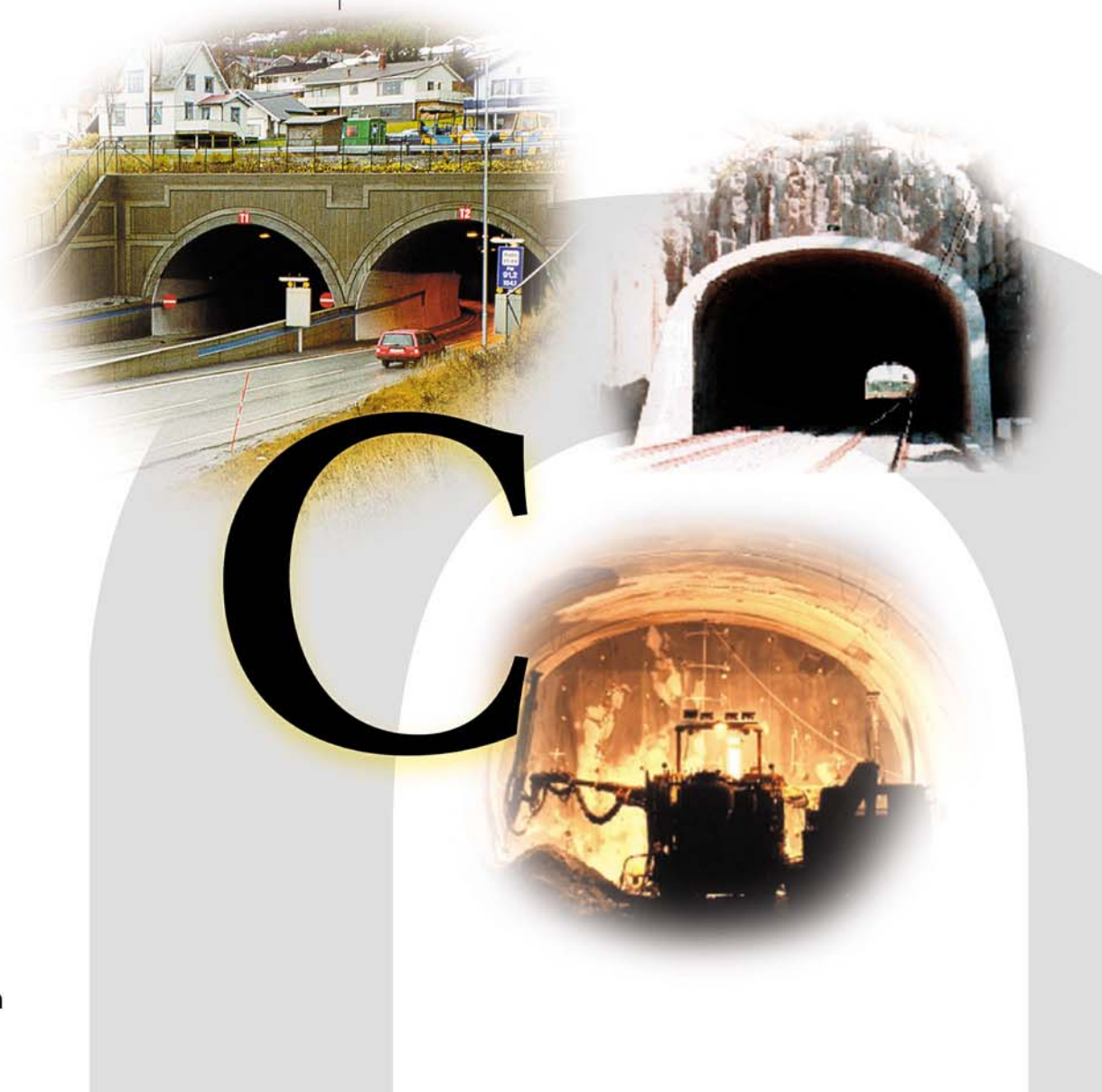


# MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE TUNNELER

Rapport nr: **13**

## Naturlig tetting av tunneler



Intern rapport nr. 2274



**Statens vegvesen**

## Naturlig tetting av tunneller

*Av dr.ing. Lars J. Hem*

Foredrag ved kursdagene ved NTNU, 2002

### 1. Innlekkasje i tunneller; Utvikling over tid

Det har vært observert at lekkasjemengden i noen tunneller har gått ned over tid. Dette har vært observasjoner ut fra praktiske driftsforhold, og vannmålinger som verifiserer den reduserte lekkasjemengden er det mindre av. I Hvitratunnellen ble imidlertid vannmengden som pumpes ut av tunnelen målt i 1994 og i 2001, og måleresultatene viser at vannmengden har sunket fra 500 til 190 l/min. I Romeriksporten pågår målinger av innlekkasje på flere steder, og etter hvert vil en få svar på om vannmengdene vil bli redusert også i denne oversjøiske tunnelen.

### 2. Aktuelle naturlige tettemekanismer

#### 2.1. Generelt

Kontakten mellom vann, jord, sand/grus/silt/leire og fjell gjør at en rekke ulike tettemekanismer kan finne sted naturlig. Følgende tre forhold kan bidra til at slike tettemekanismer kan forekomme:

1. Kjemiske utfellinger/avleiringer
2. Mikrobiologiske/biologiske forhold
3. Fysiske forhold

En rekke vannrelaterte og geologiske forhold kan bidra til at slik tetting kan forekomme. Nedenfor er det forsøkt å gi en oppsummering av forhold som kan medvirke til at naturlig tetting kan forekomme. Det er også forsøkt å sammenstille en rekke parametre som kan bidra til at prosessen går hurtigere eller ikke forekommer i det hele tatt. Ideen er at vi i løpet av dette prosjektet skal ha kunnet komme fram til en serie med aktuelle parametre som bør kontrolleres/vurderes når man planlegger gjennomføring av en fremtidig tunnelbygging eller annet anleggsarbeide i fjell/løsmasser. Før oppstart av dette prosjektet vet vi lite/ingenting om hvor ofte ulike typer tetting forekommer og vi er usikre på hva vi bør sette fokus på. Det er derfor i dette notatet ønskelig å oppsummere alle tenkelige mekanismer som bør vurderes. Noen av disse ønsker vi sannsynligvis kun å vurdere på papiret med bakgrunn i eksisterende informasjon. Andre forhold ønsker vi å gå videre med gjennom praktiske undersøkelser i felt eller lignende og noen ønsker vi muligens å få gjennomført svært detaljerte studier av. De sistnevnte er muligens av en mer langsiktig karakter og det kan bli aktuelt å forsøkes etablert konkrete dr. grads prosjekter knyttet til noen av de mest interessante problemstillingene.

## 2.2. Kjemiske avleiringer

Kjemiske avleiringer kan skyldes en rekke ulike forhold. De antatt mest aktuelle avleiringene er sammenstilt i tabell 1 sammen med de viktigste parametrene som påvirker dannelsen av de ulike avleiringsproduktene.

**Tabell 1. De vanligste kjemiske avleiringene som forekommer i naturlige vannforekomster i kontakt med ulike bergarter.**

Type avleiring	Kjemisk formel	Viktigste parametre
Kalsiumkarbonat (kalsitt)	CaCO <sub>3</sub>	partialtrykket av CO <sub>2</sub> , pH, temperatur, totalinnholdet av løste salter <sup>2</sup> , kalsium
Kalsiumsulfat		
Gips (mest vanlig)	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	Temperatur, totalinnholdet av løste salter <sup>2</sup> , trykk, kalsium, trykk
Halv-hydrat	CaSO <sub>4</sub> · ½ H <sub>2</sub> O	
Anhydrat	CaSO <sub>4</sub>	
Bariumsulfat	BaSO <sub>4</sub>	Temperatur, trykk, barium, sulfat, totalinnhold av løste salter <sup>2</sup>
Stronsiumsulfat	SrSO <sub>4</sub>	Som for barium + innholdet av stronsium
Jernforbindelser		
Ferrokarbonat	FeCO <sub>3</sub>	Løste gasser (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, O <sub>2</sub> ), pH, innholdet av jern, red/oks forholdene
Ferrosulfid	FeS	
Ferrohydroksid	Fe(OH) <sub>2</sub>	
Ferrihydroksid	Fe(OH) <sub>3</sub>	
Ferrioksid	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>1</sup>	
Manganforbindelser		
Manganoksid	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnO <sub>2</sub>	Som for jern + innholdet av mangan
Mangansulfid	MnS	
Manganhydroksid	Mn <sub>2</sub> (OH) <sub>3</sub>	

1) I tillegg kan en ha en rekke ulike ferro og ferri oksider og hydroksider.

2) De saltene som primært bidrar til vannets totale saltinnhold er Na, Mg, Ca, K, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>.

Utfellinger av sulfater og sulfider er primært knyttet til marint miljø. Dette inkluderer også i noen grad områder med marine sedimenter som i dag ligger over havnivå.

I tillegg til de avleiringene som er angitt i tabell 1 vil selvsagt lokal geologi påvirke mengde og sammensetning av avleiringene, slik at en kan finne fluorider eller andre metaller enn de som nevnes i tabellen.

Utfelt jernhydroksid kan over tid omdannes til ulike oksider og kombinasjoner av oksider og hydroksider. De ulike oksidene og hydroksidene vil ha ulik kjemisk og mekanisk stabilitet. Generelt er hydroksider og oksider av Fe<sup>3+</sup> og Mn<sup>4+</sup> mindre løselig i vann enn hydroksider og oksider av Fe<sup>2+</sup> og Mn<sup>2+</sup>.

Organisk materiale, som humus, og silikat, borat og fluorid, kan kompleksbinde kationer. Dette kan medføre at en ikke vil få utfellinger der en skulle forvente det ut fra f.eks. pH og

innhold av jern i grunnvannet, og vannets innhold av humus og silikater er derfor viktige parametre når en skal forutsi mulige avleiringer.

I grunnvann finnes gjerne mangan på redusert form som  $Mn^{2+}$ . Kjemisk oksidasjon av mangan til  $Mn^{4+}$  skjer hurtig i naturlig vann ved pH over 9. Ved pH mellom 7,5 og 9 kan kjemisk oksidasjon skje i jord, men dette vil da gå sakte. Mangan kan oksideres katalytisk ved kontakt med allerede oksidert mangan ( $MnO_2$ ) selv om pH er lavere enn 7,5.

Oksidasjon av jern og mangan produserer hydroksider, mens utfelling av jernhydroksider fjerner hydroksider fra vannet. Begge disse forholdene påvirker selvsagt vannets pH, og dermed potensialet for utfelling av en rekke ulike karbonater, hydroksider og oksider.

Grunnvann som lekker inn i tunneller vil få tilgang på oksygen, noe som muliggjør kjemisk oksidasjon av reduserte forbindelser av jern og mangan. Dersom vannet også kommer i kontakt med sement, vil en kunne få en pH-økning, noe som både bidrar til utfelling av kalsiumkarbonat og øker muligheten for oksidasjon av mangan.

### 2.3. Biologiske prosesser

Visse bakterier, bl.a. *Lepthotrix*, kan gi mikrobiologisk oksidasjon av mangan. Mangan kan som nevnt oksideres katalytisk ved kontakt med allerede oksidert mangan ( $MnO_2$ ), og dette bidrar til en aksellerert oksidasjon og utfelling der det finnes manganoksiderende bakterier. *Lepthotrix* finnes ofte der vannhastigheten er stor, men bakterien er også påvist i bunnslam i overføringsstunneller for vann.

Det finnes en rekke mikroorganismer som bidrar til oksidasjon av jern fra  $Fe^{2+}$  til  $Fe^{3+}$ , og på den måten bidrar til utfellinger av  $Fe(OH)_3$ .

Sulfatreduserende bakterier produserer sulfid, noe som kan gi utfelling av ferrosulfid. Dersom sulfid igjen kommer i aerobe (oksygenholdige) forhold, vil sulfiden oksideres til sulfat. den sistnevnte oksidasjonen kan være både kjemisk og mikrobiologisk induert.

Ulike mikrobiologiske prosesser vil påvirke vannets pH, noe som igjen vil påvirke mulighetene for utfelling av hydroksider, oksider, karbonater og sulfider. En vanlig biologisk prosess i jord er nitrifikasjon, dvs. oksidasjon av ammonium til nitritt og nitrat, som vil redusere vannets pH.

### 2.4. Fysiske forhold av betydning for avleiringer

Mengde grunnvann som trenger inn i bergrom, samt trykket på dette vannet, vil påvirke mulighetene for naturlig tetting. Økende vannhastighet og trykk vil stille større krav til styrken på de utfellingene som vil avleires.

Utfellinger som skyldes pH-økning pga. kontakt med sement må forventes å skje direkte på sementoverflaten. Utfellinger som skyldes oksidasjon pga. vannets kontakt med oksygen, vil imidlertid kunne gi små partikler som må separeres fra vannet for å gi en naturlig tetting. En slik separering kan være sedimentering eller ulike filtreringsmekanismer, men kan også skyldes adsorpsjon.

Mauring oppstår når fine partikler presses inn i tynne sprekker eller tetter mindre hulrom.

Swelling av leire kan også påvirke gjentettingsprosessen, spesielt i leirholdige berarter. Kloritter er mineraler som er kjent for sin evne til swelling. Gamle bergarter (prekambriske), smekttitter (eks. montmorillonitt) er ofte utsatt for swellingprosessen. Oksygen aktiverer swelling som gir tetting i forhold til vannmolekylet.

## 2.5. Praktiske eksempler fra andre bransjer

Fra vannforsyning og oljeutvinning er det en rekke eksempler på uønskede utfellinger som medfører innsnevring av rørtverrsnitt, gjentetting av dyser m.m. Noen eksempler er:

- Redusert hydraulisk ledningsevne over tid i grunnvannsbrønner. Dette er observert en rekke steder, og både mekanismen mauring og oksidasjon av jern og evt. mangan og utfelling av oksider og hydroksider er trolig involvert.
- Utfelling av kalsiumkarbonat når hardt vann varmes opp. Dette er et meget vanlig problem der grunnvann brukes til vannforsyning.
- Utfelling av jernoksider og –hydroksider som en sekundær effekt av korrosjon i jernrør. Dette har medført drastiske reduksjoner av rørtverrsnittet, og en stor økning i trykktapet når vannet passerer gjennom røret. Akkumuleringen av utfelt jern er oftest størst i nedre del av rørtverrsnittet, noe som skyldes sedimentering, men jernhydroksidpartikler adsorberes/heftes også til den øvre delen av røret.
- Gjentetting av dyser og vannmålere pga. mikrobiologisk manganoksidasjon med påfølgende manganoksidutfelling. Dette forekommer ved noen vannverk, bl.a. der mangan tilføres vannet ved innlekking av grunnvann i overføringstunneller.
- Utfelling av sulfater av kalsium, barium og strontium når produsert vann pumpes ned i reservoaret under produksjon av olje.

Utfelling av kalsiumkarbonat får en også når et hardt og relativt surt grunnvann kommer i kontakt med kalk, f.eks. ved utvasking fra sement eller når kalk tilsettes for å redusere vannets hardhet.

## 3. Måling av vannkvalitet i vann som lekker inn i tunneller

For flere tunneller er det utført målinger av vannkvaliteten som kan vise om det skjer en endring av vannkvaliteten når grunnvannet lekker inn i tunnelen. En slik vannkvalitetsendring kan skyldes flere forhold, f.eks. bruk av sement til tetting eller sikring. De vannparametrene som ble målt er:

- pH, som er en parameter som endrer seg når vannet kommer i kontakt med sement.
- Klorid, sulfat og alkalitet (som antas i hovedsak å bestå av bikarbonat og karbonat).
- Totalt jern, fordi jern vil felles ut når det oksideres, og konsentrasjonene i vannet vil derfor bli redusert.
- Mangan. Påvisning av *Leptothrix* i drensvann, som mål på om mikrobiologisk induert manganoksidasjon kan forekomme. Erfaringer viser at en kan få tetting i vannforsyningsanlegg av manganoksid pga. denne bakterien selv om det ikke er mulig å påvise endringer i manganinnholdet i vannet.
- Totalt kalsium og barium i undersjøiske tunneller.

Ved hjelp av beregningsprogrammet MINEQL (Stecher, 1994) ble det beregnet i hvilken grad vannet var overmettet mhp kalsiumkarbonat, jernhydroksid eller andre stoffer.

Det ble også tatt prøve av utfellinger på utvalgte steder. Disse ble analysert mhp. relevante parametre som jern, mangan, sulfat, alkalitet og kalsium.

Resultatene fra de undersøiske tunnellen Frøyatunnelen, Hitratunnelen, Oslofjordtunnelen og Skatestraumen viser at der det er sjøvann som lekker inn vil jern(III)oksider- og hydroksider, barite, gips og mangan(IV)oksid kunne felle ut fra løselighet og konsentrasjoner i lekkasjevannet når dette kommer inn i tunnelen. Gips, jernhydroksid og manganoksid er observert og/eller påvist som utfellinger på tunnelveggene. I tunnelenes drengssystemer er det påvist store mengder jernhydroksid, noe som til dels utgjør et driftsproblem.

Vannprøver ble også filtrert umiddelbart etter prøvetakingen, og partikkelstørrelsesfordelingen ble bestemt. Typisk midlere partikkelstørrelse var 5 µm, men denne varierte fra 1,2 µm i Oslofjordtunnelen til 9,2 µm i Hitratunnelen.

Der det er ferskt grunnvann som lekker inn vil pH bli høy pga. injisert sement, og både calcite og jernhydroksider vil kunne felle ut.

#### 4. Laboratorieforsøk med utfelling av jernhydroksider

Forsøkene med utfelling ble utført i standard jar-test apparat. Analyse av toverdigg og treverdigg jern ble utført med Dr Lange LASA 50. Analyser av filtrerte prøver ble utført etter filtrering gjennom 0,45 µm membranfilter. Partikkelstørrelsesfordeling ble målt med Malvern Mastersizer partikkelteller.

Sjøvann med pH 8 og syntetisk grunnvann med pH 7 og 10 ble benyttet. Syntetisk grunnvann ble tillaget ved å tilsette følgende til destillert vann:

70 mg/l CaCl<sub>2</sub>  
400 µg/l MnSO<sub>4</sub>  
120 mg/l NaHCO<sub>3</sub>  
HCl til pH 7, eller NaOH til pH 10

Vannet ble tilsatt 100 mg/l kaolin, og 10 mg/l toverdigg eller treverdigg jern. Jern ble tilsatt som jernsulfat. Det ble gjennomført én test uten tilsetting av sediment, og én test med slik tilsetting, og det ble gjennomført tester med kontroller uten jerntilsetting.

Der jern ble tilsatt ble jern(III)hydroksid utfelt, og noe toverdigg jern ble oksidert til treverdigg jern i løpet av testen. Der toverdigg jern ble tilsatt var det også utfellinger av jern(II)hydroksid. Der jern, men ikke kaolin, ble tilsatt, var typisk partikkelstørrelse 50-60 µm. Der både jern og kaolin ble tilsatt var typisk partikkelstørrelse 20-30 µm, og der bare kaolin ble tilsatt var typisk partikkelstørrelse 10-15 µm. Dette viser at utfelling av jernhydroksider medfører en viss økning av partikkelstørrelsen, trolig pga. koagulering og flokkulering. Effekten er, ikke uventet, avhengig av både mengden jern og av mengden mineralske partikler med negativt ladet overflate. Resultatene viser at koagulering og flokkulering, med treverdigg jern som naturlig koagulant, **kan** være en mulig mekanisme av betydning for naturlig tetting av tunneller fordi en vil få utfelt jernhydroksid og destabilisert negativt ladede mineralske kolloider.

#### 5. Hvor går veien videre?

Dette forskningsprosjektet vil pågå ut 2002. Til nå har arbeidet gitt et grunnlag for å formulere en hypotese om at utfelt jern(III)oksid og hydroksid er viktig for den naturlige tettingen i

undersjøiske tunneller, og at i oversjøiske tunneller er utfelling av jern(III)oksid og hydroksid samt gips og calcite mulige bidrag til en slik tetting. Arbeidet i 2002 vil fokusere på en verifisering av denne teorien samt på hvilke lokale forhold som er avgjørende for om en kan få en slik tetting. Et viktig poeng vil være å fastslå om jern i lekkasjevannet foreligger som treverdige, eller om dette først skjer etter at lekkasjevannet eksponeres mot luft inne i tunnellene.

På lengre sikt er en oppfølging av lekkasjemengden i eksisterende tunneller som Romeriksporten og Oslofjordtunnellen viktig, og likeledes en oppfølging av endringer i kjemisk sammensetning av lekkasjevannet.

## 6. Litteratur

Banks, D., Frengstad, B., Krog, J. R., Midtgård, Aa. K., Strand, T. og Lind, B. (1998): Kjemisk kvalitet av grunnvann i fast fjell i Norge. NGU-rapport 98.058.

Cowan, J. C. and Weintritt, D. J. (1976). Water-formed scale deposits. Gulf Publishing Company.

Patton, C.C. (1981): Oilfield Water Systems. Campbell Petroleum Series. Second Edition. Norman, Oklahoma, USA.

Schecher, W. D. and McAvoy, D. C. (1994): MINEQL<sup>+</sup>: A chemical equilibrium program for personal computers. User's manual version 3.0. The Procter & Gamble Company, September.

Stumm, W. and Morgan, J. J. (1981): Aquatic chemistry, 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons.

Van Veen, W. L., Mulder, E. G. and Deinema, M. H. (1978): The *Sphaerotilus – Lepthotrix* Group of Bacteria. Microbiol. Rev., **42**:2:329-356.