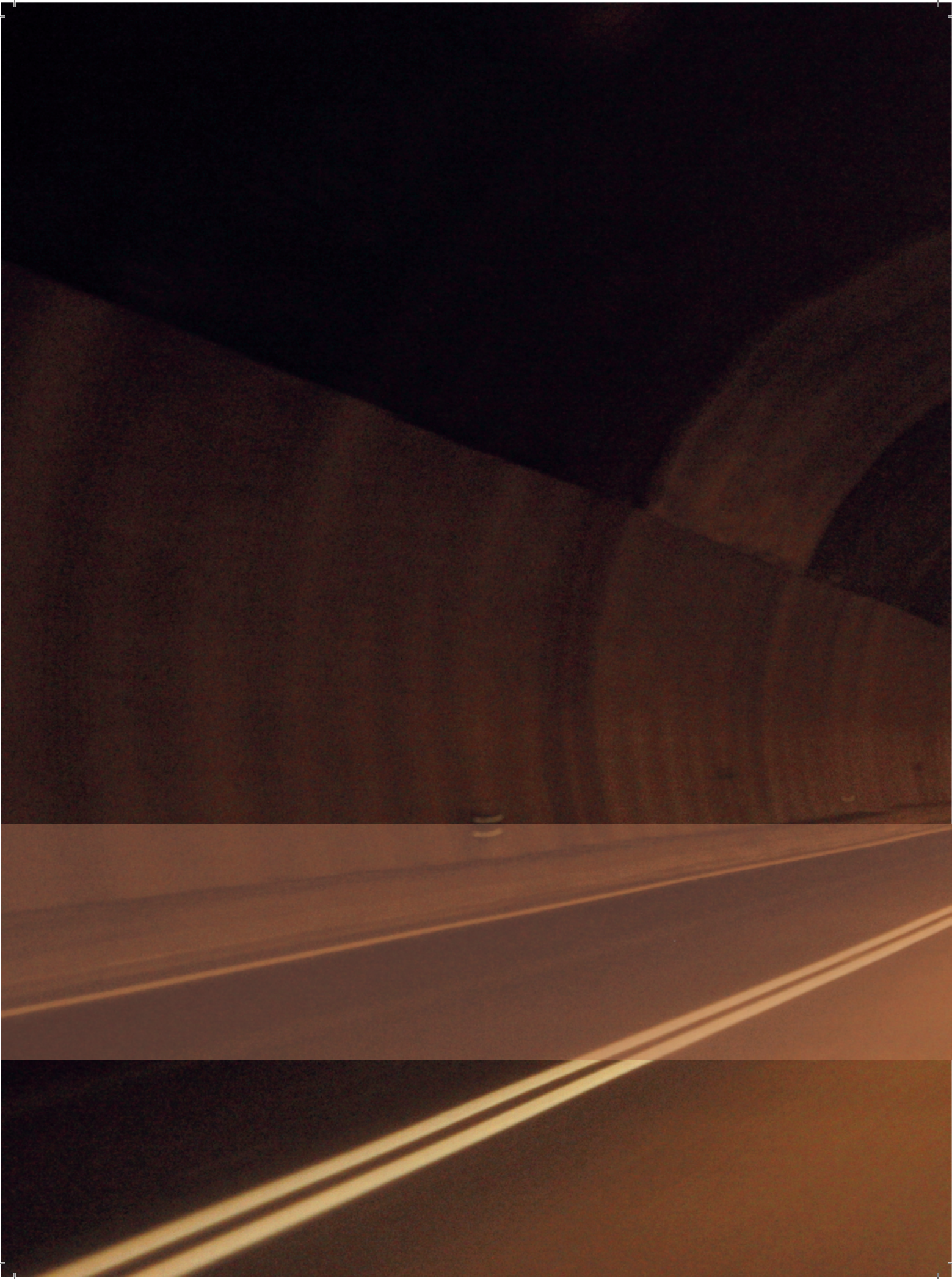
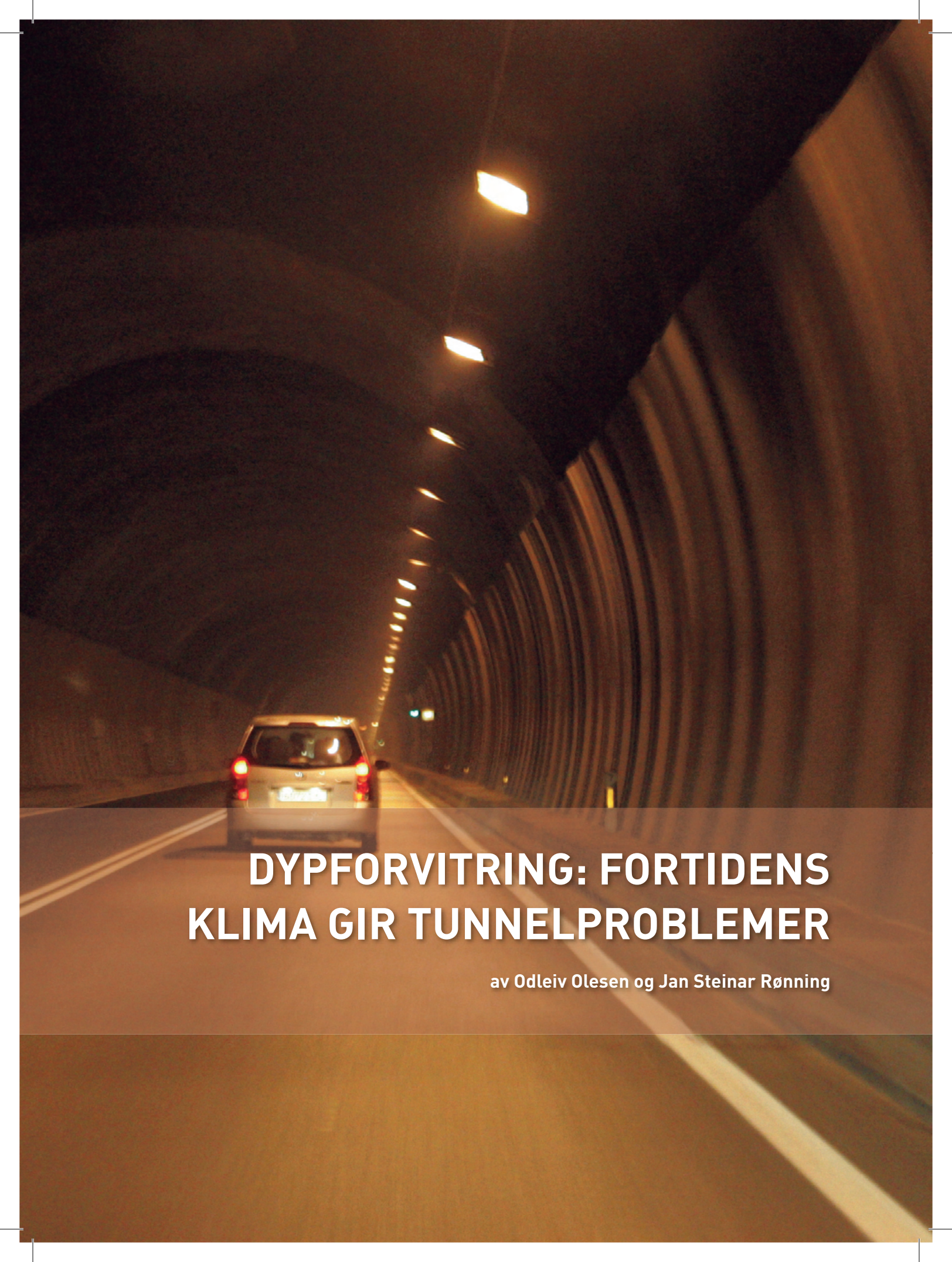
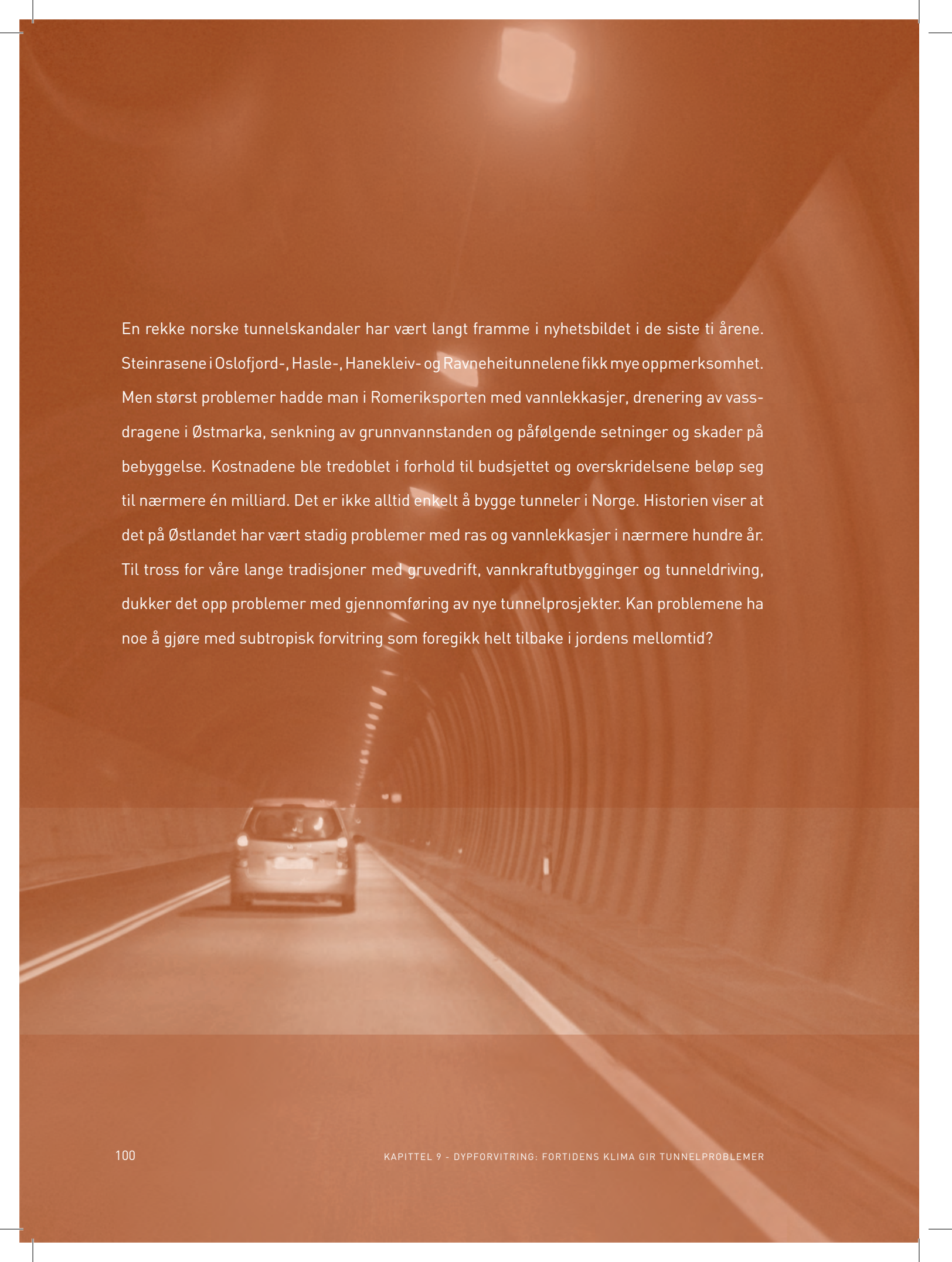




A photograph of a car driving away from the viewer through a tunnel. The tunnel walls are lined with lights, creating a perspective effect. The car's taillights are visible.

DYPPFORVITRING: FORTIDENS KLIMA GIR TUNNELPROBLEMER

av Odleiv Olesen og Jan Steinar Rønning

A photograph of a car driving away from the viewer through a tunnel. The tunnel walls are lined with reflective material, and the floor has white lane markings. The lighting is a warm, orange-brown color, creating a strong sense of depth and perspective. The car is in the center of the frame, and its taillights are visible. The overall mood is somewhat somber and industrial.

En rekke norske tunnelskandaler har vært langt framme i nyhetsbildet i de siste ti årene. Steinrasene i Oslofjord-, Hasle-, Hanekleiv- og Ravneheitunnelene fikk mye oppmerksomhet. Men størst problemer hadde man i Romeriksporten med vannlekkasjer, drenering av vassdragene i Østmarka, senkning av grunnvannstanden og påfølgende setninger og skader på bebyggelse. Kostnadene ble tredoblet i forhold til budsjettet og overskridelsene beløp seg til nærmere én milliard. Det er ikke alltid enkelt å bygge tunneler i Norge. Historien viser at det på Østlandet har vært stadig problemer med ras og vannlekkasjer i nærmere hundre år. Til tross for våre lange tradisjoner med gruvedrift, vannkraftutbygginger og tunneldriving, dukker det opp problemer med gjennomføring av nye tunnelprosjekter. Kan problemene ha noe å gjøre med subtropisk forvitring som foregikk helt tilbake i jordens mellomtid?

DYPFORVITRING: FORTIDENS KLIMA GIR TUNNELPROBLEMER

av Odleiv Olesen og Jan Steinar Rønning

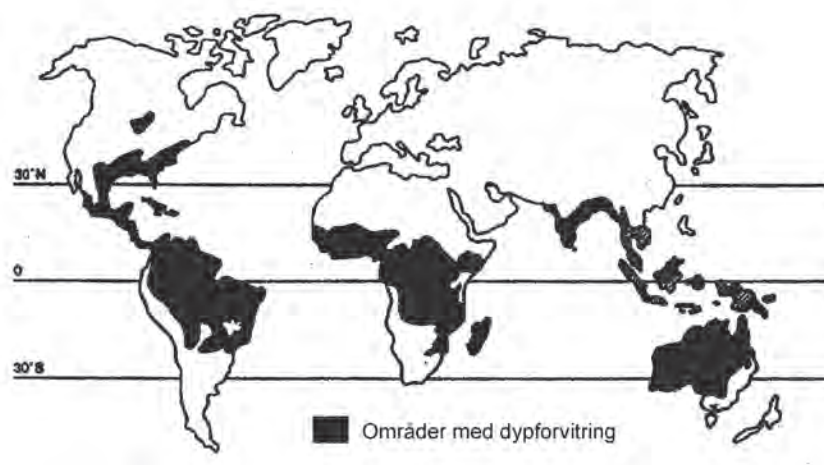
Norges geologiske undersøkelse

INNLEDNING

Negative erfaringer med tunnelbygging i Oslo-området går helt tilbake til tidlig på 1900-tallet. Byggingen av Holmenkollbanen medførte for eksempel så store vanskeligheter at utbyggingsselskapet gikk konkurs og kommunen måtte gripe inn (Kirkemo 2000). Jernbanetunnelen gjennom Lieråsen mellom Asker og Drammen er et annet skandaleprosjekt. Utbyggingen startet i 1962, men etter fem år var bare halve tunnelen sprengt ut. Årsaken var bl.a. soner med "dårlig" fjell (svakhetssoner med svelleleire) hvor ras og vannlekkasjer var resultatet (Huseby 1968, Palmstrøm med flere 2003). For å kunne ferdigstille tunnelen ble det i dette tilfellet nødvendig å legge om traséen. I det siste året er de samme problemstillingene igjen blitt aktuelle. Kostnadene i 2007 med å utbedre Hanekleivtunnelen og de syv andre tunnelene langs E18 i Vestfold ligger også i milliard-klassen. Ekstrakostnader i forbindelse med tunnelprosjekter på Østlandet beløper seg nå til flere milliarder kroner. Nye planlagte tunnelprosjekter i Oslofjord-området representerer de største investeringsprosjektene utenfor oljesektoren i Norge. Ny dobbeltsporet jernbane mellom Oslo og Ski vil sannsynligvis koste nærmere ti milliarder kroner. Nærmere 40 tunneler er nå på ulike stadier i planleggingsfasen innen Vegvesenet og Jernbaneverket. Det er derfor samfunnsøkonomisk lønnsomt å bedre kunnskapen om hvor svakhetssonene ligger, hvordan de er dannet og hvordan de opptrer på dypet.

ET MINNE FRA DINOSAURENE

I trias-jura tid, for mer enn 150 millioner år siden, var det varmt her i landet og dinosaurer rådte grunnen. På denne tiden lå Østlandet på samme breddegrad som India, hvor det i dag pågår subtropisk dypforvitring (Figur 1). I jura var klimaet betydelig varmere enn i dag. Store elver fraktet leire, silt og sand ut i havet der Nordsjøen nå ligger, og det ble avsatt både kildebergarter for olje og gass og reservoarbergarter (sandstein). Det varme og fuktige klimaet ga gode vekstforhold for regnskoger, og restene finner vi i dag igjen som tykke kullag både i Nordsjøen og Norskehavet.



FIGUR 1

Dagens utbredelse av tropisk dypforvitring (Budel 1982). Jordsmonnet i disse områdene karakteriseres ofte av en dyp rød farge.

Enkelte store sumpområder i for eksempel Asia og Sør-Amerika kalles i dag "blackwater". Syrer som finnes i organisk materiale løses ut i vannet og gjør det svært surt. Fargen kan bli helt svart. Vannet kan være så surt at det svir på beina dersom en vader gjennom det. I det sure vannet lever verken bakterier eller sopp. Det gjør at løv og andre planterester som faller ned i vannet fra regnskogen, ikke brytes ned. Gjennom tusenvis av år hoper det organiske laget seg opp og blir mange meter tykt. Vannet er ikke bare surt og svart, næringsinnholdet kan også være mindre enn i regnvann.

Vi tror nå at et tilsvarende surt og "aggressivt" vann rant gjennom sprekker i den underliggende berggrunnen i Oslofjord-regionen i trias-jura tid og angrep silikatmineralene som langsomt ble brutt ned til leirmineraler. Den subtropiske dypforvitringen foregikk gjennom millioner av år og var virksom langs hele overflaten. I svakhetssoner dannet under tidligere forkastningsaktivitet, vulkanisme eller hydrotermal omvandling, kunne den altså trenge langt ned i berggrunnen. Derfor har den fått betegnelsen dypforvitring. Produktene fra forvitringen består bl.a. av leirmineralene smektit (svelleleire) og kaolin. Basert på geologiske og geofysiske undersøkelser tror vi nå at denne leirinfiserte berggrunnen i dag er med og skaper hodebry for tunnelbyggerne på Østlandet.

Varme, vannholdige væsker knyttet til vulkansk aktivitet og dannelse av granittmassiver i Oslofeltet og andre steder i Norge, har lokalt ført til leiromvandling av berggrunnen. Men for å forstå den regionale utbredelsen av svelleleire på Østlandet, Sørlandet og i Trøndelag må vi altså se på andre geologiske prosesser. Studier av landskapet og gneisunderlaget under jura-kritt bergarter i Skåne tyder på at forvitringssonene i stor grad er dannet ved kjemisk forvitring i et subtropisk klima (Figur 2 og 3). Denne nye geologiske viten er basert på 20 års forskning på berggrunn og landskapsformer i bl.a. Sør-Sverige utført av professor Karna Lidmar-Bergström ved Universitetet i Stockholm. Hun har vist at det i Skåne ligger et opptil 60 m tykt lag av forvittringsmateriale under sedimentære bergarter av sen jura og kritt alder (Lidmar-Bergström 1995). Det øverste laget av dypforvitringen var erodert i sen jura eller tidlig kritt. Produkter fra dypforvitring i form av svelleleire og kaolin finnes også i gneisunderlaget under jura-krittbergartene på Andøya (Sturt med flere 1979) og ute på kontinentalsokkelen (Roaldset med flere 1993).

Da havet steg med 300–400 m og fløt inn over fastlandet i kritt tid (for ca. 140–65 millioner år siden), ble bergartene begravd av leirsteiner og kritt av samme type som vi finner i Nordsjøen (for eksempel i Ekofiskfeltet). Hevningen av Østlandet begynte på slutten av tertiærtiden, for 10–20 millioner år siden. Derfor ble produktene fra den subtropiske dypforvitringen sannsynligvis bevart helt fram til de store istidene satte inn for over 2 millioner år siden.

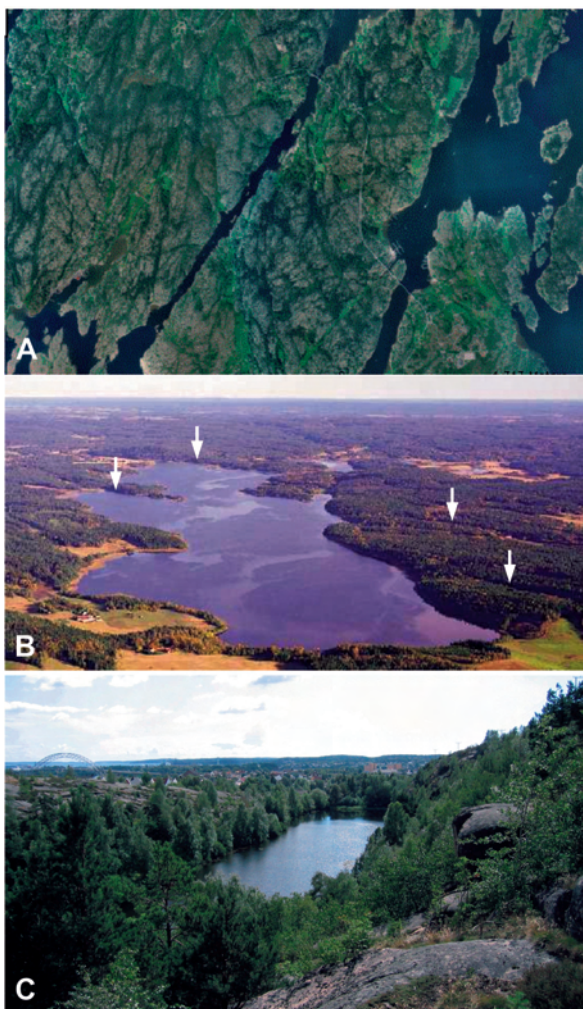
Under istidene sank havnivået igjen. Isens bevegelser, samt de store mengdene med smeltevann, fjernet laget med myke bergarter fra kritt og tertiær som hadde beskyttet forvittringsproduktene. Samtidig forsvant det øverste laget av de forvitrede bergartene, men de eroderende kreftene nådde ikke ned i de dype sprekkesonene hvor det kan ligge bevart mer enn 200 m med forvittringsprodukter (Figur 4A). Denne dypforvitringen kommer til syne når vi lager tunneler opptil 50–200 m under dagens fjelloverflate.

Denne teorien for dannelse av leirsonene betyr at stabilitetsproblemer i tunneler vil avta med dypet (Figur 5).



FIGUR 2

Områder med rester av subtropisk dypforvitring i sprekkesoner og mye leirholdig berggrunn i Sør-Norge og Sør-Sverige. Dette gir dårlige forhold for tunnelbygging. En stor del av vei- og jernbanetunnelene på Østlandet og Sørlandet bygges nå innenfor dette problemområdet. Det er sannsynlig at berggrunnen på ytre deler av strandflaten på Vestlandet også inneholder sprekkesoner med dypforvitring. Kartet er modifisert fra Lidmar-Bergström med flere (1999).



FIGUR 3

Landskapet i Østfold er dominert av sprekkedaler. De skyldes i stor grad erosjon av myke partier med leiromvandling i regionale forkastninger og sprekkesoner. (A) På Hvaler kommer dypforvitringen fram som tydelige daler eller som trange sund mellom øyene. (B) Ved Isesjøen i Sarpsborg-området kommer de eroderte svakhetssonene fram som lineære forsenkninger eller små daler i terrenget. (C) Bingedammen i Fredrikstad ligger i en såkalt sprekkedal. Fredrikstad sentrum med bro over Glomma kan sees i bakgrunnen.

Hurum og i Nordmarka) fantes sannsynligvis allerede før avsetningen av bergartene i kritt-tiden. Isstrømmer under istidene har mye senere gravd ut U-daler og fjorder i området.

Professor Jul Låg ved universitetet på Ås observerte allerede på 1940-tallet at det kunne dyrkes rug og poteter i forvittringsjord som fantes innenfor et flere kvadratkilometer stort område nord for Larvik (Figur 6B og 6C og Låg 1945). Denne jorda var imidlertid for tørr for mange andre nyttevekster. Låg (1963) observerte også at morenemateriale i Nordmarka inneholdt uvanlig mye leire.

I enkelte forsenkninger i terrenget kan vi i dag observere rester av dypforvitringen. Reststeiner (såkalte corestones) finnes for eksempel i Djupdalen ved Larvik (Figur 6b), der en grovkornet dypforvittring er brukt som grus på veiene i området (Sørensen 1988, Olesen med flere 2007).

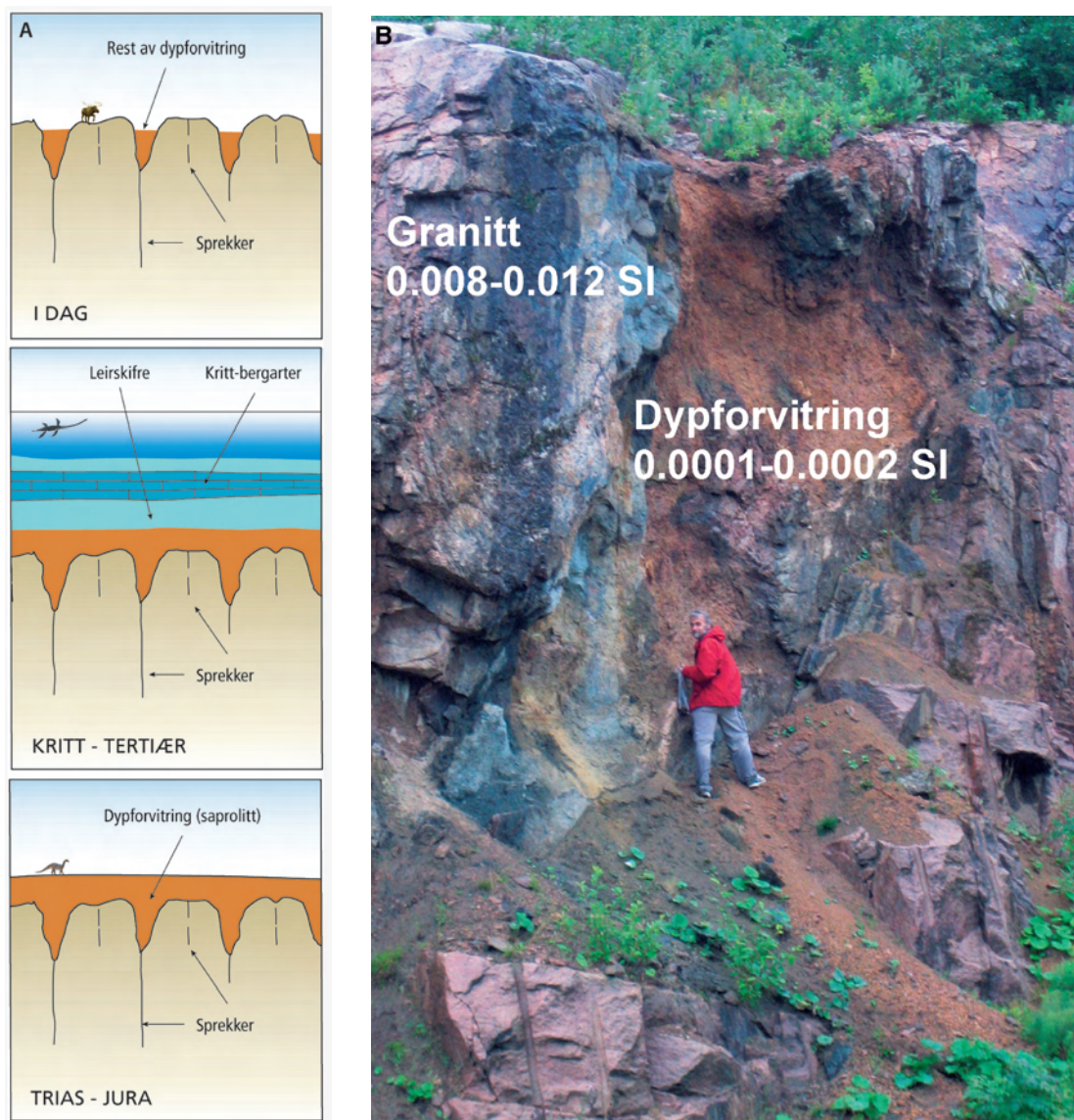
Vannlekkasjer kan derimot øke med dyptet, noe som for eksempel kunne observeres under Puttjern og Lutvann i Romeriksporten. Denne kunnskapen om dannelse av svelleleire må dagens tunnelplanleggere ta hensyn til ved planlegging og kostnadsberegning av nye tunneler (Olesen 2004, Olesen med flere 2007, Rønning med flere 2007).

GAMMEL TEORI — NY TEKNOLOGI

Den kjente geologen Hans Reusch argumenterte rundt forrige århundreskifte for at hele Østlandet var dekket av sedimenter avsatt i kritt (Reusch 1902), og at mange av landskapstrekkene ble lite forandret under istiden (Reusch 1878). Han baserte hypotesen blant annet på et trekk i landskapet som han kalte "påtvungne daler". Han mente at Numedalslågen ikke kunne erodere gjennom Skrimfjella uten at elveløpet var fastlagt i overliggende, mykere sedimenter (Reusch 1902). Han foreslo videre at Valdresvassdraget opprinnelig hadde fortsatt gjennom Nittedal og Øyeren og videre mot sørøst. Dette elveløpet gjennom Nordmarka fulgte også en såkalt "påtvunget dal". Valdresvassdraget hadde altså opprinnelig samme retning som de øvrige større vassdragene i sentrale deler av Skandinavia.

Funn av flint i morene på Østlandet ledet ham til å foreslå at det overliggende, myke laget kunne ha bestått av krittbergarter som han visste var flintførende i Danmark. Denne vurderingen er sannsynligvis riktig, men den har vært lite påaktet i de siste hundre år.

De høyereliggende områdene med magmatiske bergarter (for eksempel lavaplatåene ved Kolsås og Skaugum og granittområdene på



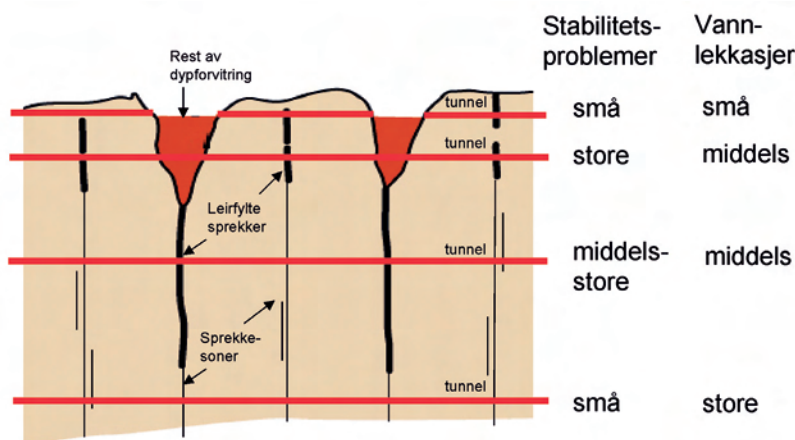
FIGUR 4

(A) Den tropiske forvitringen av krystallinske bergarter i trias-jura-tiden var dypere langs sprekkesoner enn over massive bergarter. Høy havannstand i kritt medførte at dypforvitringen ble bevart under leirsteiner og andre sedimentære bergarter. Etter landhevingen på slutten av tertiær var Østlandet tørt land da de store istidene satte inn for over 2 millioner år siden. Innlandsis og smeltevann eroderte disse ukonsoliderte bergartene i tillegg til det meste av dypforvitringen. Modifisert fra Lidmar-Bergström (1995). (B) Eksempel på dypforvitring i veiskjæring langs E23 i Røyken (Figur 9). Ettersom sonen er bare 1 m bred, har den ikke en markert forsenkning i terrenget. Tallverdiene viser at magnetisk susceptibilitet er lavere i dypforvitringen enn i granitten.

AMAGER-METODEN FINNER SVAKHETSSONENE

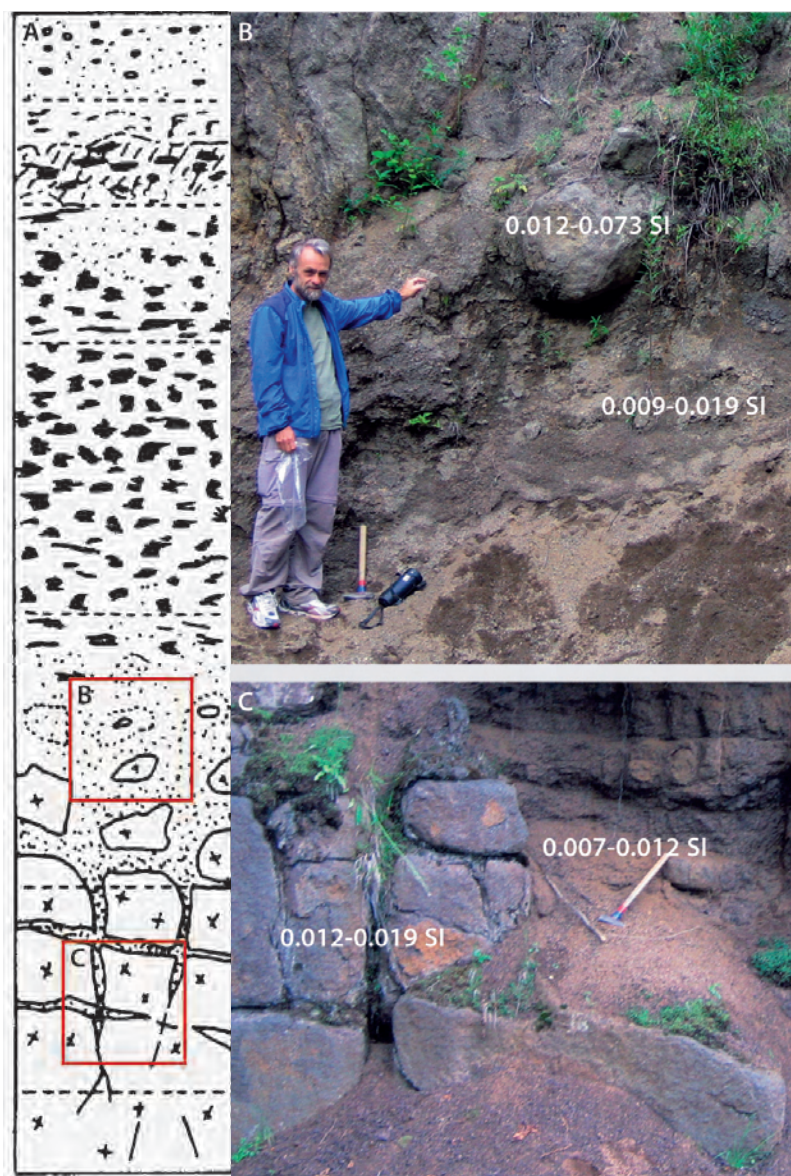
Leire har andre fysiske egenskaper enn krystallinske bergarter. Både elektrisk motstand, seismisk hastighet og tetthet blir lavere. I tillegg vil magnetiserbarheten (magnetisk susceptibilitet) bli redusert. Flymagnetiske målinger er derfor en hurtig og kostnadseffektiv metode for kartlegging av soner med mye leire.

Magnetiske metoder benytter seg av jordens magnetfelt. Vi trenger derfor ikke en kunstig energikilde



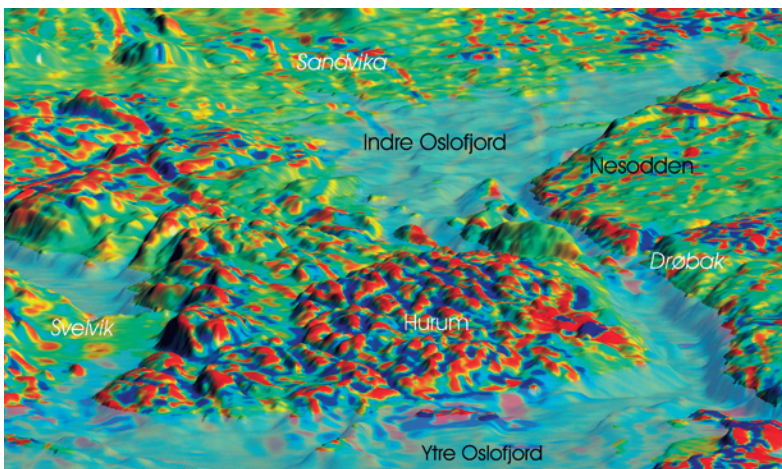
FIGUR 5

Princippskisse for hvordan tunnelproblemerne på Østlandet varierer med dyptet (Olesen med flere 2007). En og samme tunnel kan ha flere typer problemer dersom høyden på overdekningen varierer langs tunneltraséen.



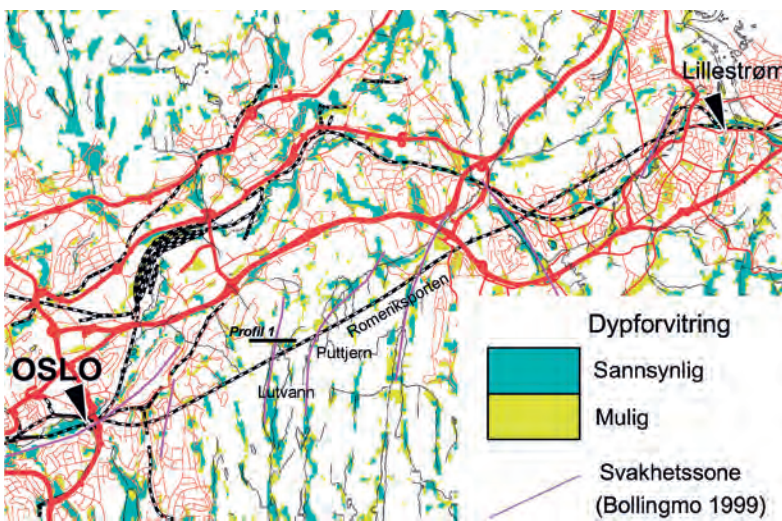
FIGUR 6

(A) Typisk tropisk dypforvittringsprofil med inndeling i seks forskjellige soner (Acworth 1987). De øverste og nederste lagene er av en grovkornet grusig eller sandig type, mens de to midterste lagene er mer leirholdige. Mektighet på dypforvittringen er vanligvis opptil 100 m, men i oppsprukket fjell kan det være betydelig dypere, dvs. opptil 200–300 m. B og C viser eksempler på dypforvittring i de to nederste sonene. (B) Rester av dypforvittring i regional svakhetszone i Djupdal ved Larvik (Sørensen 1988, Olesen med flere 2007). Den forholdsvis grovkornete dypforvittringen av larvikitt er brukt som grus på skogsveiene i området. Reststeiner av uforvitret larvikitt ligger igjen som såkalte corestones. Disse er typiske trekk ved dypforvittringsprofiler i dagens subtropiske strøk. Tallene i hvitt viser at magnetiserbarheten (susceptibiliteten) er redusert i dypforvittringen i forhold til den forholdsvis friske larvikitten. Dette forholdet er også observert i tre andre lokaliteter med dypforvittring i Vestfold og Buskerud. (C) Begynnende dypforvittring langs sprekkesoner i larvikitt ved Thorsås i Siljan (Sørensen 1988, Olesen med flere 2007). Tallverdiene viser at magnetisk susceptibilitet er lavere i dypforvittringen enn i larvikitten.



FIGUR 7

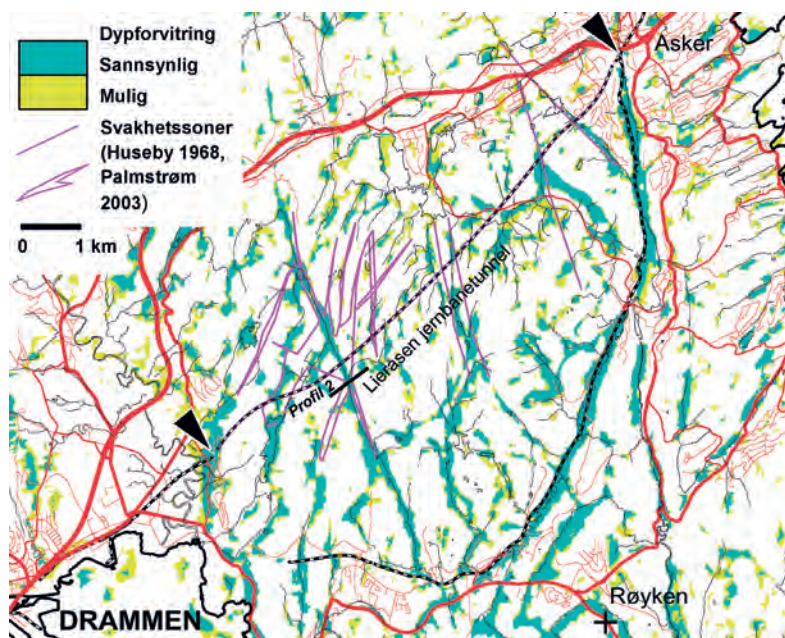
Perspektivkart over Oslofjorden og Hurumlandet. Det filtrerte magnetfeltet er drapert over en digital terrengmodell. Røde og blå farger viser henholdsvis høye og lave magnetiske verdier. Depresjoner i terrenget er ofte sammenfallende med lave magnetiske verdier. Modellberegninger har vist at dette i stor grad skyldes opptreden av lavmagnetiske forvitringssoner i berggrunnen under depresjonene.



FIGUR 8

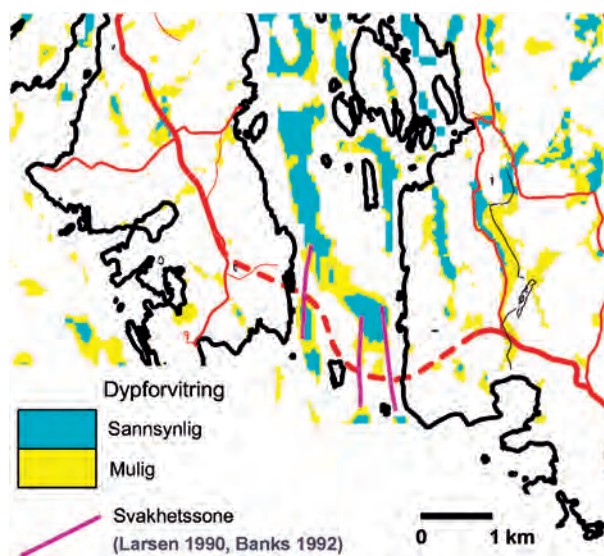
Tolkning av dypforvitring i området Østmarka-Groruddalen (Olesen 2006, Olesen med flere 2007). Dypforvitret fjell tolket med den nye AMAGER-metoden er vist med blå og gule farger. Romeriksporten jernbanetunnel fra Oslo til Lillestrøm er vist sammen med observerte svakhetssoner med dypforvitring (i lilla farger) tolket av Bollingmo (1999). Seks av syv svakhetssoner med leirromvandling kommer også fram på tolkningskartet, men de er her mindre sammenhengende. Dette bekrefter at AMAGER metoden er mest egnet for regional kartlegging. Romeriksporten er relativt dyp og har derfor mindre leirromvandling enn mange andre tunneler på Østlandet. Det er derimot større vannlekkasjer i de dypere deler av tunnelen, for eksempel under Lutvann og Puttjern (Palmstrøm med flere 2003).

for å sende signaler ned i berggrunnen slik som de fleste andre geofysiske metoder. Jordens magnetfelt inducerer en sekundær magnetisering i berggrunnen som igjen vil gi et bidrag til det målte jordfeltet. Det induerte feltet avhenger av bergartens magnetiserbarhet (magnetisk susceptibilitet). Når bergartsdannende silikat-mineraler brytes ned til leirmineraler som smekitt og kaolin under tropiske forhold eller som følge av hydrotermal omvandling, vil de magnetiske mineralene magnetitt og hematitt omdannes til mindre magnetiske jernhydroksyder (rust). Det er denne prosessen som gir den karakteristiske røde fargen i tropisk jordsmonn. Dypforvitring vil derfor gi et negativt avvik i det målte magnetfeltet. En filtreringsmetode er utviklet for å framheve signalet fra dypforvitringen.



FIGUR 9

Tolkning av dypforvitring i Lieråsen (Olesen 2006, Olesen med flere 2007). Dypforvitret fjell tolket med den nye AMAGER-metoden er vist med blå og gule farger. Lieråsen jernbanetunnel fra Lier til Asker er vist sammen med observerte svakhetssoner med dypforvitring (i lilla farger) tolket av Huseby (1968). De to datasettene er i god overensstemmelse og bekrefter at tolkningsmetoden fungerer i disse bergartene. De åtte regionale svakhetssonene med leiromvandling kommer også fram på tolkningskartet. Pluss-tegnet viser Røyken-lokaliteten med dypforvitring i en veiskjæring langs E 23 (Figur 4B).



FIGUR 10

Tolkning av dypforvitring på Hvaler (Olesen 2006). Dypforvitret fjell tolket med den nye AMAGER-metoden er vist med blå og gule farger. Den røde stiplede linjen viser Hvaler-tunnelen mellom Asmaløya og Kirkeøya mens de observerte svakhetssoner med dypforvitring er vist med lilla farge (fra Larsen 1990 og Banks med flere 1992). De tre regionale svakhetssonene med kaolin og svelleleire kommer fram på tolkningskartet.

Sammenfallende negative anomalier (lave verdier) i magnetfeltet og forsenkninger i topografien (Figur 7) brukes som indikasjoner på leiromvandling i den såkalte AMAGER-metoden (AeroMagnetiske og GEomorfologiske Relasjoner). Metoden ser ut til å fungere for de fleste magmatiske og metamorfe bergarter på det sentrale Østlandet. Anvendelsen i lavmagnetiske sedimentære bergarter ser ut til å være mer begrenset. AMAGER-metoden vil også kunne påvise leiromvandling som er dannet av sirkulerende hydrotermale løsningsprosesser i berggrunnen, men disse leirsonene vil sannsynligvis være av mer lokal karakter enn dypforvitringssonene. Metoden er robust for kartlegging av erodert dypforvitring på det sentrale Østlandet, langs kysten av Sørlandet og i Trøndelag. I ytre deler av strandflaten på Vestlandet og i Nord-Norge vil metoden sannsynligvis også kunne brukes.

Magnetiske modellberegninger har vist at lavmagnetisk dypforvitring må være til

stede under de langstrakte sprekkeleirene som er karakteristisk for de såkalte "etse-flatene" på Østlandet (Olesen med flere 2007). Svelleleire og kaolin i dypforvitring tetter vanligvis berggrunnen for gjennomstrømming av grunnvann (Figur 5). Dette er også kjent fra tunnelanleggene på Østlandet der de største vannlekkasjene gjerne kommer gjennom oppsprukket fjell ved siden av eller mellom de store svakhetssonene (Banks

med flere 1992, Palmström med flere 2003]. Dette er kunnskap som også kan nyttiggjøres ved boring etter grunnvann.

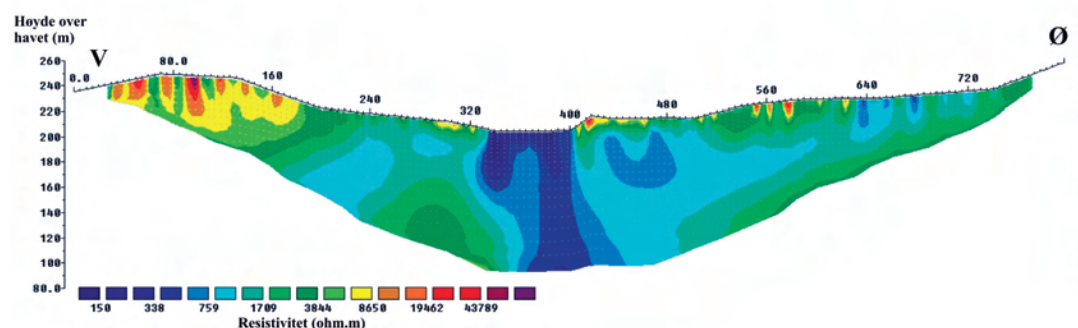
Figurene 8–10 viser tilfredsstillende sammenfall mellom observerte soner med dårlig fjellkvalitet i tunneler og påvisning av dypforvitring med den nye metoden. Metoden er testet i både Romeriksporten, Lieråsen-, og Hvalertunnelen. Til sammen 17 av de 18 kjente svakhetssonene i disse tre tunnelene ble påvist (dvs. mer enn 90%). Metoden gir en grovkartlegging av dypforvitringen og kan brukes på et tidlig stadium i planleggingen av tunneler. Bergarter med lite magnetittinnhold vil imidlertid gi en svak respons. I områder med store løsmassemektheter vil heller ikke metoden fungere tilfredsstillende. På grunn av disse forbeholdene er det nødvendig at en geolog og geofysiker vurderer resultatene før de anvendes direkte i planleggingen av et fjellanlegg. AMAGER-metoden kan videreutvikles slik at magnetiske anomalier vektlegges mer i områder med tykke løsmasser mens terrengdata blir viktigst i områder med lavt magnetfelt.

FIGUR 11

Resistivetsprofil over Romeriksporten nord for Lutvann (A) og over Lieråsen jernbanetunnel (for lokalisering se Figur 8 og 9). Resistivitet høyere enn 1700 Ωm tolkes som massivt og lite oppsprukket fjell. Lavere verdier indikerer oppsprukket og stedvis leiromvandlet fjell.

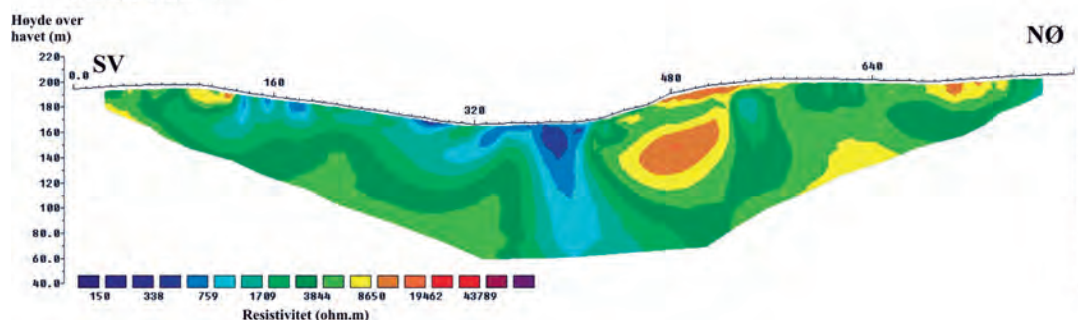
A. Lutvann - nord

Resistivitet
Wenner (a=10m)
Standard inversjon
Vert/Hor. Filter = 1



B. Lieråsen

Resistivitet
Wenner (a=10m)
Standard inversjon
Vert/Hor. Filter = 1



RESISTIVITETSMETODEN KARAKTERISERER SVAKHETSSONENE

Geoelektriske målinger har lenge vært benyttet i malmleting i Norge. I løpet av de siste årene har metoden blitt videreutviklet slik at en i dag effektivt kan kartlegge den elektriske motstanden i bakken i 2 (og 3) dimensjoner (Dahlin 1993, Loke 2003). NGU har tatt i bruk denne teknikken for karakterisering av svakhetssoner i fjell (Rønning 2003, Rønning med flere 2003, Ganerød med flere 2006). Under gunstige forhold kan en bestemme svakhetssoners strøk, fall, tykkelse og dybde, og en kan også få indikasjoner på eventuell leiromvandling i sonene. Det siste kan ha betydning for stabiliteten og hvilke vannproblemer en kan treffe på ved tunnelarbeider.

Svakhetssoner indikert ved AMAGER-metoden er fulgt opp med 2D resistivitets-målinger på i alt 10 lokaliteter (Rønning med flere 2007). I ni av disse har resistivitetsdata bekreftet resultatene fra AMAGER-analysen. I ett tilfelle har resistivitetsmålingene påvist og karakterisert en sone som ved tunneldrivingen førte til betydelige driftsproblemer, men som ikke ga utslag ved AMAGER-metoden (Rønning 2003, Rønning med flere 2007).

Figur 11 A og B viser resultatene fra oppfølgende resistivitetsmålinger ved Romeriksporten og Lieråsen jernbanetunnel. Ved Romeriksporten indikeres en markert ca. 80 m bred sone hvor resistivitet er lavere enn $760 \Omega\text{m}$ (ca. 160 m er lavere enn $1200 \Omega\text{m}$), fallet er steilt mot øst, og sonen ser ut til å gå dypere enn metodens dybderekkevidde på ca. 130 m. Resistivitet er stedvis lavere enn $500 \Omega\text{m}$ og dette kan indikere leiromvandling (Rønning med flere 2003). Under drivingen av tunnelen ca. 200 m under overflaten, var den ukentlige framdrift 25 til 68 m vest for denne sonen og 13 til 30 m per uke øst for sonen. Gjennom selve sonen var gjennomsnittlig framdrift på 5,7 m per uke i en lengde av 170 m.

Over Lieråsen jernbanetunnel indikeres en ca. 40 m bred sone hvor resistiviteten er lavere enn ca. $1200 \Omega\text{m}$. Det indikeres et steilt fall mot øst, og sonen ser ut til å strekke seg dypere enn metodens dybderekkevidde. Ved boringer mot denne sonen ble det påvist mye forvitret fjell, oppsprekning, svelleleire og vanntap (Huseby 1968).

KONKLUSJONER

Gjenværende dypforvitring fra jura-tiden langs eldre svakhetssoner er påvist i Norge. Den nyutviklede AMAGER-metoden kan lokalisere disse sonene, og moderne resistivitetsmålinger kan bidra til karakterisering (fall, bredde, dybderekkevidde og om det er leire på sprekkeleire). AMAGER-metoden gir svekket respons ved lavmagnetiske bergarter, og mye løsmasser kan redusere signaturen. På grunn av disse svakhetssonene er det nødvendig at geolog og geofysiker vurderer resultatene før de anvendes direkte i planleggingen av tunneler.

REFERANSER

- Acworth, R.I. 1987. The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 20, 265–272.
- Banks, D., Rohr-Torp, E. & Skarphagen, H. 1992. An integrated study of a Precambrian granite aquifer, Hvaler, Southeastern Norway. *Norges geologiske undersøkelse Bulletin*, 422, 47–66.
- Bollingmo, P. 1999. "Romeriksporten". Kursdagene ved NTNU, Konferanse om trafikk tunneler, Trondheim.
- Budel, J. 1982. *Climatic geomorphology*. Princeton University Press.
- Dahlin, T. 1993. *On the Automation of 2D Resistivity Surveying for Engineering and Environmental Applications*. Dr. Thesis, Department of Engineering Geology, Lund Institute of Technology, Lund University. ISBN 91-628-1032-4.
- Ganerød, G. V., Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmøy, K., Nilsen, B. & Braathen, A. 2006. Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 231–243.
- Huseby, F.C.A. 1968. Lieråsen tunnel. Del II: Geofysiske og videre geologiske undersøkelser. Tekniske meddelelser — NSB, tekniske tidsskrift for Norges Statsbaner, Nr. 3. NSB, Oslo 1968, 11 s.
- Kirkemo, K. 2000. Tunneldrift for 88 år siden. *GEO*, 5, 40–41.
- Larsen, M.L. 1990. Riksvei 108, Hvalertunnelen, geologisk sluttrapport. Statens Vegvesen, Østfold Report 88/3744, 31 s.
- Lidmar-Bergström, K. 1995. Relief and saprolites through time on the Baltic Shield. *Geomorphology* 12, 45–61.
- Lidmar-Bergström, K., Olsson, C.D. & Roaldset, E. 1999. Relief features and palaeoweathering remnants in formerly glaciated Scandinavian basement areas. I Thiry, M. & Simon-Coinçon, R. (red.) *Palaeoweathering, palaeosurfaces and Related Continental Deposits. International Association of Sedimentologists, Special Publications*, 27, 275–301.
- Loke, M.H. 2003. RES2DINV ver. 3.4. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Instruction manual, www.geoelectrical.com.
- Låg, J. 1945. Weathering of syenite in Kjøse, Vestfold. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 25, 216–224.
- Låg, J. 1963. Notes on geological features of importance for the productivity of the soils of Norway. *Soil Science*, 95, 1–8.
- Olesen, O. 2004. Problemene skyldes dypforvitring. *GEO*, 7, 18–20.
- Olesen, O. 2006. *Aktsomhetskart for tunnelplanlegging, Østlandsområdet, Geofysisk tolkning av dypforvitring*, M 1:100 000. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
- Olesen, O., Dehls, J.F., Ebbing, J., Henriksen, H., Kihle, O. & Lundin, E. 2007. Aeromagnetic mapping of deep-weathered fracture zones in the Oslo Region — a new tool for improved planning of tunnels. *Norwegian Journal of Geology*, 87, 253–267.
- Palmstrøm, A., Nilsen, B., Borge Pedersen, K. & Grundt, L. 2003. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Riktig omfang av undersøkelser for berganlegg. Vegdirektoratet, Teknologivdelingen Publikasjon nr. 101, 132 s.
- Reusch, H.H. 1878. lagtagelser over isskuret Fjeld og forvitret Fjeld. *Christiania Videnskabs-Selskabs Forhandl.*, 7, 1–28.
- Reusch, H.H. 1902. Vore dale og fjelde. Hvordan formen af Norges overflade er dannet. *Naturen*, 26, 29–142.
- Roaldset, E., Riis, F., & Johnsen, S.O. 1993. Weathered basement rocks below Mesozoic sediments, Norwegian North Sea. I Ford, D., McCann, B. & Vajoczki, S. (red.) *Third International Geomorphology Conference, 23–28 August, Hamilton, Ontario, Canada, Programme with Abstracts*, s. 229.
- Rønning, J.S. 2003. Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Sluttrapport delprosjekt A, Forundersøkelser. Statens vegvesen, Publikasjon nr. 102.
- Rønning, J.S., Dalsegg, E., Elvebakk, H. & Storø, G. 2003. Characterization of fracture zones in bedrock using 2D resistivity. *Proceedings 9th EEGS Meeting in Prague*, P005.
- Rønning, J.S., Olesen, O., Dalsegg, E., Elvebakk, H. & Gellein, J. 2007. Dypforvitring i Oslo-regionen. Påvisning og oppfølgende undersøkelser. NGU Rapport 2007.034, 50 s.
- Sturt, B., Dalland, A. & Mitchell, J. 1979. The age of the Sub-Mid-Jurassic tropical weathering profile of Andøya, northern Norway, and the implications for the Late Palaeozoic palaeogeography in the North Atlantic region. *Geologische Rundschau* 68, 523–542.
- Sørensen, R. 1988. In-situ rock weathering in Vestfold, southeastern Norway. *Geografiska annaler*, 70, 299–308.

