

Naturlig tetting av lekkasjer inn i tunneler

Av Lars J. Hem, Aquateam

Lars J. Hem er dr.ing. og ansatt i Aquateam A/S

Sammendrag

Det har vært observert at lekkasjemengden i noen norske tunneler har gått ned over tid, uten at det har vært iverksatt tiltak som skulle tilsi en reduksjon. På denne bakgrunn ble det iverksatt feltundersøkelser for om mulig å påvise naturlige tettemekanismer. Feltundersøkelsene indikerte at utfelling av jern kunne være en viktig årsak til naturlig tetting i flere av de undersjøiske tunnelene. Feltmålinger av lekkasjevannet har vist at både den totale mengden jern og andelen av jern som er oppløst er høyest i tunneler der en påviser store lekkasjer. I tunneler der en har observert relativt liten grad av innlekkasje har mengden jern på redusert form vært liten. Jern, og i mindre grad kalsium, barium og mangan, finnes på partikulær form i vann som lekker inn i tunnelene. Med unntak av ett prøvepunkt kan ikke jernutfelling forklares uten at en forutsetter at jernet er treverdige. Utfelling av kalsium som ble observert i ett tilfelle, som kalsiumkarbonat eller gips, må ses i sammenheng med pH-økning som sekundæreffekt av injeksjon av sement.

Abstract

The leakage of groundwater into some Norwegian tunnels decreases with

time, even though no actions carried out can explain the decrease. In order to study which mechanisms that causes the decrease, field investigations have been carried out. The study indicated that iron hydroxide precipitation that causes an increased hydraulic headloss might be a part of the explanation. The amount of iron in the water, and in particular dissolved iron, is highest in the tunnels with great leakages. In tunnels with less leakage the amount of ferrous iron is low. Particulate iron, and to less extent particulate calcium, barium and manganese, is present in the water leaking into the tunnels. With one exception, the iron precipitation presumes that the iron is ferric. Precipitation of calcium, as calcium carbonate or gypsum, is related to the increase in pH caused by injection of cement.

Bakgrunn

Det har vært observert at lekkasjemengden i noen vegtunneler 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 den undersjøiske Hitratunnelen 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 (Mehlum, 2001). Det første året Hvalertunnelen var i drift med mengden innlekkasje halvert. 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.

Et norsk forskningsprosjekt, Miljø- og samfunnstjenlige tunneler, har pågått siden år 2000. Prosjektet har vært finansiert av Norges Forskningsråd, Statens Vegvesen og en rekke aktører involvert i tunneldrift. Et av delprosjektene har hatt som mål å klarlegge hvilke mekanismer som kan forårsake naturlig tetting, og å fremskaffe kunnskap som kan benyttes til å iverksette konkrete tiltak for å fremme slik naturlig tetting.

Aktuelle naturlige tettemekanismer

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:

- Kjemiske utfellinger/avleiringer
- Mikrobiologiske/biologiske forhold
- Fysiske forhold

En rekke vannrelaterte og geologiske forhold kan bidra til slik tetting. Nedenfor er det forsøkt å gi en oppsummering av forhold som kan medvirke til at naturlig tetting kan skje.

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.

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^{3+} og Mn^{4+} mindre løselig i vann enn hydroksider og oksider av Fe^{2+} og Mn^{2+} .

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 katalyttisk ved kontakt med allerede oksidert mangan (MnO_2) selv om pH er lavere enn 7,5.

Tabell 1. De vanligste kjemiske avleiringene som forekommer i naturlige vannforekomster i kontakt med ulike bergarter (etter Cowan and Weintritt, 1976, Stumm and Morgan, 1996, Patton, 1981)

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

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, SO₄, HCO₃.

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 tunneler 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, øker muligheten for oksidasjon av mangan, og øker utfellingen av jern- og manganoksid og -hydroksider.

Visse bakterier, bl.a. *Leptothrix*, kan gi mikrobiologisk oksidasjon av mangan (van Veen et al., 1981). 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 manganoksidierende bakterier. *Leptothrix* finnes ofte der vannhastigheten er stor, men bakterien er også påvist i bunnslam i overføringstunneler 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 utfelling av $Fe(OH)_3$.

Sulfatreduserende bakterier produserer sulfid, noe som kan gi utfelling av ferrosulfid. Dersom sulfid igjen kommer i aerobe forhold, vil sulfid 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.

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 skjærstyrken på de utfellingene som vil avleires.

Utfelling som skyldes pH-økning pga. kontakt med sement må forventes å skje direkte på sementoverflaten. Utfelling 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.

Svelling av leire kan også påvirke gjentettingsprosessen, spesielt i leirholdige berarter. Kloritter er mineraler som er kjent for sin evne til svelling. Gamle bergarter (prekambriske), smekktitter (eks. montmorillonitt) er ofte utsatt for svellingsprosessen. Svelling er gjerne forårsaket av enten ionebytteprosesser (eks. montmorillonitt) eller oksidasjonsprosesser (eks. alunskifer) (Stumm and Morgan, 1996, Grønnhaug, 2000).

Fra vannforsyning og oljeutvinning er det en rekke eksempler på uønskede utfelling 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 med påfølgende 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 jernoksid 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 overføringstunneler.
 - Utfelling av sulfater av kalsium, barium og strontium når produsert vann pumpes ned i reservoaret under produksjon av olje.
- 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).
 - Jern, fordi jern vil felles ut når det oksideres, og konsentrasjonene i vannet vil derfor bli redusert.
 - Mangan. Påvisning av *Lepthotrix* i dreinsvann, 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.
 - Kalsium og barium i undersjøiske tunneler.

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.

Vannkjemisk sammensetning av vann som lekker inn i tunneler

For flere norske tunneler 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:

Jern, mangan, kalsium og barium ble analysert i både ufiltrerte og filtrerte (0,45 µm) vannprøver. Resultatene er vist i tabell 2.

Det var betydelige variasjoner i den kjemiske sammensetningen i de ulike vannprøvene. Der vannet som lekket inn i hovedsak hadde en salinitet tilsvarende det en har i sjøvann var innholdet av sulfat, kalsium og mangan samt pH og alkalitet i samme størrelsesorden i alle vannprøvene. Innholdet av jern varierte derimot i svært stor grad også i disse prøvene. Der det i hovedsak var ferskvann som lekket inn varierte den kjemiske sammensetningen i betydelig grad på nær sagt alle relevante vannkvalitetsparametre.

Tabell 2: Resultater fra prøvetaking og analyse av vann som lekket inn i tunneler. Prøvene ble tatt i perioden februar-juni 2001.

| Tunnel og prøvetakingsdato | Salt-vann(S) /fersk-vann (F) | Filtrert/ ufiltrert | Målt vannkvalitet | | | | | | | |
|----------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|---------------------|-----|------------------------|
| | | | Fe (µg/l) | Ca (mg/l) | Ba (µg/l) | Mn (µg/l) | SO4 (mg/l) | Alkali-tet (mekv/l) | pH | Ledn-ings-eyne (mS/cm) |
| T-baneringen | F | UF | 750 | 17,2 | | 41 | 38 | 1,46 | 7,0 | 0,37 |
| | | F | 120 | 17,5 | | 27 | 37 | | 7,0 | |
| Frøya-tunnelen 1 | S | UF | 330 | 590 | 23 | | 1840 | 2,6 | 7,3 | 45 |
| Frøya-tunnelen 2 | S | UF | 14 | 440 | 43 | | 1520 | 2,4 | 7,8 | 35 |
| Hitra-tunnelen 1 | F | UF | 18 | 1,91 | | <5 | 14,3 | 5,4 | 9,0 | 1,2 |
| | | F | 12 | 3,9 | | <5 | 23 | 5,1 | 9,0 | |
| Hitra-tunnelen 2 | S | UF | 3000 | 530 | 35 | | 1940 | 2,1 | 7,8 | 54 |
| Skate-straumen 1 | S | UF | 52 | 880 | 80 | 440 | 2400 | 2,1 | 8,1 | 48 |
| | | F | <10 | 520 | 21 | 460 | 2400 | | 8,1 | |
| Skate-straumen 2 | F | UF | 62 | 57 | | 67 | 8,3 | 0,63 | 9,1 | 0,15 |
| | | F | 21 | 9,8 | 13 | <5 | | | 9,1 | |
| Oslofjord-tunnelen 1 | S | UF | 680 | 420 | 19 | 920 | 2600 | 2,5 | 7,6 | 49 |
| | | F | 760 | 420 | 20 | 830 | | | 7,6 | |
| Oslofjord-tunnelen 2 | S | UF | 530 | 1350 | 19 | 1610 | 2300 | 1,5 | 7,4 | 44 |
| | | F | 260 | 1290 | 19 | 1530 | | | 7,4 | |
| Oslofjord-tunnelen 3 | S | UF | 12700 | 370 | 20 | 330 | 2500 | 2,1 | 7,7 | 48 |
| | | F | 8900 | 440 | 22 | 330 | | | 7,7 | |

1) UF og F står for henholdsvis ufiltrert og filtrert prøve.

For noen av prøvene var det en signifikant forskjell mellom innholdet i filtrert og ufiltrert prøve av jern, mangan, kalsium eller barium. En rimelig antagelse er at stoffer som passerer et filter på 0,45 µm foreligger oppløst

eller kolloidalt, mens stoffer som fjernes i filteret er på partikulær form. I tabell 3 er det angitt hvilke stoffer som ut fra dette resonnementet forventes å foreligge i partikulær form på ulike prøvepunkter i de ulike tunnelene.

Tabell 3: Partikulært materiale utfelt på filtrerne ved filtrering (0,45 µg/l) av prøver tatt av vann som lekker inn i tunneler

| Tunnel | Saltvann (S)/ ferskvann (F) | Stoffer som foreligger i partikulær form ut fra forskjellene mellom filtrert og ufiltrert prøve | |
|---------------------|-----------------------------|---|---------------------------|
| | | Partikulær andel > 50 % | Partikulær andel 25- 50 % |
| T-bane-ringen | F | Jern | Mangan |
| Hitratunnelen 1 | F | Ingen | Jern |
| Skatestraumen 1 | S | Jern, barium | Kalsium |
| Skatestraumen 2 | F | Kalsium, jern, mangan | |
| Oslofjordtunnelen 1 | S | Ingen | Ingen |
| Oslofjordtunnelen 2 | S | Jern | Ingen |
| Oslofjordtunnelen 3 | S | Ingen | Ingen |

Ut fra resultatene som er vist i tabell 3 var jern, og i mindre grad kalsium, mangan og barium, en del av det partikulære materialet i vannet som lakk inn i tunnelene. Det var store forskjeller mellom de ulike tunnelene mht. hvor mye jern, kalsium, mangan og barium som forelå på partikulær form.

Det ble også tatt prøve av utfellinger på utvalgte steder. Disse ble analysert mhp. relevante parametre som jern, mangan, sulfat, alkalitet og kalsium. Gips, jernhydroksid og manganoksid er observert og/eller påvist som utfellinger på tunnelveggene. I tunnelenes drens-systemer 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 var størst innlekkasje var partiklene minst. Dersom disse partiklene skal kunne avsettes i sprekker som ikke er fylt av løsmasser må enten sprekken være små, f.eks. i størrelsesorden 50 µm, eller vannhastigheten må være så liten at sedimentert eller avsatt materiale ikke eroderes vekk.

Med bakgrunn i analyseresultatene angitt i tabell 2 er det gjennomført kjemiske likevektsberegninger med beregningsprogrammet MINEQL (Schecher and McAvoy, 1994) for å fastslå hvilke kjemiske forbindelser en kan forvente utfelt i vannet. For vann med høy salinitet (sjøvann) ble aktivitetskoeffisientene korrigert i

henhold til Stumm and Morgan (1981) for de ionene som er angitt der, og for øvrige ioner ble korrigeringene foretatt basert på en antagelse om at enverdige og toverdige an- og kationer vil ha noenlunde like aktivitetskoeffisienter. Resultatene av disse beregningene er viste at under anaerobe forhold vil baritt (BaSO_4) kunne felle der saltvann lekker inn mens en med ett unntak ikke vil ha utfellinger der ferskvann lekker inn. Unntaket var i prøven tatt i Skatestraumen, der kalsiumkarbonat (CaCO_3) og $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ville blitt utfelt. Under aerobe forhold få utfelt hematitt (Fe_2O_3) i alle tunnelene, og manganitt (MnO_2) dersom forholdene lå til rette for manganoksidasjon.

Hvordan kan kunnskapen om naturlige tetteprosesser utnyttes?

Dette prosjektet har bidratt til å klarlegge hvilke mekanismer som kan ha forårsaket en reduksjon i innlekkasjen i tunneler, og hvilke forutsetninger som må være oppfylt for at slik tetting skal skje. Det neste spørsmålet som må stilles er hvordan denne kunnskapen kan utnyttes for å forutsi utviklingen av innlekkasjen i eksisterende og nye tunneler, og eventuelt kunne gjennomføre tiltak for å redusere den ved å akselerere de naturlige tetteprosessen. Noen av de viktigste mekanismene er:

- Muring, dvs. oppbygging og gjen-tetting av et filter i sprekken, vil kunne skje dersom det er partikler i vannet og partikkelstørrelsen er høy nok.

- Dersom en har kalkholdige bergarter, vil en bieffekt av injeksjon med sement være utfelling av kalsiumkarbonat når grunnvannets pH øker pga. utlekking av kalk fra sementen.
- pH-økningen som er nevnt over vil også medføre økt utfelling av jernhydroksider, samt økt oksidasjon av jern og mangan dersom det er oksygen tilstede.
- Dersom oksygen tilføres grunnvannet, enten kunstig eller naturlig ved f.eks. diffusjon, vil jern(II) oksideres til jern(III) og felle ut som jernhydroksid. Jernhydroksid vil både kunne avleires som partikler, og virke som koagulant og flokkulant og dermed bygge opp større partikler. Andre oksidasjonsmidler kan selvsagt også tilsettes, men hvorvidt dette vil være økonomisk realistisk er ikke vurdert.

Referanser

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

Grønnhaug, A. (2000): Vern av betong mot alunskifer. Intern rapport 2167, Statens Vegvesen.

Mehlum, A. (2001): Personlig meddelelse. Statens Vegvesen.

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

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

Stumm, W. and Morgan, J. J. (1996): Aquatic chemistry, 3rd 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.