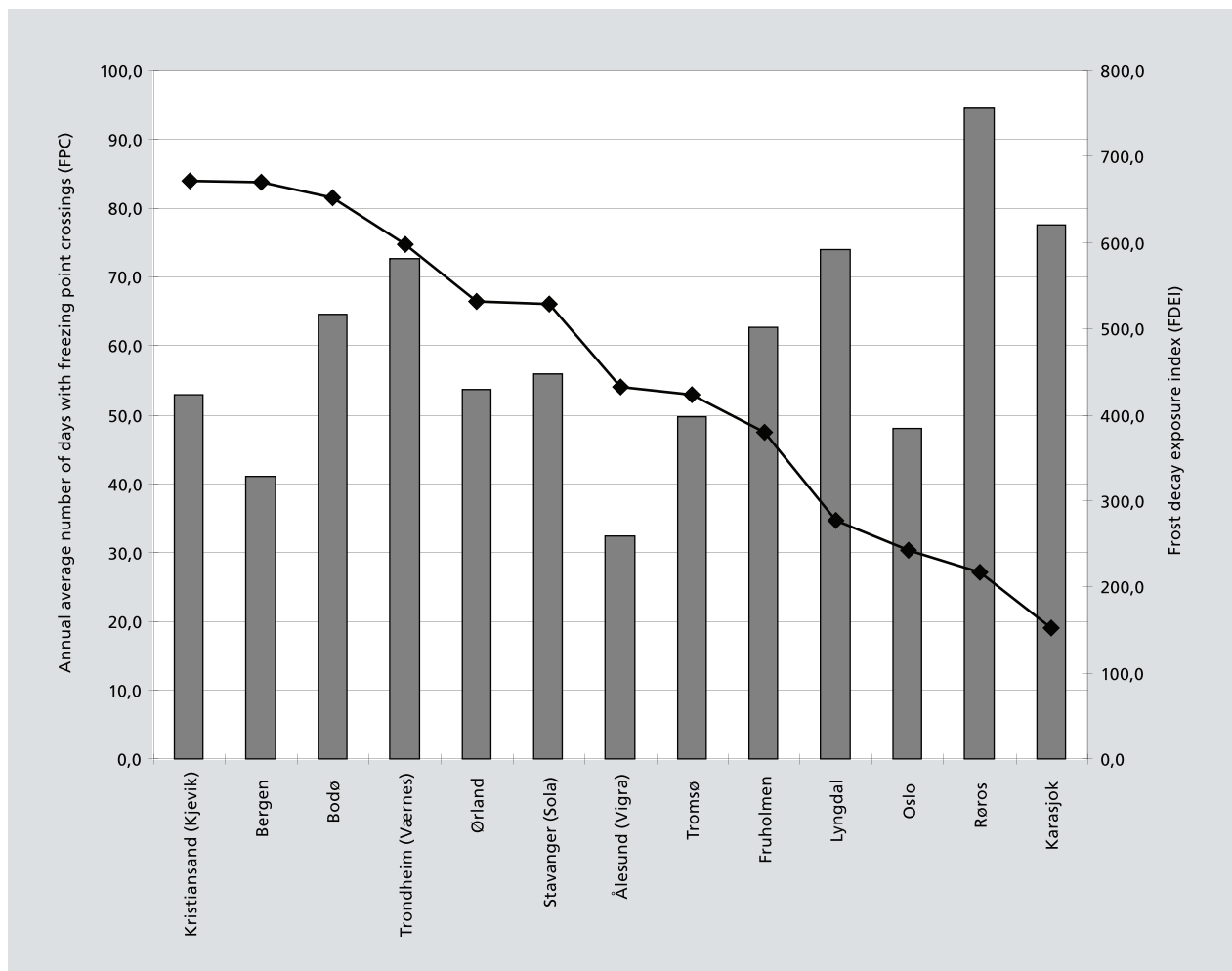
Levetiden til trematerialer er avhengig av klimaet de utsettes for, og kan forlenges med ulike typer av overflatebehandling. Her presenterer vi et kart over Norge som angir potensiell risiko for råte i treverk, basert på Scheffer's klimaindeks (utviklet i og for USA). Scheffer's indeks er uttrykt ved følgende formel (Scheffer, 1971):

$$\text{Climate index} = \frac{\sum_{\text{Jan.}}^{\text{Dec.}} (T_{\text{mean}} - 2)(D - 3)}{16.7} \quad (1)$$

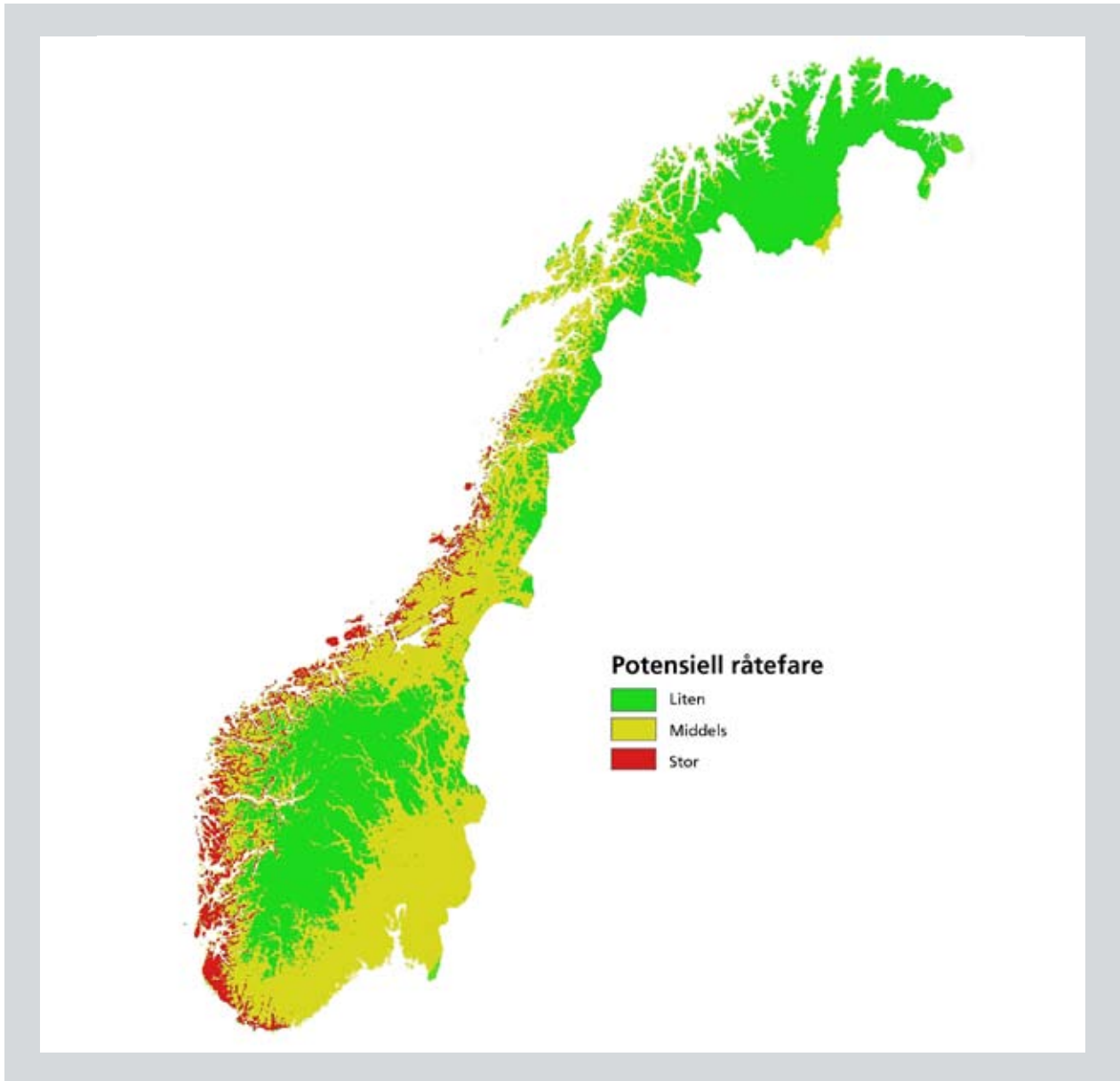
hvor

- T_{mean} er månedlig middeltemperatur (°C)
- D er antall dager i måneden med mer enn 0,254 mm (0,01 inch) nedbør.

Formelen beskriver det relative potensialet for råte i et gitt klima, basert på temperaturforhold og nedbørmengder på værstasjonene. Kartet kan benyttes som *generell veileder* for geografisk differensiert valg av trebeskyttelse i form av overflatebehandling, impregnering eller konstruktiv beskyttelse. Formelen er basert på amerikanske målinger av blant annet nedbrytningshastigheten til ulike treslag med forskjellige typer av behandling og vekstraten til to tre-nedbrytende råtesopper ved ulike temperaturforhold (*Lenzites trabea* og *Polyporus versicolor*). Grenseverdier er angitt på kartet i figur 3 på neste side (Lisø et al., 2006) for tre indeksnivåer: Liten råtefare (indeks mindre enn 35, minst gunstige klimaforhold for råte), medium (indeks mellom 35 og 65, middels råtefare) og høy (indeks over 65, klimabetingelser som bidrar mest til råte). Det er ikke tatt hensyn til topografien ved utarbeidelsen av kartet, enkelte områder kan derfor være mer eller mindre skjermet enn det kartet gir uttrykk for.



Figur 2. Indeks for frostnedbryting for 13 stasjoner i Norge sortert etter frostmengde. Verdier for antall tilfeller med frysepunktpasseringer i kolonner med akse til venstre. Frostnedbrytningsindeks markert med strek, med akse til høyre. Datagrunnlaget er normalperioden 1961 – 1990 (Lisø et al., 2005).



Figur 3. Potensiell råtefare i Norge. Klimaindekskart basert på Scheffers's formel for vurdering av råtefare i trekonstruksjoner over bakken. Kartet er utarbeidet av SINTEF Byggforsk og Meteorologisk institutt for normalperioden 1961-1990 (Lisø et al., 2006).

Referanser

- Almås, A. J. (2004). Klimadata for frostsikring, Prosjekt-oppgave, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for bygg, anlegg og transport, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Trondheim.
- Byggdetaljer 451.021 (2006). Klimadata for termisk dimensjonering og frostsikring. Byggforskserien, Byggdetaljer 451.021, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Lisø, K.R., Kvande, T., Hygen, H.O., Thue, J.V. and Harstveit, K. (2005). A frost decay index for porous, mineral building materials, in E.H. Mathews (ed.) Building and Environment (submitted)
- Lisø, K.R., Hygen, H.O., Kvande, T. and Thue, J.V. (2006). Decay potential in wood structures using climate data, in Richard Lorch (ed.) Building Research & Information (in press)
- Norsk Standard NS-EN ISO 13370 Bygningers termiske egenskaper – Varmeoverføring via grunnen – Beregningsmetode. Standard Norge, Oslo, 1999.
- Norsk Standard NS-EN ISO 13790 Bygningers termiske egenskaper – Beregning av bygningers energibehov til romoppvarming. Standard Norge, Oslo, 2004.
- Norsk Standard NS-EN ISO 13793 Bygningers termiske egenskaper – Termisk dimensjonering av fundamenter for å unngå telehiv. Standard Norge, Oslo, 2001.

Norsk Standard NS-EN ISO 15927-1 Bygningers hygrotermiske egenskaper - Beregning og presentasjon av klimadata - Del 1: Måned- og årsmiddel av enkeltstående meteorologiske elementer. Standard Norge, Oslo, 2004.

Norsk Standard NS-EN ISO 15927-5 Bygningers hygrotermiske egenskaper - Beregning og presentasjon av klimadata - Del 5: Data for dimensjonerende effektbehov til romoppvarming, Standard Norge, Oslo, 2005.

Norsk Standard NS 3031 Varmeisolering - Beregning av bygningers energi- og effektbehov til oppvarming og ventilasjon. Standard Norge, Oslo, 2007.

Scheffer, T.C. (1971). A Climate Index for Estimating Potential for Decay in Wood Structures above Ground. *Forest Product Journal* 21(10), 25-31.

Norske standarder for varme- og frostisolering

Norwegian standards for heat and frost insulation

Harald Eide, Standard Norge (2006)

Summary

This article gives an overview of standards related to heat and frost insulation. It gives first the history of the original Norwegian standards developed from 1969 to 1987. The main standard is NS 3031 where all the heat transfer calculations is covered; both for heat and energy demand for buildings, calculation of U-values and resistance for components and design thermal values for materials, which also covers values for frost insulation.

All the standards except NS 3031 and NS 3034 are now withdrawn and replaced by European standards. This article gives a short presentation of the new standards and the major changes from the withdrawn national standards. NS 3031 gives design values for different applications, something that is missing in the European standards. Such design values, including values for unheated constructions, roads etc, have been added to the European standard NS-EN 10456, as a national annex. NS 3031 has been revised (2007) to be harmonized with the European standards.

Historikk, utvikling

Arbeidet med standarder på området varmeisolering og frostisolering ble startet av Norges Byggstandardiseringsråd (NBR)¹. Den første standarden som ble utgitt var:

- NS 3031 Varmeisolering - Beregning av bygningers energi- og effektbehov til oppvarming og ventilasjon (1969).

Den 4. utgaven av NS 3031 fra 1987 innholdt allmenne regler som gjelder beregning av materialsjikt og konstruksjoners varmemotstand og U-verdier, bygningers

effekt- og energibehov og noen enkle regler om frostisolering. I tillegg til NS 3031 fantes følgende standarder på dette området:

- NS 3032 Bygningers energi- og effektbudsjett (1984)
- NS 3034 Varmeisolering - Tynnplatekonstruksjoner med kuldebroer - Beregning av varmemotstand (1987)
- NS 3161 Varmeisolering – Bestemmelse av varmemotstand ved hjelp av varmemestrømsapparat (1982)
- NS 8040 Varmeisolering - Bestemmelse av materialets varmemotstand eller varmekonduktivitet med varmemestrømmåler (1982)
- NS 8046 Varmeisolering - Bestemmelse av praktisk varmekonduktivitet for materialer - Regler for korrigering av målt varmekonduktivitet i varmemestrømmåler (1986)
- NS 8047 Varmeisolering - Bestemmelse av praktisk varmemotstand for konstruksjoner - Regler for korrigering av målt varmemotstand i varmemestrømsapparat (hotbox) (1986)

NS 3032 var en nasjonal standard som fungerte en tid som en rettesnor for bygningsbransjen for hvor mye energi bygninger skulle bruke. Den ble trukket tilbake i 2007 og dekkes nå til dels av NS 3031. Den har en viss relevans i forbindelse med det nye energidirektivet til EU som også Norge må implementere. (Den nye NS 3031 fra 2007 har nå følgende tittel: Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data.)

Det var ikke utarbeidet "produktstandarder" for isolasjonsmaterialene på det norske markedet.

I 1988 startet det europeiske standardiseringsarbeidet på varmeisoleringsområdet, i komitéen CEN/TC 88 Thermal insulating materials and products. I CEN ble det innført såkalt "stillstand" i nasjonalt standardiseringsarbeid, som innebar at standardene nevnt ovenfor ikke kunne bli revidert og det kunne heller ikke utarbeides nye standarder innen de områder CEN arbeidet.

¹ NBR ble opprettet i 1963 og slått sammen med andre standardiseringsorganisasjoner til Standard Norge i 2002

Som følge av CEN/TC 88-arbeidet er alle standardene unntatt NS 3031² og NS 3034 trukket tilbake, og erstattet av mange flere europeiske standarder. De nye europeiske standardene betegnes NS-EN xxxxx (eller NS-EN ISO xxxxx hvis det er et felles prosjekt mellom CEN og ISO). Se eget avsnitt med oversikt over standardene.

Ikke alle standardene nevnt ovenfor kunne brukes i forbindelse med frostisolering. NS 3031 og NS 8046 hadde direkte relevans: NS 3031 for å beregne varmemotstands- og U-verdier, og NS 8046 for å korrigere målt varmekonduktivitet for bl.a. fuktighet. NS 8047 var ment for å korrigere målte varmemotstander i varmemestrømsapparater (NS 3161), men ble i liten grad brukt.

GAMMELT REGIME – BRUK AV DE GAMLE STANDARDENE

Sammenheng mellom standarder

For å kunne utføre beregninger av varmeoverføring må en bestemme en rekke parametere. En må kjenne konstruksjonens oppbygging, varmekonduktiviteten til de forskjellige materialene under de tilstander de blir utsatt for og man må ha klimadata.

I NS 3031 var det tatt med en tabell ("tabell 14") for materialers varmekonduktivitet avhengig av bruksområdet. Disse verdiene kunne brukes direkte i beregninger etter NS 3031 forutsatt at materialet var underlagt en anerkjent godkjenningsordning. Her var for eksempel verdien for ekspandert polystyren (EPS) til frostsikring av drenerte konstruksjoner satt til 0,050 W/(m·K).

Praktisk/dimensjonerende varmekonduktivitet

Alternativet til å bruke varmekonduktiviteten etter tabell 14 i NS 3031 var å bestemme varmekonduktiviteten ved målinger. For å få bestemt et materiales praktiske/dimensjonerende varmekonduktivitet kunne måling utføres i et laboratorium med varmemestrømmåler etter NS 8040. Materialet ble da målt i likevekt med tilstanden for laboratoriets inneluft, som skulle ha temperatur 22 °C og relativ fuktighet 50 %.

Den målte varmekonduktiviteten måtte korrigeres for forskjellige forhold for å ta hensyn til spredning, temperaturvariasjon, aldring for noen materialer, fuktopptak og egenkonveksjon.

² Mye av innholdet i NS 3031 er likevel blitt erstattet av flere europeiske standarder.

Formelen som ble brukt i NS 8046 var:

$$\lambda_b = \lambda_{10m} + \Delta\lambda_s + \Delta\lambda_a + \Delta\lambda_f + \Delta\lambda_l$$

Her var λ_b en beregnet verdi som ble benevnt praktisk varmekonduktivitet. De to første leddene i formelen anga midlere varmekonduktivitet med en viss sikkerhet for spredning av måleresultatene. De tre siste leddene ga tillegg for aldring, fuktopptak og eventuell egenkonveksjon.

For isolasjon i vanlige bygningskonstruksjoner ble korreksjonene for fuktopptak og egenkonveksjon ofte satt til null.

Den praktiske verdien for varmekonduktiviteten kunne så brukes i formelverkene i NS 3031 for å bestemme konstruksjonens varmemotstand og U-verdi.

U-verdi i det gamle regelverket

U-verdien kunne en bestemme på en enklere måte ved å måle hele konstruksjonen i et varmemestrømsapparat (hot-box) etter NS 3161. U-verdier bestemt på denne måten kan anses å være sikrere enn de beregnet ut fra varmekonduktiviteten. Men også målte U-verdier er bare representative for de forhold som ble brukt i laboratoriet. Derfor ble det utarbeidet en standard for å korrigere målte U-verdier, NS 8047.

I beregninger av effektbehov og energibehov etter NS 3031 representerte de praktiske varmekonduktiviteten og U-verdiene midlere verdier fordi en ønsket å få beregninger som lå så nær opp til det virkelige som mulig, og da er en middelvei det valg som ligger nærmest det sannsynlige.

For isolasjon som brukes for frostsikring, kan det være andre vurderinger som gjør at en må velge andre verdier for varmekonduktivitet og korreksjonene. Dessuten vil fuktinnholdet i materialet kunne variere mye mer for slike bruksområder.

I NS 8046 var det gitt regler for hvordan den målte varmekonduktiviteten kunne korrigeres til praktisk varmekonduktivitet. Det ble brukt inndelinger som vist i tabell 1 for å angi korreksjoner for fuktopptak.

Tabell 1. Inndelinger for å angi korreksjoner for fuktopptak.

Materiale Bruksområde	Densitet kg/m ³	Fuktinnhold Volumprosent	$\Delta\lambda_f$ W/(mK)
Skumplast, Ekspandert polystyren (EPS)			
- i vanlige bygningsdeler	20-50	< 1	0
- drengsplater med filterduk utenpå vegg mot grunnen	10-20	1,5	0,004
- frostsikring av konstruksjoner i grunnen, drenert, støpte plater	≥ 30	> 10	0,015

NYTT REGIME - NYE EUROPEISKE STANDARDER

Som nevnt tidligere ble de fleste rent norske standardene erstattet av europeiske standarder. Reglene i NS 3031 dekkes nå av flere standarder, i hovedtrekk følgende:

- varmemotstands- og U-verdiberegningene ble erstattet av NS-EN ISO 6946
- energibehovsberegningen ble erstattet av NS-EN ISO 13790
- effektbehovsberegningen ble erstattet av NS-EN 12831

Store deler av NS 8046 ble erstattet av NS-EN ISO 10456.

Det har kommet en rekke standarder i tillegg, bl. a. en egen standard for beregning av varmeoverføring i grunnen (NS-EN ISO 13370) og regler for sikring av fundamenter mot telehiv (NS-EN ISO 13793).

Selv om Norge er et lite land i Europa og i CEN-arbeidet, så medførte ikke det at reglene i de norske standardene ble vesentlig endret, snarere tvert om. Svært mye av beregningsreglene i de nye europeiske standardene er basert på de gamle norske reglene. Dette skyldtes til dels at Norge hadde sekretariatet for den internasjonale komiteen ISO/TC 163/SC 2 som utarbeidet beregningsregler for varmeoverføring.

Den store forskjellen er at det nå er utarbeidet europeiske produktstandarder for alle isolasjonsmaterialene på det europeiske markedet. Dette har nok utvidet spekteret av materialer på det norske markedet.

Dimensjonerende varmekonduktivitet

Det var ikke mulig på europeisk nivå å bli enige om en tabell med dimensjonerende varmekonduktivitet slik det var gjort i NS 3031. I produktstandardene ble det innført noe som heter deklarerert varmekonduktivitet eller varmemotstand. Denne verdien skulle representere en 90% fraktil som skulle være 90% konfident. Dette er en varmekonduktivitet som er høyere enn den midlere verdien som ble brukt i Norge.

I likhet med reglene i det gamle regimet, så kan den deklarererte verdien brukes som dimensjonerende verdi direkte i beregninger for konstruksjoner som er "tørre", men må korrigeres bl.a. for fukt (for konstruksjoner som kan utsettes for fukt).

Regler for å korrigere varmekonduktiviteten/varmemotstanden er nå gitt i NS-EN ISO 10456. I likhet med NS 8046 kan det gjøres korreksjoner for bl.a. fuktinnhold og aldring.

Formelen for å korrigere for fukt er som følger:

$$\lambda_2 = \lambda_1 F_T F_m F_a$$

Hver av korreksjonene beregnes av en annen formel, som eksempelvis denne for fuktkorreksjon:

$$F_m = f_u e^{(u_2 - u_1)}$$

Dette krever at en kjenner fuktinnholdet u_1 og u_2 i materialet i de to tilstandene og en trenger fuktkorreksjonskoeffisienten f_u .

I motsetning til NS 8046, inneholder ikke NS-EN ISO 10456 noen verdier for u_1 og u_2 , men den har tabeller for f_u . Derfor er det utarbeidet et nasjonalt tillegg til NS-EN ISO 10456 for å få med verdier for fukt, til beregning av fuktkorreksjoner.

I beregning av U-verdier trenger en også varmekonduktivitet for materialer som normalt ikke måles, dvs. ikke betraktes som direkte isolasjonsmateriale, for eksempel treverk, betong med mer. Slike verdier, som fantes i NS 3031 ble tatt med i en egen europeisk standard NS-EN 12524. For tiden (2006) er NS-EN ISO 10456 under revisjon og meningen er at den skal inkludere innholdet i NS-EN 12524 også.

I det nasjonale tillegget til NS-EN ISO 10456 er det tatt med en egen tabell for isolasjon til frostsikring av uoppvarmede konstruksjoner og isolasjon i veier og plasser. Verdien her er til dels basert på erfaringstall fra Statens vegvesen.

U-verdi i det nye regelverket

U-verdien kan bestemmes direkte ved målinger etter NS-EN ISO 8990. Men det er ingen standard i likhet med den gamle NS 8047 for å gjøre korreksjoner for forhold som kan være annerledes enn de som opptrer under laboratoriets målinger. I NS-EN ISO 6946 er det egne regler for korreksjon av U-verdier som overflødiggjør reglene i NS 8047.

Regler for beregning av frostisolerings

Regler for oppvarmede bygninger som er oppvarmet eller kjølt er gitt i NS-EN ISO 13370. For frostsikring av konstruksjoner under uoppvarmede bygninger og veier og plasser gjelder reglene i NS-EN ISO 13793, se eget avsnitt med oversikt over standardene.

NS-EN ISO 13793 tar utgangspunkt i nordiske regler utarbeidet bl.a. på grunnlag av "Frost i Jord"-prosjektet. Mye av bakgrunnen for reglene der bør derfor være kjent for den norske bransjen.

CEN/TC 88 hadde tidligere utarbeidet regler for bygningsisolasjon som også hadde krav som kunne brukes i forbindelse med isolering for å oppnå frostsikring, for eksempel NS-EN 13163 for ekspandert polystyren (EPS) og NS-EN 13164 for ekstrudert polystyren (XPS). Det ble etter hvert enighet om å utvikle egne standarder for "civil engineering applications".

Standardene for dette området er foreløpig begrenset til å omfatte EPS (EN 14933), XPS (EN 14934) og lett-klinker (prEN 15732).

Utkastene (2006) til disse standardene har ikke fullstendige regler for fastsettelse av fuktopptak og derfor vil det nasjonale tillegget i NS-EN ISO 10456 tabell NA.2 være gyldig.

Terminologi

I komiteén ISO/TC 163 ble det utarbeidet en rekke terminologistandarder. Den viktigste er kanskje NS-EN ISO 7345. Den fastlegger termer og definisjoner for varmeoverføring. Det er viktig at de som lager tekniske beskrivelser, lærebokstoff og retningslinjer mv. på dette området bruker termene i denne standarden. Man må håpe at bransjen og skoleverket følger opp denne standarden og tar i bruk korrekte betegnelser. Som et eksempel kan det nevnes at det kanskje er noen brukere som fortsatt benytter benevnelse k-verdi for varmegjennomgang, mens det nå skal hete U-verdi.

OVERSIKT OVER STANDARDER "Rene" norske standarder³

Her vises oversikt over de "rene" norske standardene, dvs. standarder uten opprinnelse i europeiske standarder (men etter hvert påvirket av de europeiske standardene).

- NS 3031 Varmeisolering - Beregning av bygningers energi- og effektbehov til oppvarming og ventilasjon (trukket tilbake i 2007)
- NS 3031 Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data (utgitt oktober 2007).
- NS 3032 Bygningers energi- og effektbudsjett (standard er trukket tilbake i 2007)
- NS 3034 Varmeisolering - Tynnplatekonstruksjoner med kuldebroer - Beregning av varmemotstand (1987)
- NS 3161 Varmeisolering - Bestemmelse av varmemotstand ved hjelp av varmestrømapparat (trukket tilbake i 1997 og erstattet av NS-EN ISO 8990)
- NS 8040 Varmeisolering - Bestemmelse av materialers varmemotstand eller varmekonduktivitet med varmemotmåler (trukket tilbake i 2001 og erstattet av NS-EN 12939:2001, NS-EN 12664:2001 og NS-EN 12667:2001)
- NS 8046 Varmeisolering - Bestemmelse av praktisk varmekonduktivitet for materialer - Regler for korrigering av målt varmekonduktivitet i varmemotmåler (trukket tilbake i 2001 og erstattet av NS-EN ISO 10456:2000 og NS-EN 12524:2000)

3 Alle de "rene" norske standardene unntatt NS 3031 og NS 3034 er trukket tilbake.

- NS 8047 Varmeisolering - Bestemmelse av praktisk varmemotstand for konstruksjoner - Regler for korrigering av målt varmemotstand i varmemotapparat (hot-box) (trukket tilbake i 2006)

NS-EN standarder basert på europeiske standarder

Her vises en oversikt over nye europeiske standarder (beregningsstandarder, prøvingsstandarder mv.):

- NS-EN ISO 6946 Bygningskomponenter og -elementer - Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient - Beregningsmetode (1997)
- NS-EN ISO 8990 Varmeisolering - Bestemmelse av stasjonære varmeoverføringsegenskaper - Kalibrert og skjermet varmemotapparat (1997)
- NS-EN ISO 10456 Byggematerialer og -produkter - Prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier (2000), innbefattet nasjonalt tillegg⁴.
- NS-EN ISO 10211-1 Kuldebroer i bygningskonstruksjoner - Varmestrømmer og overflatetemperaturer - Del 1: Generelle beregningsmetoder (1996)
- NS-EN ISO 10211-2 Kuldebroer i bygningskonstruksjoner - Beregning av varmemotstand og overflatetemperaturer - Del 2: Lineære kuldebroer (2001)
- NS-EN 12524 Byggematerialer og -produkter - Hygrotermiske egenskaper - Tabulerte dimensjonerende verdier (2000). Vil muligens bli innarbeidet i NS-EN ISO 10456.
- NS-EN 12667 Byggematerialers og produkters termiske egenskaper - Bestemmelse av varmemotstand ved skjermet og uskjermet varmemotmåler - Produkter med høy og middels varmemotstand (2001)
- NS-EN 12939 Byggematerialers og byggeprodukters termiske egenskaper - Bestemmelse av varmemotstand ved skjermet varmemotmåler og uskjermet varmemotmåler - Produkter med stor tykkelse og høy eller middels varmemotstand (2001)
- NS-EN ISO 13370 Bygningers termiske egenskaper - Varmeoverføring via grunnen - Beregningsmetode (1999)
- NS-EN ISO 13793 Bygningers termiske egenskaper - Termisk dimensjonering av fundamenter for å unngå telehiv (2001)
- NS-EN ISO 7345 Varmeisolering - Fysiske størrelser og definisjoner (1996)

4 NS-EN ISO 10456 er under revisjon og vil også inkludere NS-EN 12524. Ny tittel er prEN ISO 10456 Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values

Noen produktstandarder

Oversikt over noen produktstandarder, for produkter til bruk i uoppvarmede konstruksjoner, veier og plasser:

- NS-EN 13163 Varmeisolasjonsprodukter for bygninger - Fabrikkfremstilte produkter av ekspandert polystyren (EPS) - Krav - (innbefattet rettelsesblad AC:2005) (2001).
- NS-EN 13164:2001+A1 Varmeisolasjonsprodukter for bygninger - Fabrikkfremstilte produkter av ekstrudert polystyrenskum (XPS) - Krav - (innbefattet endringsblad A1:2004 og rettelsesblad AC:2005).
- EN 14933 Thermal insulation and light weight fill products for civil engineering applications - Factory made products of expanded polystyrene (EPS) - Specification (fastsettes som NS-EN 14933 i 2008).
- EN 14934 Thermal insulation and light weight fill products for civil engineering applications - Factory made products of extruded polystyrene foam (XPS) - Specification (fastsettes som NS-EN 14934 i 2008).
- prEN 15732 Light weight fill and insulation products for civil engineering applications (CEA) - Expanded clay lightweight aggregate products (LWA) (standarden er under utarbeidelse)

Opplysninger om tilgjengelige standarder finnes ved å gå inn i Pronorm nettbutikk på nettsidene til Standard Norge. www.standard.no

Norges forskningsråds nordområdestrategi

Research strategy for the northern areas

Ivar Horoli, Norges teknisk teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), (ivar.horoli@ntnu.no)

Summary

There is broad-based political agreement that the Northern Areas Initiative must be bolstered and made more cohesive. This will enable Norway both to cope with ongoing changes at the global level and to successfully exploit the abundant resources found in these areas. The focus here is on safeguarding Norway's interests adequately, executing Norway's commitments responsibly, and finding prudent ways to benefit from the tremendous opportunities intrinsic to this region. Research can provide us with the key to understanding how to develop communities and the industrial sector in the north in a sound and sustainable manner. Based on the Northern Areas Initiative political agreement The Norwegian Research Council have made research strategy for the northern areas to promote increased focus on these issues.

Satsingsområde

Norges forskningsråd (NFR) lanserte høsten 2006 en egen strategi for nordområdene (1). Dette er en satsing som går på tvert av de definerte forskningsprogrammene, og som skal stimulere til økt fokus på forskning i våre nordområder. Dette kommer som en konsekvens av en erkjennelse av den store betydningen nordområdene representerer, og av Norges forvaltningsansvar her. Føringer som Regjeringen har lagt gjennom den nasjonale nordområdesatsinga har også vært en premissgiver for denne strategien.

I grunnlagsdokumentet *forskning.nord* (1) som NFR har utarbeidd, er følgende visjon formulert:

Norge er i 2020 en ledende forskningsnasjon i nordområdene, en respektert forvalter av ressursene i nord og Nord-Norge er en sterk og mangfoldig nærings- og FoU-region.

Forskningsrådet har på dette grunnlag utarbeidet en tredelt strategi:

- Sikre at nordområdesatsningen underbygges av et nasjonalt kunnskapsløft.
- Bidra til styrking av kompetanseinfrastrukturen i nord.
- Fremme internasjonalt forskningssamarbeid med hovedvekt på samarbeid med Russland og internasjonalt samarbeid med andre land som har interesser og aktiviteter i Arktis.

Forskningsrådet vil prioritere 5 brede samfunnsutfordringer i nordområdene i tillegg til å utnytte nordområdenes unike forskningsmuligheter generelt:

1. *Petroleumsvirksomhet i nord*: Hvordan kan petroleumsressursene utnyttes og bidra til en robust samfunnsutvikling med minst mulig skade på miljøet og de marine biologiske ressursene?
2. *Miljø og marine ressurser*: Hvordan kan vi best mulig forvalte miljøet og utnytte de store marine biologiske ressursene?
3. *Innovasjon og næringsutvikling*: Hvordan kan forskningen bidra til næringsutvikling og økt forskningsinnsats i næringslivet i nord?
4. *Livsvilkår i nord*: Hvordan kan forskning på kritiske områder bidra til bedre livsvilkår i nord?
5. *Utenrikspolitikk og den arktiske dimensjon*: Hvordan kan Arktis bli en region for samarbeid og utvikling?
6. *Nordområdenes unike forskningsmuligheter*

For 2008 er det foreslått økninger på 300 millioner kr innenfor nordområdelevant forskning (2).

Referanser

- (1) PDF-utgave av rapporten *Forskning.nord*, forskningsstrategi for nordområdene, Norges Forskningsråd, Oslo, september 2006, ISBN 82-12-02341-9 (trykksak), ISBN 82-12-02342-7 (pdf)

Nettsteder

(2) Store satsinger:

<http://www.forskningsradet.no/servlet/Satellite?c=Informasjonstekst&pagename=ForskningsradetNorsk%2FHovedsidemal&cid=1182736869278>

(3) Nordområdestrategien:

<http://www.forskningsradet.no/servlet/Satellite?c=Page&cid=1148232800601&pagename=nord%2FPage%2FHovedSide>

(4) Det internasjonale polaråret:

<http://www.polaryear.no/>

(5) Informasjon fra Norges Forskningsråd:

<http://www.forskningsradet.no>

Konferanseoversikt og nettsteder

Conferences, meeting calendars and websites

Øystein Myhre, Statens vegvesen Vegdirektoratet (oystein.myhre@vegvesen.no)

Redaktør / Editor

Utvalgte konferanser og møter, 2008

Selected conferences and meetings, 2008

April 13.-18.

European Geosciences Union, General Assembly 2008, Vienna, Austria (<http://meetings.copernicus.org/egu2008>)

Mai

Annual Russian Permafrost Conference Pushchino, Russia (gilichin@issp.serpukhov.su)

Juni 29. – Juli 3.

Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, U.S.A. (www.nicop.org)

Juli 8. – 11.

Polar Research – Arctic and Antarctic Perspectives in the International Polar Year, July 8 - 11, 2008, St.Petersburg, Russia (<http://www.scar-iasc-ipy2008.org>)

August 6. – 14.

33rd International Geological Congress, Oslo, Norway (www.33igc.org)

August 15. – 20.

31st Congress of the International Geographical Union, Tunis (www.igu-net.org) (www.agt.org.tn)

August 25. – 29.

Eurosoil 2008, Vienna, Austria (www.ecsss.net/congress.htm)

Desember

American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, California, U.S.A. (meetinginfo@agu.org)

Annual meeting of U.S. Permafrost Association (www.uspermafrost.org)

Nettsteder, møtekalendre etc.

Web sites, meeting calendars etc

American Geophysical Union (AGU) Meetings

<http://www.agu.org/meetings>

<http://hydrology.agu.org/>

(AGU Hydrology Section Home Page)

<http://www.uspermafrost.org>

(United States Permafrost Association)

<http://www.geo.uio.no/IPA/PermafrostCourses.htm>

(IUCP Permafrost Courses)

<http://www.unis.no/IPY/Default.htm>

(UNIS, International Polar Year)

<http://www.geo.uio.no/IPA/IPA%20Calendar.htm>

(IPA Planning Calendar)

<http://www.ipa-permafrost.org/>

(IPA, International Permafrost Association)

<http://www.unis.no/studies/>

(Studies at UNIS, The University Centre on Svalbard)

<http://www.uio.no/studier/emner/matnat/geofag/>

(Studies at UiO, University of Oslo)

<http://arcticportal.org/iasc/services/arctic-meeting-calendar/>

(IASC, Arctic Meeting Calendar)

<http://calendar.arcus.org/>

(Arctic Calendar of Events)

<http://calendar.arcus.org/upcomingevents.html>

(Arctic Calendar of Events / Results)

Vedlegg 1

Komité for Frost i Jord

Tilknyttet Norsk Geoteknisk Forening

Komit medlemmer

Anne Lise Berggren, Geofrost AS
Geir Berntsen, Statens vegvesen
Lars Grande, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU)
Ivar Horvli, NTNU, leder for komiteen
Ole Humlum, Universitetet i Oslo (UiO)
Arne Instanes, Opticonsult AS
Ketil Isaksen, Meteorologisk Institutt
Øystein Myhre, Vegdirektoratet
Truls Mølmann, Barlindhaug AS
Anne Gunn Rike, Norges Geotekniske Institutt (NGI)
Even Øiseth, SINTEF
Rune Ødegård, Høgskolen i Gjøvik (HiG)

Mandat

Søke å øke vår kunnskap om frostens art og utbredelse og dens effekt på geomorfologi og menneskelige aktiviteter. Bidra til teknisk og miljømessig gode løsninger for infrastruktur og samfunnsutvikling i kalde strøk.

Tema: Vitenskap og teknologi i kalde strøk.

Klima

Geomorfologi

Sesongmessig frost

- Frostmengde og teledybder
- Telehiv og telekrefter
- Infrastruktur
 - Bygg
 - Konstruksjoner
 - Rørledninger
 - Vann og avløp
 - Veger
 - Jernbane
 - Trafikktunneler
 - Flyplasser

Permafrost

- Art og omfang
- Terrestabilitet
- Infrastruktur
- Forurensing
- Avfallsbehandling

Grunnfrysing

Materialer

- Termiske
- Styrke og deformasjon
- Permeabilitet
- Telefarlighet

Produkter

- Publikasjon om Frost i jord
- Foredrag og kurs
- Internasjonal kontakt

Forholdet til IPA

Komiteen vil fungere som "the Norwegian Adhering Body" i International Permafrost Association (IPA).

Appendix 1

Committee on Frost in Ground

Affiliated Norwegian Geotechnical Society

Committee members

Anne Lise Berggren, Geofrost AS
Geir Berntsen, Norwegian Public Roads Administration
Lars Grande, Norwegian University of Science and Technology
Ivar Horvli, Norwegian University of Science and Technology, chair
Ole Humlum, University of Oslo
Arne Instanes, Opticonsult AS
Ketil Isaksen, Norwegian Meteorological Institute
Øystein Myhre, Directorate of Public Roads
Truls Mølmann, Barlindhaug AS
Anne Gunn Rike, Norwegian Geotechnical Institute (NGI)
Even Øiseth, SINTEF
Rune Ødegård, Gjøvik College

Mandate

Increase our knowledge about frozen ground and its effect on geomorphology and human activities. Contribute to satisfactory solutions, technically and environmentally, for infrastructure and social development in cold regions.

Topics: Science and technology in cold regions.

Climate

Geomorphology

Seasonal frost

- Freezing index and frost depths
- Frost heave and heaving forces
- Infrastructure
 - Buildings
 - Structures
 - Pipelines
 - Water and sewage
 - Roads
 - Railways
 - Traffic tunnels
 - Airfields

Permafrost

- Types and distribution
- Terrain stability
- Infrastructure
- Soil contamination
- Waste handling

Ground freezing

Properties of materials

- Thermal
- Strength and deformation
- Permeability
- Frost susceptibility

Products

- Publication on Frost in Ground
- Lectures and short courses
- International contacts

International contact

The committee will act as "the Norwegian Adhering Body" of the International Permafrost Association (IPA).

Vedlegg 2/Appendix 2

Publikasjoner fra Frost i Jord

Publications from Frost in Ground

Alle publikasjonene i serien er utsolgt, men kopier kan fremskaffes ved henvendelse til Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Arkivet, Postboks 8142 Dep., 0033 Oslo. Alle artiklene har engelsk resyme.

All the publications in the series are out of print, but copies can be produced on demand from the Norwegian Public Roads Administration, Directorate of Public Roads, P.O. Box 8142 Dep., NO-0033 Oslo, Norway. All papers are provided with English summary.

Nr. 1. – Sv. *Skaven-Haug*: Teleteknisk forskning – Historikk (Frost Research in Soils. Historical Review). R. *Sætersdal*: Utvalg for frost i jord. Virksomheten i årene 1968-70 (Committee on Frost Action in Soils. Activities in the Period 1968-70). Ø. *Johansen*: Varmeledningsevne av forskjellige vegbyggingsmaterialer. Del I. Varmeledningsevnenes betydning i frostsammenheng (Thermal Conductivity of some Highway Construction Materials. Part I. The Role of the Thermal Conductivity in the Frost Problem).
Nov. 1970, 24 s.

Nr. 2. – Symposium: Frost i Jord. Del I. Hurdal 23.-24. november 1970. Beregningsmetoder for frostens nedtrengning i jord – Meteorologi – Telemekanismen – Metoder for reduksjon av frostdybder – Måling av varmeparametre (Symposium: Frost Actions in Soils. Part I. Norway 23.-24. Nov. 1970 Meteorology – The Mechanism of Frost Heaving – Methods for Reduction of the Frost Depth and Frost Heaving – Measuring of Heat Parameters).
Feb. 1971, 84 s.

Nr. 3. – Symposium: Frost i Jord. Del 2. Hurdal 23.-24. november 1970. (Symposium: Frost Action in Soils. Part 2. Norway 23.-24. Nov. 1970). Sv. *Skaven-Haug*: Dimensjonering av frostfundamenter. Frysevarme og jordvarme (Design of Frost-Foundations). R. *Sætersdal*: Varmeisolasjonsmaterialer i vegoverbygningen (Insulation Materials in Road Construction). Å. *Knutson*: Frostsikre vegger med bark. Orientering om pågående undersøkelser (Frost Protection of Highways by a Subbase of Bark).
Juli 1971, 48 s.

Nr. 4. – H. *Ruistuen*: Kostnader ved frostsikring av vegger (Cost with Frost Protection of Roads). Ø. *Johansen*: Varmeledningsevne av forskjellige vegbyggingsmaterialer. Del II. Varmeledningsevne av grovkornige jordarter (Thermal Conductivity of some Highway Construction Materials. Part II. Thermal Conductivity of Sandy Soils). T. *Werner-Johannessen*: Varmebalansen i jordoverflaten og frostens nedtrengning i jorden (The Heat Balance of the Earth's Surface and the Penetration of Frost into the Soils).
Nov. 1971, 40 s.

Nr. 5. – R. *Gandahl*: Några svenska erfarenheter från användning av bark i väg (Bark as Road Building Material in Sweden). Å. *Knutson*: Termisk dimensjonering av barklag i veg (Thickness of Bark Layer in Frost Proof Roads). G.S. *Klem*: Bark i Norge. Tilgang på bark til vegbygging (Bark in Norway). K. *Solbraa*: Barkens bestandighet i veifundamenter. Feltobservasjoner (The Durability of Bark in Road Constructions. Field Observations).
Des. 1971, 36 s.

Nr. 6. – R. *Orama*: Varmeisolering på finska vägar och flygfält (Thermal Insulation in the Finnish Highways and Airports). R.L. *Berg*: The Use of Thermal Insulating Materials in Highway Construction in the United States. K. *Solbraa*: Barkens bestandighet i veifundamenter. Laboratorieforsøk (The Durability of Bark in Road Constructions. Laboratory Experiments).
April 1972, 32 s.

Nr. 7. – Å. *Knutson*: Dimensjonering av vegger med frostakkumuleringende barklag (Design of Roads with a Frostaccumulating Bark Layer). Ø. *Johansen*: Beregningsmetode for varmeledningsevnen av minerale jordarter. Del I. Teoretisk grunnlag (A Method of Calculation of Thermal Conductivity of Soils. Part I. General Theory). P. *Gundersen*: Frostsikring av vannledninger ved hjelp av elektriske varmekabler (Frost Protection of Water Pipes by Means of Electric Heating Cables). O.M. *Benestad*: Teledybemåling (Frozen Earth Indication).
Okt. 1972, 40 s.

Nr. 8. – S.D. *Svensden*: Moderne småhus fundamentering (New Ways of Small House Foundation). L. *Nordgård*: Teleproblemer ved småhuskjeller (Frost Problems in Basement Constructions). B. *Adamson*: Frostnedtrengning og bjällagsisolering vis kryprumsgrunnlag (Foundation with CrawlSpaces. Frost Penetration and Equivalent U-value of Floor Slab). K. *Kløve og J.V. Thue*: Plate på mark (Slab-on-Ground Foundation). F. *Færøyvik*: Gulv på grunnen – fra en pratisk synsvinkel (Slab Directly on Ground – From a Practical Point of View). J.R. *Herje*: Pilarer og peler i jord. Frostproblemer (Pilares and Piles in the Ground. Frost Problems). P. *Gundersen*: Frostisolering av rørgrofter (Frost Insulation of Pipe Trenches). J.V. *Thue*: Vinterbygging (Winter-Construction).
Des. 1972, 68 s.

Nr. 9. – P. *Borg-Hansen*: Frostbeskyttelse av eksisterende vegger med toppisoleringemetoden (Frost Protection of Existing Roads by a Top Insulating Layer). Per-Erling *Frivik*: Termisk analyse av frost i jord. Elementer og prinsipper. Del 1 (Thermal Analysis of Frost in Soils. Elements and Principles. Part 1). G. *Refsdal*: The Use of Thermal Insulating Materials in Highway Engineering (Results from Norwegian Test Roads).
Mars 1973, 40 s.

Nr. 10. – R. *Gandahl*: Styrencellplast i väg (Road Construction with a Layer of Polystyrene Foam). Ø. *Johansen*: Beregningsmetode for varmeledningsevnen av fuktige og frosne jordmaterialer. Del II (A Method for Calculation of Thermal Conductivity of Soils. Part II). Å. *Knutson*: Praktisk bruk av bark i vegbygging (Specifications for Use of Bark in Highway Engineering). M.R. *Thompson*: Lime Stabilization of Frost-Susceptible Soils.
Juli 1973, 54 s. + figurbilag.

Nr. 11. – G.M. *Shakhunjants*: Soviet Experience in Handling Harmful Frost-Heaving Effects on Railways. V.S. *Lukjanov*: Application of Hydraulic Analogue Method to Investigation of Physical Processes in Soils. Akin *Önalp*: A Study of the Mechanism of Frost Heave and Stabilization by the Use of Deflocculation Agents. Bjarne *Korbøl og Per Jørgensen*: Faktorer som er bestemmende for kvartære sedimenters innhold av kvarts (Factors which Determine the Quartz Content in Norwegian Pleistocene Sediments). Seiiti *Kinosita*: Water Migration in the Soil During the Frost Heaving.
September 1973, 40 s.

Nr. 12. – *W. Schmidt*: Results of Insulating a Highway Test Section with Rigid Polyurethane Foams. *W. Schmidt*: Opportunities for the Use of Rigid Polyurethane Foams in Roadbuilding to effect Savings in Frost Blanket Gravel. *M.B. Korsunsky, V.N. Gaivoronsky and P.D. Rossovsky*: Moisture Content and Frost Heaving of Highway Subgrade Soils. *Y.M. Vasilyev*: Factors affecting the Heaving of Subgrade Soils at Freezing. *Tore Østeraas*: Kvartærgeologisk kart – En presentasjon med vurdering av nøyaktighetsgrad og begrensninger (Quaternary Maps – A presentation and Evaluation of Exactness and Restrictions). *C. Apostolopoulos, H. Kuhle und W. Schneider*: Theoretische Untersuchung möglicher frostbeständiger Strassenkonstruktionen hinsichtlich ihrer thermo-dynamischen Eigenschaften (Theoretical Investigation of some Possible Frostresistant Pavement Constructions in Relation of their Thermal Properties).
Des. 1973, 44 s.

Nr. 13. – *Jan V. Thue*: Om utforming av grunne fundamenter (Thermal Design of Shallow Foundations). *Eli I. Robinsky and Keith E. Bespflug*: Design of Insulated Foundation. *Per Gundersen*: Frostisolering av rørgrøfter (Frost Insulation of Pipe Trenches). *M.B. Korsunsky, V.N. Gaivoronsky and P.D. Rossovsky*: Determination of Temperature and Depth of Frost Penetration in Pavements and Subgrades. *Reidar Sætersdal*: Utvalg for frost i jord. Årsberetning for 1973 (Committee on Frost Action in Soils. Annual Report of 1973).
Mai 1974, 58 s.

Nr. 14. – *Kenneth A. Linell and G.H. Johnston*: Teknisk planlegging og bygging i permafrostområder (Engineering Design and Construction in Permafrost Regions: A Review). *J. Aguirre-Puente, A. Dupas and A. Philippe*: Frost Heaving and the Classification of Soils in accordance with their Frost Susceptibility. *Frode Færøyvik*: Frostsikre gulv på grunnen (Frost Protected Shallow Foundations). *Lars-Erik Janson*: Undersökning av frysrisk for vattenledningar ovanför tjälgränsen (The Freezing Risk for Water Mains in Frozen Ground).
Oktober 1974, 68 s.

Nr. 15. – *Roy Scott Heiersted*: Ingeniørens rolle i klimaforskningen (A Brief View on Engineering Climate Research). *Roy Scott Heiersted*: Måling av termisk klimabelastning på mark (Field Stations for Recording of Climatic Regime on Ground). *Inge Berg*: Flyplassprosjektet på Svalbard – Anleggstekniske arbeider (The Airfield at Svalbard). *Bjarne Instanes*: Svalbard lufthavn – hangar og kontrolltårn (Svalbard Airport – Hangar and Control Tower). *M.B. Korsunsky, V.N. Gaivoronsky and P.D. Rossovsky*: Thermal Insulation of Motorway Subgrades using Foam Plastic. *Y.M. Vasilyev and M.G. Malnikova*: Frost-Protective Layers made of Stabilized Soils. *Svein L. Alfheim*: Skumplast i vegbygging, - ikke bare til isolering (Plastic Foams in Road Construction – not only for Insulation). *Reidar Sætersdal*: Utvalg for frost i jord. Årsberetning for 1974 (Committee on Frost Action in Soils. Annual Report 1974).
Mai 1975, 60 s.

Nr. 16. – *Roy Scott Heiersted*: Thermal Climate Regime on Road and Ground Surface. *Øistein Johansen*: Thermal Conductivity of Soils and Rock. *Sofus Linge Lystad*: Meteorologiske data. Det norske meteorologiske institutt sett i sammenheng med ulike brukergrupper (Meteorological data and The Norwegian Meteorological Institute). *Vigleif Næss, Øystein Salthaug*: Grunne ledninger og forenkla kumløs-

ninger i utbygging av vannforsynings- og avløpsnett (Possibilities with Shallow Trenches and simplifies Manhole Constructions in Water Supply and Sewage Systems). *Arild Aa. Andresen*: Pilar i telefarlig grunn bør forankres (Pillars in Frost Susceptible Soil ought to be Anchored). *N.A. Peretruhin*: Frost Heaving Forces in Soils.
Oktober 1975, 60 s.

Nr. 17. – Frost i Jord-prosjektets sluttrapport: Sikring mot teleskader. *Reidar Sætersdal*: Problemer ved frysing av jord. Forsikringsaktivitet. *Øistein Johansen*: Grunnlag for termisk dimensjonering. *Roy Scott Heiersted*: Klimadata til frostsikring. *Øistein Johansen m.fl.*: Varmetekniske egenskaper av jord og bygningsmaterialer. *Reidar Sætersdal*: Jordarters telefarlighet. *Geir Refsdal m.fl.*: Frostsikring av veg. *Håkon Hartmark*: Frostsikring av jernbane. *Knut Borge Pedersen m.fl.*: Frostsikring av kulvert, undergang, støttemur og brufundamenter. *Per Gundersen*: Frostsikring av ledninger. *Svein Erik Torgesen*: Frostsikring av gulv på grunnen. *Erik Algaard*: Frostsikring av kalde konstruksjoner. Frostsikring av gulv, fundamenter og grunn i byggeperioden. *Erik Algaard*: Kryperom. *Svein Erik Torgesen*: Frostsikring ved åpen fundamentering.
Nov. 1976, 400 s.

Nr. 18. – *E.E. Ziegler*: The Trans-Alaska oil pipeline. *H.R. Peyton and E.E. Ziegler*: Permafrost. *Sofus Linge Lystad*: Noen betraktninger over snødekke, snødybde og deres sammenheng med meteorologiske parametre (Some remarks on snowcover and snowdepth in relation to other meteorological elements). *Erik Sandegren*: Cellplast anvendning for løsande av ingeniørgeologiske problem inom Statens Järnvägar (The use of cellular plastics in the Swedish State Railways to isolate against frost). *Olle Andersson and Sven Freden*: The influence of a plastic fabric upon the pavement at frost break.
Juli 1977, 52 s.

Nr. 19. – *Tory L. Péwé*: Permafrost research. A workshop survey of some recent activities. *Reidar Sætersdal*: Overslagsberegning av tykkelse på aktivt lag (tinedybde) på Vest-Spitsbergen (An approximate method to calculate the thaw depth on Vest-Spitsbergen). *Knut Borge Pedersen*: Litt om frostsikring av norske vegtunneler (Frost protection of Norwegian road tunnels). *R.S. Heiersted*: Statistisk bestemmelse av klimapåkjenninger. Eksempler med frostmengde og tinemengde (Statistical treatment of climatic loads on constructions).
Desember 1977, 38 s.

Nr. 20. – *O. Gregersen*: NTNFs Utvalg for permafrost. Virksomhet i årene 1976-78 (The Norwegian Committee on Permafrost. Activities in the Years 1976-78). *Tore I. Moen*: En generell omtale av vann- og avløpssystemer i permafrostområder (Utilities Delivery in Permafrost Regions. A general discussion). *J.P.G. Loch*: Influence on the Heat Extraction Rate on the Ice Segregation Rate of Soils. *J.P.G. Loch*: Suggestion for an Improved Standard Laboratory Test for Frost Heave Susceptibility of Soils. *R.S. Heiersted*: Risiko for lastoverskridelse i bygningers funksjonstid (Calculated Risk for Exceeding Design Load during Service Life of structures). *S. Outcalt*: The Influence of the Addition of Water Vapour Diffusion on the Numerical Simulation of the Process of Ice Segregation.
Juni 1980, 60 s.

Nr. 21. – *O. Gregersen*: Permafrost engineering research on Spitsbergen. (Projects initiated by the Norwegian Committee on Permafrost.) *P. Gundersen*: Frostsikring av ledninger i praksis (Practical frost protection of buried pipes). *O. Liestøl*: Permafrost conditions in Spitsbergen. *M. Fukuda and J.N. Luthin*: Pore-water pressure profile of a freezing soil. *O.Th. Mellerud*: Permafrost og byggearbeider på Svalbard (Permafrost and construction work on Svalbard). *T. Førland and S. Kjeldstrup Ratkje*: On the theory of frost heave. Juni 1980, 48 s.

Nr. 22. – *P. Gaskin*: Review of frost susceptibility classification. *T. Hailikari*: The frost susceptibility test for public roads in Finland. *J. Livet*: Experimental method for the classification of soils according to their frost susceptibility, France. *J. Livet*: Technical and regulatory aspects of traffic restrictions during thawing period for public roads in France. *H. Behr*: Criteria for the determination of the frost-susceptibility of soils in the Federal Republic of Germany. *R. Sætersdal*: Prediction of the frost susceptibility of soils for public roads in Norway. *H. Thorén*: Prediction of the frost susceptibility of soils for public roads in Sweden. *Linus B. Fetz*: Shortcut frost heaving test for soils. *P.T. Sherwood*: British experience with the frost-susceptibility of road-making materials. *Edwin J. Chamberlain and David L. Carbee*: The CRREL-frost heave test, USA. November 1981, 63 s.

Nr. 23. – *T.L. Pewe, D.E. Rowan and R.H. Pewe*: Engineering Geology of the Svea Lowland, Spitsbergen, Svalbard. December 1981, 16 s., Description of Geologic Units.

Nr. 24. – *S. Bakkehøi*: Datainnsamlinga på permafroststasjonen i Svea, Svalbard (Collection of data at the permafrost station in Svea, Spitsbergen). *S. Reimers*: Drilling and sampling in frozen ground. *M. Dysli and R. Pfister*: Test of bearing capacity during thaw. *S. Kjeldstrup Ratkje, H. Yamamoto, T. Takashi, T. Ohrai and J. Okamoto*: The hydraulic conductivity of soils during frost heave. *Ø. Johansen*: Termisk dimensjonering av jernbanefundamenter. Frostsikring med isolasjon (Thermal design of railway structures. Frost protection by insulation). Juni 1982, 40 s.

Nr. 25. – *Per Gundersen*: Rasjonelle grunnarbeider for småhusfelt (Provision of utilities and services for single-family housing areas). *Svein Erik Torgersen*: Småhusfundamentering (Foundations for single-family houses). April 1984, 49 s.

Nr. 26. – *G. Refsdal*: Frost protection of road pavements with insulating boards. Norwegian practice and experience. *Kaare Flaate*: Permafrost in the Northern Hemisphere. *Hans Christian Langager*: Permafrost and hydropower development in Greenland. *Ivar Torblaa*: Dam Rieppejavri, Troms – Dam foundation with permafrost. *Steinar Bakkehøi and Christina Bandis*: A preliminary analysis of climatic data from the permafrost station at Svea, Spitsbergen. *Odd Gregersen*: Foundation design on permafrost. *Lasse Sondbø and Alv Orheim*: Experiences from tunnelling in Svalbard. Desember 1987, 43 s.

Vedlegg 3/Appendix 3

Publikasjoner fra Teknologiv avdelingen

Publications from the Technology Division

45. Proceedings of the International Research Symposium on Pavement Wear, Oslo 6th-9th June 1972. 227 p. 1973.
46. Frost i veg 1972. Nordisk Vegteknisk Forbunds konferanse i Oslo 18-19 sept. 1972 (Frost Action on Roads 1972. NVF Conference in Oslo 1972). 136 p. 1973.
47. KNUTSON, Å. Praktisk bruk av bark i vegbygging (Specifications for use of bark in highway engineering). GJESSING, E., HAUGEN, S. Barkavfall - vannforurensning (Bark deposits - water pollution). 23 p. 1973.
48. Sikring av veggutløp (Security measures for road tunnels). 124 p. 1975.
49. NOREM, H. Registrering og bruk av klimadata ved planlegging av høgfjellsveger (Collection and use of weather data in mountain road planning). NOREM, H. Lokalisering og utforming av veger i drivsnø-områder (Location and design of roads in snow-drift). NOREM, H., ANDERSEN, J. G. Utforming og plassering av snøskjermer (Design and location of snow fences). FIXDAL, K. G. Snøskredoverbygg (Snowsheds). SOLBERG, H. Snørydding og snøryddingsutstyr i Troms (Winter maintenance and snow clearing equipment in Troms county). 59 p. 1975.
50. LOCH, J. P. G. Frost heave mechanism and the role of the thermal regime in heave experiments on Norwegian silty soils. FLAATE, K. SELNES, P. Side friction of piles in clay. FLAATE, K., PREBER, T. Stability of road embankments in soft clay. SØRLIE, A. The effect of fabrics on pavement strength - Plate bearing tests in the laboratory. ALFHEIM, S. L., SØRLIE, A. Testing and classification of fabrics for application in road constructions. 48 p. 1977.
51. HANSEN, E. Armering av asfaltdekker (Reinforced bituminous pavements). THURMANN-MOE, T., WOLD, R. Halvsåling av asfaltdekker (Resurfacing of bituminous pavements). GRØNHAUG, A. Fremtidsperspektiver på fullprofilboring av veggutløp (Full face boring of road tunnels in crystalline rocks). REINSLETT, E. Vegers bæreevne vurdert ut fra maksimal nedbøyning og krumming (Allowable axle load (technically) as determined by maximum deflection and curvature). 52 p. 1978.
52. THURMANN-MOE, T., DØRUM, S. Lyse vegdekker (High luminance road surfaces). ARNEVIK, A., LEVIK, K. Erfaringer med bruk av overflatebehandling i Norge (Experiences with surface dressings in Norway). JOHANSEN, J. M. Vegdekkers jevnhet (Road roughness). REFSDAL, G. Vegers bæreevne bestemt ved oppgraving (indeksmetoden) og nedbøynings-måling. Er metodene gode nok? (Road bearing capacity as decided by deflection measurements and the index method). 44 p. 1980.
53. HANSEN, E., REFSDAL, G., THURMANN-MOE, T. Surfacing for low volume roads in semi arid areas. MTANGO, H. Dry compaction of lateritic gravel. THURMANN-MOE, T. The Otta-surfacing method. Performance and economy. REFSDAL, G. Thermal design of frost proof pavements. DAHLBERG, R. G., REFSDAL, G. Polystyrene foam for lightweight road embankments. SØRLIE, A. Fabrics in Norwegian road building. RUUD, O. E. Hot applied thermoplastic road marking materials. SÆTERS DAL, R., REFSDAL, G. Frost protection in building construction. 58 p. 1981.
54. ØSTLID, H. High clay road embankments. GRØNHAUG, A. Requirements of geological studies for undersea tunnels. FLAATE, K., JANBU, N. Soil exploration in a 500 m deep fjord, Western Norway. 52 p. 1981.
55. FLAATE, K. Cold regions engineering in Norway. NOREM, H. Avlanche hazard, evaluation accuracy and use. NOREM, H. Increasing traffic safety and regularity in snowstorm periods. REFSDAL, G. Bearing capacity survey on the Norwegian road network - method and results. DØRUM, S., JOHANSEN, J. M. Assessment of asphalt pavement condition for resurfacing decisions. THURMANN-MOE, T. The Otta-surfacing method for improved gravel road maintenance. SÆTERS DAL, R. Prediction of frost heave of roads. GRØNHAUG, A. Low cost road tunnel developments in Norway. 40 p. 1983.
56. NOREM, H. The bearing capacity, a chronic problem in pavement engineering? REINSLETT, E. Bearing capacity as a function of pavement deflection and curvature. ØVERBY, C. A comparison between Benkelman beam, DCP and Clegg-hammer measurements for pavement strength evaluation. NOREM, H. Detection and prediction of seasonal changes of the bearing capacity at the Vormsund test road. KONOW HANSEN, P. Norwegian practice with the operation of Dynaflect. REFSDAL, G., WARNINGSHOFF, C-R. Statistical considerations concerning the spacing between measuring points for bearing capacity measurements. REFSDAL, G., THOMASSEN, T. S. The use of a data bank for axle load policy planning and strengthening purpose. THOMASSEN, T. S., EIRUM, R. Norwegian practices for axle load restrictions in spring thaw. 80 p. 1983.
57. NOREM, H., HANSEN, E. (red.). Vormsund forsøksveg. Del 3: Observasjoner og resultater (Vormsund test road, Part 3: Observations and results). 168 p. 1984.
58. NOREM, H., HANSEN, E. (red.). The Vormsund test road. Part 4: Summary Report. 82 p. 1987.
59. LYGREN, E., JØRGENSEN, T., JOHANSEN, J. M. Vannforurensning fra veger. I. Sammendragsrapport. II. Veiledning for å håndtere de problemer som kan oppstå når en veg kommer i nærheten av drikkevannsforkomst (Highway pollution). 48 p. 1985.
60. NRRL, ASPHALT SECTION. Surfacing for low volume roads. FRYDENLUND, T. E. Superlight fill materials. PEDERSEN, K. B., KROKORBORG, J. Frost insulation in rock tunnels. ØSTLID, H. Flexible culverts in snow avalanche protection for roads. FLAATE, K. Norwegian fjord crossings why and how. DEIZ, H. S. Investigations for subsea tunnels a case history. BEITNES, H., BLINDHEIM, O. T. Subsea rock tunnels. Preinvestigation and tunnelling processes. 36 p. 1986.
61. Plastic Foam in Road Embankments: FRYDENLUND, T. E. Soft ground problems. MYHRE, Ø. EPS - material specifications. REFSDAL, G. EPS - design considerations. AABØE, R. 13 years of experience with EPS as a lightweight fill material in road embankments. REFSDAL, G. Future trends for EPS use. Appendix: Case histories 1-12. 60 p. 1987.
62. JOHANSEN, J. M., SENSTAD, P. Effects of tire pressures on flexible pavement structures - a literature survey. 148 p. 1992.
63. JUNCA UBIERNA, J. A. The amazing Norwegian subsea road tunnels. 24 p. 1992.
64. GRØNHAUG, A. Miljøtiltak ved vegbygging i bratt terreng (Environmental measures for road construction in mountain slopes). MYHRE, Ø. Skumplast uten skadelige gasser (The phase out of hard CFCs in plastic foam). JØRGENSEN, T. Vurdering av helsefare ved asfaltstøv (Evaluation of health risks of dust from asphalt wear). RYGG, N. Miljømessig vegtilpassing (Environmental road adjustment). 52 p. 1992.
65. HAUCK, C. The effect of fines on the stability of base gravel. ANDRESEN, A. A., RYGG, N. Rotary-pressure sounding 20 years of experience. 24 p. 1992.
66. EVENSEN, R., SENSTAD, P. Distress and damage factors for flexible pavement. 100 p. 1992.

67. STEINMATERIALKOMITEEN Steinmaterialer (Aggregates). 20 p. 1993.
68. KNUTSON, Å. Frost actions in soils. 40 p. 1993.
69. VASLESTAD, J. Stål- og betongelementer i løsmassetunneler (Corrugated steel culvert and precast elements used for cut and cover tunnels). VASLESTAD, J. Støttekonstruksjoner i armert jord (Reinforced soil walls). 56 p. 1993.
70. SINTEF SAMFERDSELSTEKNIKK. Vegbrukers reduserte transportkostnader ved opphevelse av telerestriksjoner (Reduced transportation costs for road user when lifting axle load restrictions during spring thaw period). 144 p. 1993.
71. EVENSEN, R., WULVIK, E. Beregning av forsterkningsbehov basert på tilstandsvurderinger - analyse av riks- og fylkesvegnettet i Akershus (Estimating the need of strengthening from road performance data). 112 p. 1994.
72. Fjellbolting (Rockbolting). 124 p. 1994.
73. BÆKKEN, T., JØRGENSEN, T. Vannforurensning fra veg - langtidseffekter (Highway pollution - long term effect on water quality). 64 p. 1994.
74. VASLESTAD, J. Load reduction on buried rigid pipes. VASLESTAD, J., JOHANSEN, T. H., HOLM, W. Load reduction on rigid culverts beneath high fills, long-term behaviour. VASLESTAD, J. Long-term behaviour of flexible large-span culverts. 68 p. 1994.
75. SENSTAD, P. Sluttrapport for etatsatsingsområdet «Bedre utnyttelse av vegens bæreevne» («Better utilization of the bearing capacity of roads, final report»). 48 p. 1994.
76. FREDRIKSEN, F., HASLE, G., AABØE, R. Miljøtunnel i Borre kommune (Environmental Tunnel in Borre Municipality). FREDRIKSEN, F., OSET, F. GEOPLOT - dak-basert presentasjon av grunnundersøkelser (GEOPLOT - CAD-based presentation of geotechnical data). 48 p. 1994.
77. KOMPEN, R. Bruk av glideforskaling til brusøyler og -tårn (Use of slipforms for bridge columns and towers). 16 p. 1995.
78. KOMPEN, R. Nye regler for sikring av overdekning (New practice for ensuring cover). KOMPEN, R., LIESTØL, G. Spesifikasjoner for sikring av armeringens overdekning (Specifications for ensuring cover for reinforcement). 40 p. 1995.
79. The 4th international conference on the «Bearing capacity of roads and airfields» - papers from the Norwegian Road Research Laboratory. 96 p. 1995.
80. ELKEY, W., SELLEVOLD, E. J. Electrical resistivity of concrete. 36 p. 1995.
81. KNUTSON, Å. Stability analysis for road construction. 48 p. 1995.
82. ARNEVIK, A., WULVIK, E. Erfaringer med SPS-kontrakter for asfaltering i Akershus (Experiences with wear-guaranteed asphalt contracts on high volume roads in Akershus county). 28 p. 1996.
83. Sluttrapport for etatsatsingsområdet «Teknisk utvikling innen bru- og tunnelbygging» («Technical development - bridge and tunnel construction, final report»). 20 p. 1996.
84. OFU Gimsøystraumen bru. Sluttrapport «Prøveparasjon og produktutvikling» («Technical development - bridge and tunnel construction, final report»). 156 p. 1996.
85. OFU Gimsøystraumen bru. Sluttrapport «Klimapåkjenning og tilstandsvurdering» («Climatic loads and condition assessment, final report»). 248 p. 1998.
86. OFU Gimsøystraumen bru. Sluttrapport «Instrumentering, dokumentasjon og verifikasjon» («Instrumentation, documentation and verification, final report») 128 p. 1998.
87. OFU Gimsøystraumen bru. Anbefalinger for inspeksjon, reparasjon og overflatebehandling av kystbruer i betong (Recommendations for inspection, repair and surface treatment of coastal concrete bridges). 112 p. 1998.
88. OFU Gimsøystraumen bru. Anbefalinger for instrumentert korrosjons- overvåking av kystbruer i betong. (Recommendations for instrumental corrosion monitoring of coastal concrete bridges). 60 p. 1998.
89. OFU Gimsøystraumen bru. Hovedresultater og oversikt over slutt- dokumentasjon (Main result and overview of project reports). 24 p. 1998.
90. KROKEBORG, J. Sluttrapport for Veggrepsprosjektet «Veggrep på vinterveg» («Studded tyres and public health, final report»). 52 p. 1998.
91. GRØNHAUG, A. Tunnelkledninger (Linings for water and frost protection of road tunnels). 68 p. 1998.
92. LOFTHAUG, J. K., MYRE, J., SKAARDAL, F. H., TELLE, R. Asfaltutviklingsprosjektet i Telemark (Cold mix project in Telemark). 68 p. 1998.
93. ØVERBY, C. A guide to use of Otta seals. 52 p. 1999.
94. STORÅS, I. et al.: Prosjektet HMS - sprøytebetong (Fullscale testing of alkali-free accelerators). 64 p. 1999.
95. WULVIK, E., SIMONSEN, O., JOHANSEN, J. M., EVENSEN, R., GREGER, B. Funksjonskontrakt for lavtrafikkveg: Rv 169, Stensrud- Midtskog, Akershus, 1994-1999 (Performance-contract for the low traffic road Rv 169). 40 p. 2000.
96. Estetisk utforming av vegtunneler (Aesthetic design of road tunnels). 64 p. 2000.
97. DAVIK, K. I., BUVIK, H. Samfunnstjenelige vegtunneler 1998-2001. Sluttrapport (Tunnels for the citizen, final report). 94 p. 2001.
98. MELBY, K. et al. Subsea road tunnels in Norway. 28 p. 2002.
99. VASLESTAD, J. Jordnagling (Soil nailing). 52 p. 2002.
100. FRYDENLUND, T. E., AABØE, R. et al. Lightweight fill materials in road constructions. 52 p. 2002.
101. PALMSTRØM, A., NILSEN, B., BERGE PEDERSEN, K., GRUNDT, L. Miljø- og samfunnstjenelige tunneler; Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg (Appropriate amount of investigations for under ground rock). 134 p. 2003.
102. RØNNING, J.S. Miljø- og samfunnstjenelige tunneler; Delprosjekt A, Forundersøkelser – Sluttrapport (New geological and geophysical methods for tunnel investigations). 68 p. 2003.
103. KARLSRUD, K., ERIKSTAD, L., SNILSBERG, P. Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø (Requirements concerning tunnel leakages and environmental aspects) 100 p. 2003.
104. B. H. KLÜVER, A. KVEEN. Berginjeksjon i praksis (Practical pre-grouting). 68 p. 2004.
105. M. LINDSTRØM, A. KVEEN. Miljø- og samfunnstjenelige tunneler – Sluttrapport (Tunnel investigations and ground water control. Final report). 74 p. 2004.
106. T. BÆKKEN, P. J. FÆRØVIG. Effekter av vegforurensninger på vannkvalitet og biologi i Padderudvann (The effects of highway pollution on waterquality and biology in Lake Padderud). 92 p. 2004.
107. M. LINDSTRØM, A. KVEEN. Tunnel investigation and ground water control. 35 p. 2005.
108. Ø. MYHRE (red.). Frost i jord 2005 (Frost in Ground 2005). 80 p. 2005.
109. Ø. MYHRE (red.). Frost i jord 2007 (Frost in Ground 2007). 130 p. 2007.

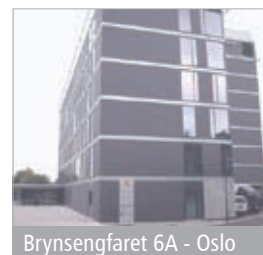
TEKNOLOGIAVDELINGEN

HER FINNER DU OSS:

GEOTEKNIKK- OG SKREDSEKSJONEN
TUNNEL- OG BETONGSEKSJONEN
BRUSEKSJONEN
ADMINISTRASJON

Telefon 02030

Postadresse:
Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Teknologiavdelingen
Postboks 8142 Dep
0033 Oslo



VEGTEKNOLOGISEKSJONEN
SEKSJON FOR ITS OG TRAFIKKTEKNOLOGI

Telefon 73 95 46 30

Postadresse:
Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Teknologiavdelingen
Postboks 8142 Dep
0033 Oslo



Teknologidirektør: Helen Aagot Riddervold
helen.riddervold@vegvesen.no

www.vegvesen.no



Statens vegvesen

Statens vegvesen Vegdirektoratet
Postboks 8142 Dep
N - 0033 Oslo

Telefon sentralbord: 02030
(From abroad: +47 915 02030)
E-post bestilling av publikasjon:
publvd@vegvesen.no

www.vegvesen.no

ISSN: 1504-5064