

# Igensättning av dräner i bergtunnlar

Jim Ekliden



GÖTEBORGS UNIVERSITET  
Institutionen för geovetenskaper

## **Clogging of drainage in rock tunnels**

Jim Ekliden, Göteborg University, Department of Earth Sciences; Geology, Box 460, S-405 30 Göteborg

### **Abstract**

When building rock tunnels, grouting is used to reach environmental and operational requirements regarding the amount of water leaking into the tunnel. There can still be some water left though that's leaking into the tunnel and it can be in the form of damp surfaces, dripping or running water. This water is usually taken care of with drainage that leads the water from the area of leakage to draining systems in the bottom of the tunnel. Drainages can be clogged, forcing the water to run elsewhere and cause unwanted leakages in the tunnel. These leakages result in need for maintenance and thereby cost. The types of clogging that have been recognized are:

- Chemical and biological precipitation of metals carried in solution by the ground water.
- Material suspended in the ground water.
- Material falling out behind drainages.
- Shotcrete ending up behind drainages when applied.
- Ice forming between the tunnel's surface and the drainage.

The greatest risk for clogging is believed to come from biological precipitation of metals. This precipitation happen with help from bacterium that accelerate the process and also increase the precipitated volume by making up part of the volume created.

The best way to avoid clogging of drainages is of course to minimize the amount of water leaking into tunnels. The water leakages still remaining can be evaluated regarding potential precipitation. This is done by observing if precipitates form at the rock surface shortly after the blast off. Where a risk of precipitation occurs the drainage can for instance be provided with pipes for rinsing.

*Keywords:* Rock tunnel, Drainage, Clogging, Bacterium, Chemical precipitation, Biological precipitation, Groundwater chemistry

ISSN 1400-3821

B543

2008

## **Igensättning av dräner i bergtunnlar**

Jim Ekliden, Göteborgs Universitet, Institutionen för geovetenskaper; Geologi, Box 460, S-405 30 Göteborg

### **Sammanfattning**

Vid anläggandet av bergtunnlar injekteras berggrunden för att klara miljö- och funktionskrav gällande mängden inläckande vatten. Ett visst inläckage av vatten kan ändå kvarstå i tunneln, vilket kan vara i form av fuktiga ytor, dropp eller rinnande vatten. Detta vatten hanteras vanligtvis med s.k. dräner, vilka leder vattnet från området för inläckage till dräneringssystem i tunnelns botten. Dräner kan sättas igen, vilket leder till att vattnet tvingas ta andra vägar och orsakar oönskade läckage i tunneln. Dessa vattenläckage leder till underhållsbehov och medföljande kostnader. De typer av igensättning som konstaterats är:

- Kemisk och biologisk utfällning av metaller som finns lösta i grundvattnet.
- Material som finns suspenderat i grundvattnet.
- Material som rasar ut bakom dräner.
- Sprutbetong som tränger in bakom dräner vid sprutning.
- Is som bildas mellan tunnelyta och drän.

Störst risk för igensättning anses komma från den biologiska utfällningen av metaller. Denna utfällning sker med hjälp av bakterier som skyndar på processen och dessutom ökar volymen på utfällningarna genom att själva vara del av de bildade massorna.

Det bästa sättet att undvika igensatta dräner är naturligtvis att minimera mängden inläckande vatten i tunnlar. De vattenläckage som ändå kvarstår kan bedömas avseende utfällningspotential. Detta görs exempelvis genom att observera om utfällning sker på bergytan en kort tid efter utsprängning. Där risk för utfällning förekommer kan dränen t.ex. förses med spolrör som möjliggör rensning av dränen.

*Nyckelord:* Bergtunnel, Drän, Igensättning, Bakterie, Kemisk utfällning, Biologisk utfällning, Grundvattenkemi

## **Förord**

Denna rapport är skriven som examensarbete vid Institutionen för Geovetenskaper på Göteborgs Universitet. Rapporten omfattar 30 högskolepoäng och utgör sista delen i utbildningen Geovetenskapligt program, för en filosofie magisterexamen inom mineralogi och petrologi.

Examensarbetet ingår även som ett delprojekt i det större projektet ”Underhåll av berganläggningar, etapp 2” i regi av SBUF (Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond) i samfinansiering med Betongsprutnings AB (Besab), Göteborg Energi AB, TeliaSonera AB, Banverket och AB Storstockholms Lokaltrafik (SL).

Merparten av arbetet med rapporten har gjorts på NCC Teknik i Göteborg, med handledning från Lars-Olof Dahlström, som även är professor vid Luleå tekniska universitet. Lars-Olof är den som gjorde det möjligt för mig att göra examensarbetet externt, något som varit väldigt lärorikt och gett en intressant inblick i bygg- och anläggningsbranschen. Dessutom har en fältundersökning utförts i delar av TeliaSoneras tunnelsystem under Göteborg. Denna fältundersökning har kunnat utföras med hjälp av Björn Albino som vid tunnelbesöken arbetade för Tyréns. Björn har stor kännedom om tunnelsystemet och kunde visa mig intressanta dräner att studera, något som hade tagit mycket lång tid att leta fram på egen hand. Anna Andrén på Banverket har varit till stor hjälp med att skaffa fram studiematerial samt i diskussioner om dränproblematik. Lars Hedberg har under lång tid varit tunnelansvarig för TeliaSonera i Göteborg. Lars har hjälpt mig att leta fram karteringsmaterial från byggandet av tunnarna, vilket har gjort det möjligt att tolka tunnelgeologin. Största delen av min utbildning har jag läst på Geovetacentrum, Göteborgs Universitet. Här har examensarbetet handletts av professor Jimmy Stigh och professor Sven Åke Larson, vilka har hjälpt och stöttat mig med utformningen av rapporten.

Göteborg, maj 2008



## Innehåll

Abstract .....	I
Sammanfattning .....	II
Förord.....	III
Innehåll.....	IV
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte .....	3
2 Litteraturstudie .....	3
3 Bergbyggnation.....	3
4 Berggrundsgeologi .....	5
4.1 Sveriges berggrund .....	6
4.1.1 Urberget.....	7
4.1.2 Kaledoniderna .....	8
4.1.3 Sedimentär berggrund utanför Kaledoniderna .....	10
4.2 Järn & mangan i berggrunden.....	11
4.3 Tektonik.....	11
5 Grundvatten.....	12
5.1 Grundvatten i berg .....	12
5.2 Grundvattenkemi.....	15
6 Dräner.....	18
6.1 Konstruktion .....	18
6.2 Igensättning.....	22

6.2.1	Kemisk utfällning.....	22
6.2.2	Biologisk utfällning.....	23
6.2.3	Suspenderat material .....	30
6.2.4	Utrasat material samt sprutbetong.....	30
6.2.5	Isbildning.....	31
7	Fältundersökning och resultat .....	32
7.1	Undersökta tunnlar.....	32
7.2	Tunnelgeologi .....	33
7.3	Vattenkemi.....	34
7.4	Referenstunnlar .....	35
7.5	Felkällor .....	35
8	Diskussion och slutsatser .....	38
8.1	Förslag på ytterligare studier .....	39
	Referenser.....	41

## **Bilaga:**

Analysresultat; vattenprover

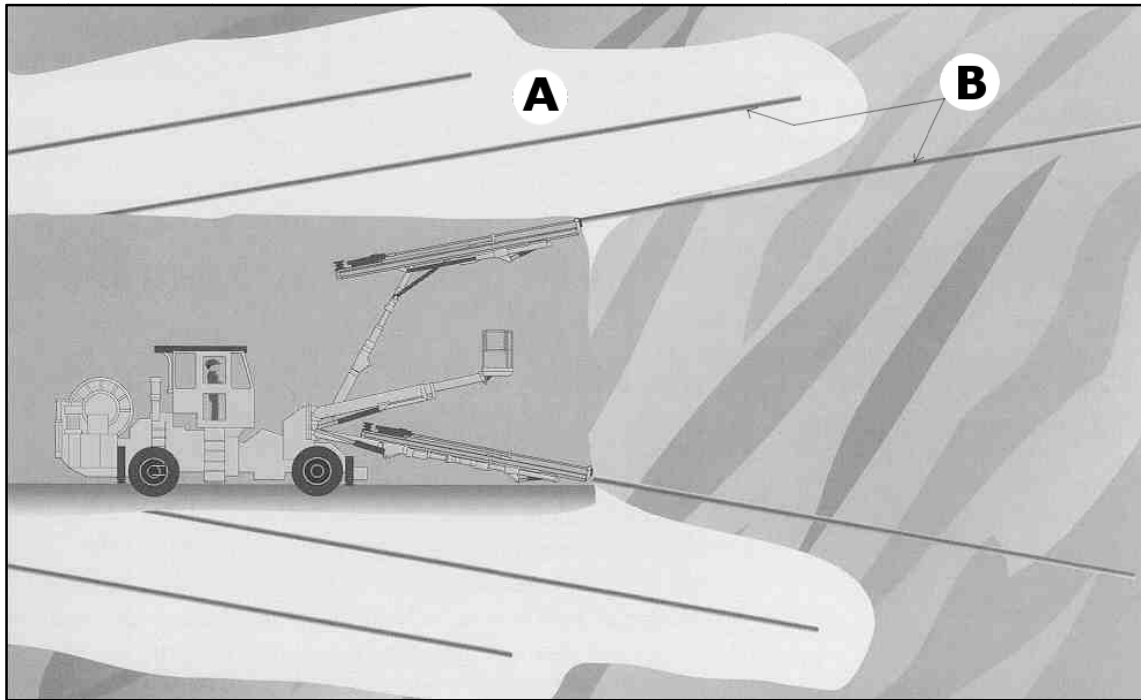
# 1 Inledning

Tidigare SBUF-projekt "Underhåll av berganläggningar, etapp 1" visar att vatten orsakar de primära underhållskostnaderna i berganläggningar. I tunnlar för bil- och tågtrafik innebär underhållsarbete i samband med inläckande vatten att hela eller delar av tunneln måste stängas av för trafik under tiden som underhåll pågår. Detta skapar ofta stora störningar i trafiken och kräver planering i god tid innan arbetet utförs. Underhållsarbetet omfattar bl.a. att avlägsna is som bildas under frostperioder, samt att byta ut eller komplettera dränerande system. Förutom trafikstörningar innebär underhållet även kostnader i form av personal och material för att byta ut eller komplettera befintliga system för hantering av inläckande vatten. I merparten av svenska tunnlar hanteras inläckande vatten med s.k. dräner, vilket förklaras mer längre fram i rapporten. Dräner används och fyller samma funktion i alla typer av berganläggningar, men i denna rapport kommer huvudsakligen tunnlar att nämnas. Anledningen till detta är att en stor del av litteraturen som behandlar dräner berör just tunnlar.

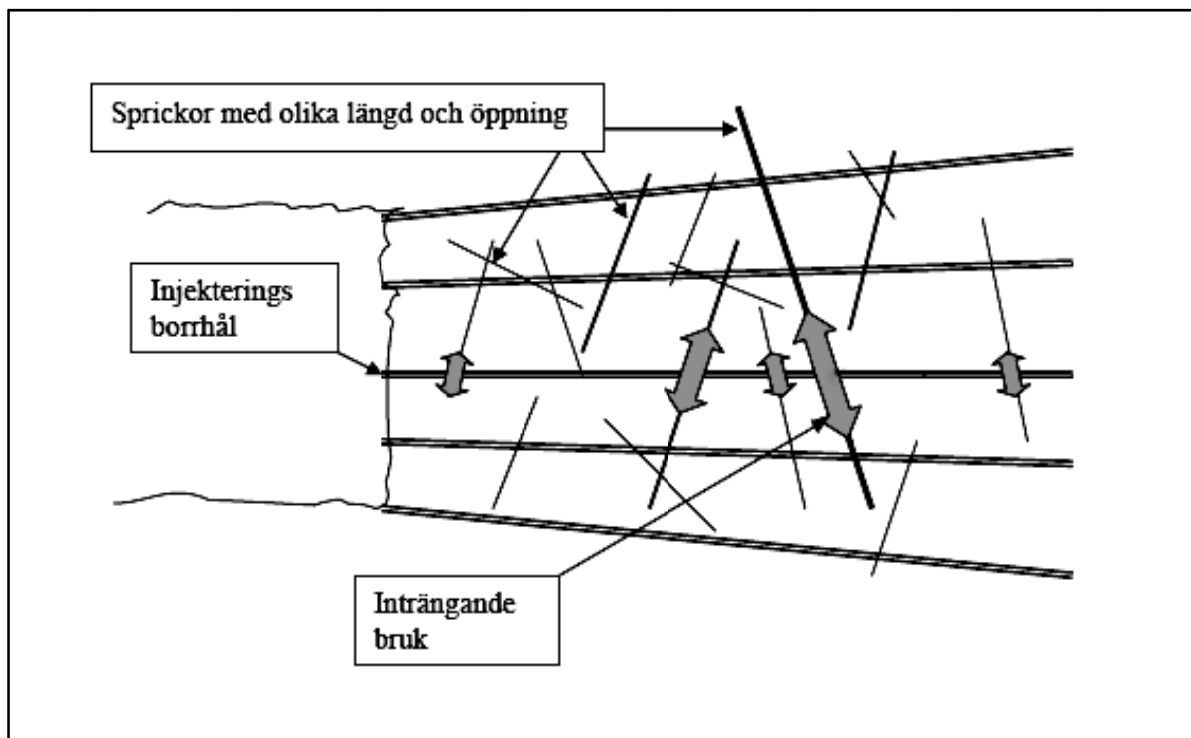
## 1.1 Bakgrund

Merparten av de bergtunnlar som anläggs i Sverige byggs med konventionell drivningsmetod [Vägverket, 2000]. Denna metod innebär att tunneln sprängs ut i ett flertal omgångar där varje ny sektion är ungefär 5 meter lång. För att minimera inläckaget i bergtunnlar utförs injektering av berget, antingen som förinjektering innan sprängningsarbetet, eller som efterinjektering. Vid förinjektering kan högre tryck användas, vilket gör att tätningssmedlet lättare tränger ut i alla sprickor. Med förinjektering skapas en tätningsskärm runt den planerade tunnelskärningen och efterinjektering kan användas som komplettering om lokala läckage kvarstår. Figur 1.1 visar hur en tätningsskärm växer fram genom förinjektering längs tunnelsträckningen. Figur 1.2 visar hur injekteringsbruket tränger in i berggrundens sprickor. Om ytterligare läckage finns kvar hanteras dessa med dräner. Dräner i tunnlar används för att leda bort inläckande vatten, samt för att isolera vattenförekomster och därmed förhindra isbildning under kalla perioder. Vilken typ av insats som krävs beror på berggrundsegenskaper, klimat, grundvattenförhållanden och användningsområde t.ex. om det kommer att vara hög trafikbelastning, om installationer behöver skyddas mm.

Vid tunnelbyggen finns krav på hur mycket vatten som får läcka in i tunneln. Kraven finns dels för att hindra att grundvattennivån sänks. Detta eftersom både byggnader och konstruktioner kan påverkas genom marksättningar, samt att brunnar i området kan torrläggas eller få försämrad kapacitet. Dessutom skapar inläckande vatten problem i tunneln i form av erosion, isbildning och skador på elektriska installationer. Inläckande vatten kan vara i form av fuktiga ytor, dropp eller rinnande vatten. Läckage sker genom naturligt förekommande sprickor i berget, eller genom sprickor som uppstått vid sprängningsarbeten i tunneln.



Figur 1.1, Injekteringskärm runt tunnel. A) Injekteringskärm B) Injekteringshål [Dalmalm, 2004]



Figur 1.2, Injekteringsbrukets spridning i berggrunden [Edrud & Svensson, 2007]

## 1.2 Syfte

Igensättning av dräner är en viktig orsak till underhållsbehov i berganläggningar. Igensättning är en del av dräners åldringsprocess och leder till att vatten som ska dräneras bort istället letar sig andra vägar där det orsakar problem. Syftet med rapporten är att sammanställa kunskap inom problemområdet igensättning hos bergtunneldräner. Detta görs genom en litteraturstudie samt en fältundersökning av tunnlar med igensättningsproblem hos dräner. Resultatet ska leda till att öka förståelsen för dräners åldringsprocess, vilket i sin tur kan vara till hjälp vid anläggandet av nya eller upprustning av befintliga dräner.

## 2 Litteraturstudie

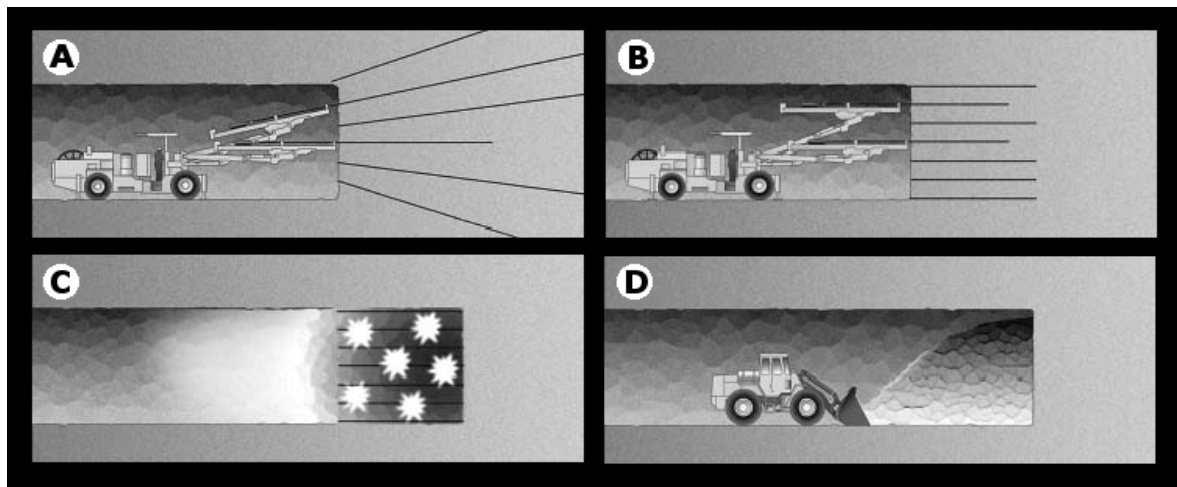
Arbetet med rapporten har delats upp i två delar, en litteraturstudie och en fältundersökning. Litteraturstudien har gjorts på material som behandlar problematik med dräner och utfällningar samt relaterade ämnesområden. Litteraturstudien har i rapporten delats in i kapitel om berg och bergbyggnation, grundvatten och slutligen dräner eftersom detta är den logiska ordningen som leder till problem med vatten i undermarksanläggningar. Kapitlet om berggrundsgeologi är tänkt som en presentation av den berggrund som utgör Sverige samt på vilket sätt berggrunden kan bidra till igensättningsproblem hos dräner. Under grundvatten beskrivs hur vattnet rör sig i berggrunden. Dessutom hur vattnet påverkas på sin väg från markyta till en berganläggning, där det utgör en potentiell orsak till igensättning av dräner. Dränkapitlet beskriver dräners konstruktion förr och idag, samt ger exempel på utveckling av dränkonstruktionen. Dessutom beskrivs de faktorer som orsakar igensatta dräner.

## 3 Bergbyggnation

Det finns olika anledningar att bygga i berg. En anledning är att berget ”står i vägen” vid anläggande av väg eller järnväg. Det kan också vara så att berget är den enda plats som finns tillgänglig, exempelvis inom en stad där alla ytor måste utnyttjas maximalt. I stadsmiljö kan det även vara en fördel att bygga in störande anläggningar, eller lägga delar av infrastrukturen i bergtunnlar, för att skapa en renare och lugnare stadsmiljö. Vad gäller infrastruktur så finns flera fördelar med att använda bergtunnlar, dels behöver inte omkringliggande miljö störa trafiken och kräva skiftande hastigheter, trafikljus etc. Dessutom påverkas trafikförhållanden i tunneln mycket lite av väderförhållanden. Ytterligare ett användningsområde är att bygga förvaringsutrymmen i berg. Den jämna temperaturen i berget över årstiderna är i många fall en fördel. Berg är dessutom fördelaktigt när säkra anläggningar ska uppföras, exempelvis skyddsrum eller centraler som ska inrymma viktig data eller utrustning för kommunikation.

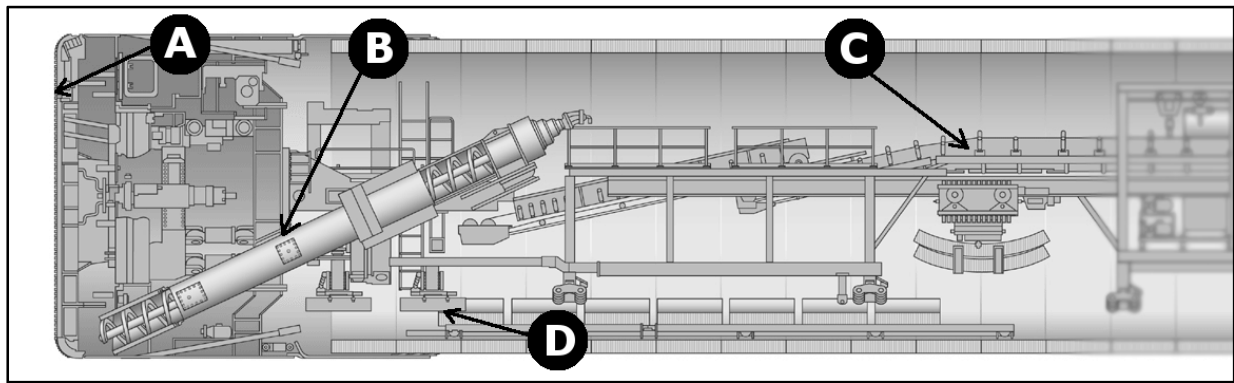
Två vanliga metoder förekommer vid tunnelbyggnation i berg. Dessa är s.k. konventionell drivning genom borrhning och sprängning (figur 3.1), samt fullareaborrning (figur 3.2 och 3.3). Den konventionella drivningsmetoden innebär att tunneln växer fram genom ett antal sprängningsförlopp. Vid varje sprängningsförlopp ökar tunnelns längd med vanligtvis 2-5 meter. Den kortare längden gäller exempelvis när tunneln byggs under bebyggda områden, eftersom svagare sprängladdningar då används. Inför varje ny sprängning borrar ett antal hål för sprängladdningarna. Hålen borrar i ett bestämt mönster beroende på hur

sprängningsförloppet ska förlöpa. Detta bestäms av bl.a. tunnelarea och bergets kvalitet. Längs tunnelns ytterkontur används svagare laddningar än de övriga, eftersom det är viktigt att inte skada den tätningsskärm som bildats genom förinjektering av berget. Det går dock inte att helt undvika sprickbildning i kringliggande berg [Bäckblom et al, 2004].

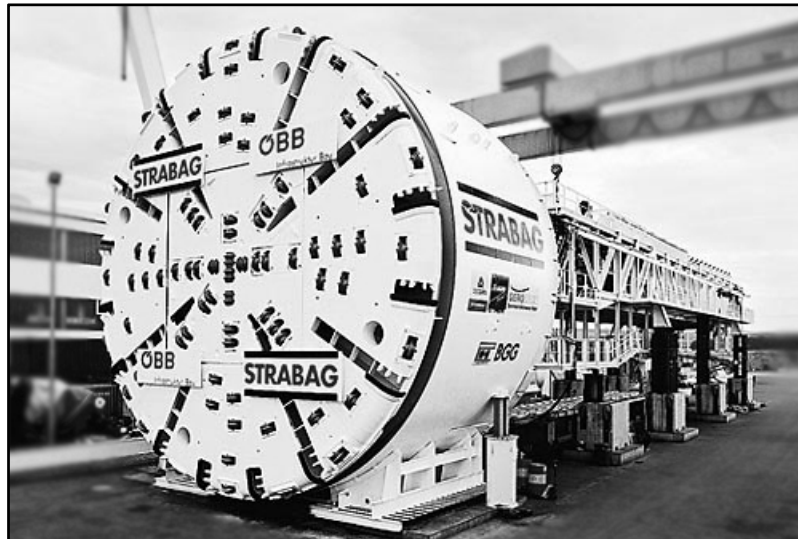


Figur 3.1, Konventionell tunneldrivning delas kortfattat in i följande steg: A) Förinjektering B) Borrning och laddning av spränghål C) Sprängning D) Utlastning och förstärkning av berg [Vägverket, 2005]

Vid fullareaborring borrar tunneln ut i ett steg. Tunnelborrmaskiner (TBM) förekommer med olika borrhåldiameter beroende av tunnelns användningsområde. Tunntunnlar för exempelvis vattenförsörjning kan använda en TBM med omkring en meter i diameter. En TBM för trafik-tunnlar är ofta mellan 9-12 meter i diameter, men måttet kan variera några meter åt båda hållen. Olika typer av TBM förekommer dessutom beroende på det material som tunneln ska drivas i. Om tunneln ska drivas i ett geologiskt material med stor vattenföring byggs den ofta med s.k. lining, vilken hindrar vatten från att tränga in i tunneln. Tack vare detta behöver ingen förinjektering utföras. Jämfört med konventionell drivning blir skadezonen i berget mer begränsad [Bäckblom et al, 2004] och volymen av bergmaterial som tas ut ur berget blir inte större än planerat. Dessutom flyter tunnelbygget på mer kontinuerligt eftersom det inte är uppbyggt av olika arbetssteg som hela tiden måste invänta och avlösa varandra. Nackdelar är att en TBM kräver stor svängradie och därför inte är lika flexibel vid ev. tunnelkrökar, samt att maskinen innebär en stor investeringskostnad. Kostnaden gör att tunneln ofta drivs från endast en front. Konventionell drivning innebär mindre kostnader vid drivning av tunneln från flera fronter, vilket betyder att byggtiden kan minskas relativt enkelt. I Sverige är konventionell drivning den vanligaste metoden.



Figur 3.2, Främre delen av en TBM för trafik tunnlar i vattenförande berg. A) Borrhuvud B) Transportskruv för bergmassor. C) Transportband för bergmassor. D) Segmentmontering (lining) [www.citytunneln.se]

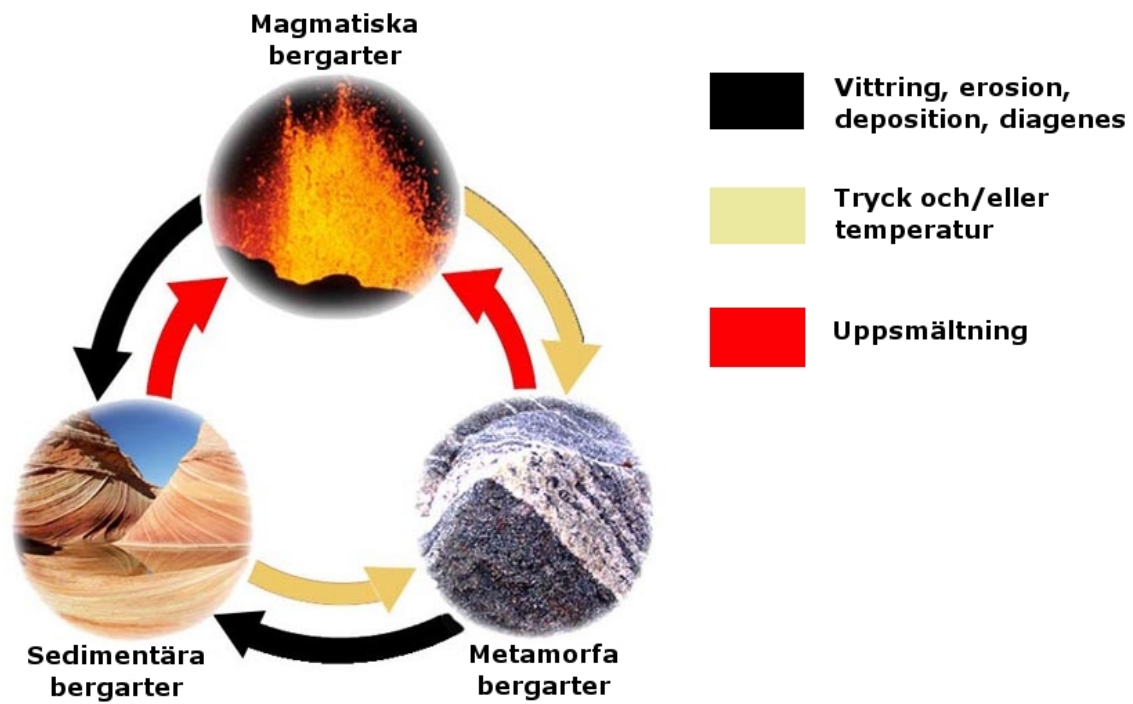


Figur 3.3, Borrhuvud på en TBM för trafik tunnlar. Bakom huvudet följer en mängd funktioner som transportband, kraftförsörjning, utrymme för personal mm. Total längd för en TBM är ofta över 100 meter. [www.herrenknecht.com]

#### 4 Berggrundsgeologi

Det komplexa byggnadsmaterial som berggrunden utgör delas in i tre grupper av bergarter. Indelningen styrs av hur bergarten har bildats och de tre grupperna är magmatiska, sedimentära och metamorfa bergarter. Magmatiska bergarter har bildats genom kristallisation av svalnande magma. Sedimentära bergarter har blivit till genom kompaktion av sedimenterat material, exempelvis sand och lera. Metamorfa bergarter består av redan befintliga bergarter som har omvandlats under höga tryck och/eller temperaturer. De ursprungliga bergarterna kan vara magmatiska, sedimentära eller sådana som redan varit utsatta för metamorfos sedan tidigare. Alla bergarter ingår i det som kallas bergartscykeln (figur 4.1), vilket innebär att de

tillhör ett slutet system på samma sätt som exempelvis vatten gör. En magmatisk bergart bryts ner genom t.ex. vittring och bildar sediment som genom kompaktion (diagenes) blir till sedimentära bergarter. Både magmatiska och sedimentära bergarter kan omvandlas till metamorfa bergarter. Vid tillräckligt hög temperatur bildar bergarterna på nytt en magma som i sin tur kan bilda nya magmatiska bergarter.



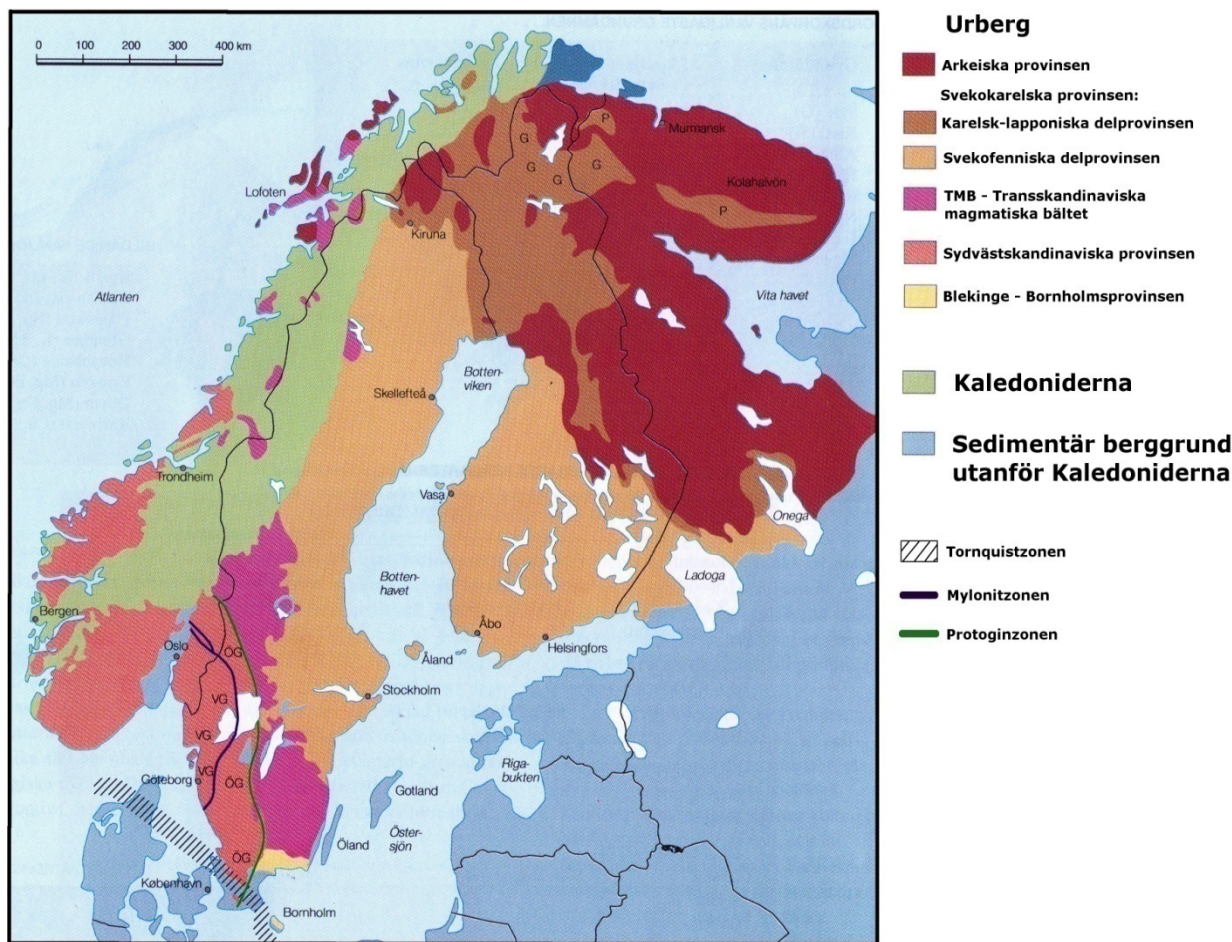
Figur 4.1, Bergartscykeln [www.rocksandminerals4u.com]

Anledningen till att berggrund är ett besvärligt material vid byggnation är att det väldigt sällan är homogent. En bergart är uppbyggd av mineraler, vilka varierar i kornstorlek, form och fördelning i bergarten. Även berggrund som verkar vara relativt homogen kan bestå av partier med plötsligt skiftande sammansättning. Delar av berget kan ha påverkats olika mycket av tidigare deformationer, som exempelvis veckning av berggrunden. Dessutom förekommer korsande gångar av andra bergarter, eller sprickor i både mikro- och makroskala som ändrar bergets egenskaper. Att i planeringsskedet för en byggnation avgöra bergets egenskaper är därför i princip omöjligt.

#### 4.1 Sveriges berggrund

Berggrunden i Sverige har en ålder som varierar från ~2 800 miljoner år (Ma) i de nordligaste delarna av landet till ~60 Ma i delar av Skåne [Lindström et al, 2000; SNA, 2002]. I stora drag kan berggrunden i landet delas upp i de tre enheterna urberg, Kaledoniderna och sedimentär berggrund som ligger utanför Kaledoniderna [SNA, 2002]. Figur 4.2 visar de tre enheterna med underprovinser.





Figur 4.2, Indelning av berggrunden i Sverige med omgivning. [SNA, 2002]

#### 4.1.1 Urberget

Urberget tillhör vad som kallas den Baltiska skölden, eller den Fennoskandiska skölden med ett annat namn. Med sköld menas ett område där berggrund från prekambrisk tid (> 545 Ma) går i dagen och där ingen bergskedjebildning skett under den tid som kallas fanerozoikum (545 Ma – nutid). Den Baltiska skölden har i stort sett utvidgats från nordost mot sydväst genom att ny jordskorpa har bildats i flera omgångar. Beroende på bl.a. ålder delas skölden in i fem olika provinser [Lindström et al, 2000], nämligen den *Arkeiska provinsen*, den *Svekokarelska provinsen*, det *Transskandinaviska magmatiska bältet*, den *Sydvästskandinaviska provinsen* och *Blekinge-Bornholmsprovinsen*. Förutom dessa provinser finns det på spridda platser mindre områden med magmatiska bergarter av alkalin typ samt magmatiska bergarter som bildats under fanerozoikum. På ett antal platser förekommer dessutom impaktstrukturer, vilket är områden som utsatts för nedslag av meteoriter. Beskrivningen av de olika provinserna avser den svenska delen av Baltiska skölden.

**Arkeiska provinsen** har endast en mycket begränsad utbredning i Sverige. Den förekommer som gnejser med ålder på omkring 2 800 Ma i nordligaste Norrland.

**Svekokarelska provinsen** utgör en mycket stor del av Sverige. Den delas in i två delprovinser, vilka är den karelsk-lapponiska och den svekofenniska delprovinsen. Den

karelsk-lapponiska delen är den minsta av de två och finns i Sverige längs den norra och nordöstra landsgränsen. Den består av bergarter som är sedimentära eller vulkaniska och har en ålder mellan 2 500 – 2 000 Ma. Den svekofenniska delen är något yngre med åldrar mellan 2 000 – 1 700 Ma. Bergarterna i denna delprovins utgörs till stor del av äldre granitoider, vilka är delvis migmatitomvandlade (kraftigt deformerade), samt yngre graniter och pegmatiter. I ett brett band mellan Luleå och Sundsvall förekommer gråvackor och lerskiffer, vilka till stor del utsatts för metamorfos. Utom i de mellersta delarna av den svekofenniska berggrunden är sura vulkaniska bergarter vanligt förekommande. Detta gäller exempelvis omkring Kiruna, Malmberget, i Bergslagen och i Skelleftefältet. De sura vulkaniterna är ofta förknippade med malmer av olika slag. En bergart kallas för malm när den innehåller tillräckligt höga halter av mineral för att den ska vara ekonomiskt lönsam att bryta.

**Transskandinaviska magmatiska bältet** förkortas TMB, eller ibland TIB efter dess engelska namn Transscandinavian Igneous Belt. Berggrunden består till största delen av graniter och porfyryer. Graniterna har åldrar mellan 1 800 – 1 650 Ma och porfyryerna är mellan 1 800 – 1 700 Ma gamla. Både äldre (c:a 1 850 Ma) och yngre (c:a 1 400 Ma) graniter förekommer i mindre mängd. I några områden täcks äldre berggrund av senare avsatt sandsten. I Dalarna förekommer t.ex. ett större område med sandsten med en uppskattad ålder av 1 460 – 1 270 Ma [Delin & Thelander, 2007]. Inom denna Dalasandsten finns en stor inlagring av basalt med samma ålder som sandstenen. Denna basalt kallas Öjebasalten.

**Sydvästkandinaviska provinsen** består framför allt av gnejser och berggrundens ålder varierar mellan 1 800 – 900 Ma. Provinsen ligger väster om TMB och gränsen mellan dessa två provinser utgörs av Protoginzonen, vilken är en deformationszon. Sydvästkandinaviska provinsen delas in i det östra och det västra gnejssegmentet. Dessa segment avgränsas av Mylonitzonen, vilket är ytterligare en deformationszon. Det östra segmentet består huvudsakligen av gnejser med djupbergarter som ursprungsmaterial. Det västra segmentet består också till stor del av förgnejsade djupbergarter. Skillnaden från det östra segmentet är att det västra även har en stor andel ytbergarter, vilka visar olika grad av deformation. Två stora enheter av ytbergarter förekommer i det västra gnejssegmentet, Stora Le-Marstrandsbältet i väst och Åmål-Horredbältet som ligger något längre österut. Den yngsta graniten som tillhör det svenska urberget finns i den Sydvästkandinaviska provinsen. Denna granit är Bohusgraniten som har en ålder av 920 Ma [Lindström et al, 2000].

**Blekinge-Bornholmsprovinsen** avgränsas västerut av Protoginzonen och norrut gränsar den mot TMB vid en öst-västlig deformationszon. Berggrunden skiljer sig från den Sydvästkandinaviska provinsen genom att vara mindre deformerad. Bergarterna som förekommer är främst graniter eller granitisk gnejs samt sedimentära och vulkaniska bergarter. Berggrundens ålder varierar mellan 1 800 – 1 400 Ma.

#### 4.1.2 Kaledoniderna

De svenska fjällen är en del av bergskedjan Kaledoniderna. Kaledoniderna bildades under tidsintervallet 510 – 400 Ma genom kollision mellan kontinenterna Baltica och Laurentia. Baltica kallas idag Nordeuropa och Laurentia är dagens Nordamerika och Grönland. Mellan

Baltica och Laurentia låg en ocean som kallas Iapetusocenen. Vid kollisionen slöts Iapetusocenen och Balticas västra kant pressades ner under Laurentia. Avsättningar från oceanbotten samt kontinenternas randzoner sköts in över den Baltiska skölden i form av stora flak, vilka kallas skollor. I dagens Kaledoniderna delas skollorna upp i den *undre*, *mellersta*, *övre* och *översta* skollberggrunden. Dessutom är skollorna uppdelade efter hur långt de transporterades under överskjutningen. Den berggrund som finns under skollorna och som inte har utsatts för någon transport kallas *autokton*. De skollor som transporterats längst tillhör den *alloktona* berggrunden och de som endast transporterats en kortare sträcka kallas *parautoktona*. Skollornas ursprungsläge är mer avlägset desto högre de befinner sig i tektonostratigrafien. Autoktonen utgörs av Baltiska sköldens prekambrika bergarter och yngre sedimentär berggrund. Den undre och mellersta skollberggrunden, samt en del av den övre består av material från randzonen av Baltica. Den andra delen av övre skollberggrunden består liksom den översta skollberggrunden av material från Iapetusocenen. Dessutom innehåller dessa skollor material som antas komma från Laurentia [Lindström et al, 2000]. Figur 4.3 visar Kaledonidernas indelning och uppbyggnad.

**Undre skollberggrunden** består till största delen av sedimentära bergarter som är kraftigt veckade och förskjutna över varandra. Trots deformation av strukturer har bergarterna knappt blivit metamorft påverkade. De huvudsakliga bergarterna är sandsten, kvartsit, gråvacka, kalksten och skiffer. Till viss del har även delar av det underliggande urberget dragits med och utgör en del av denna undre skollberggrund.

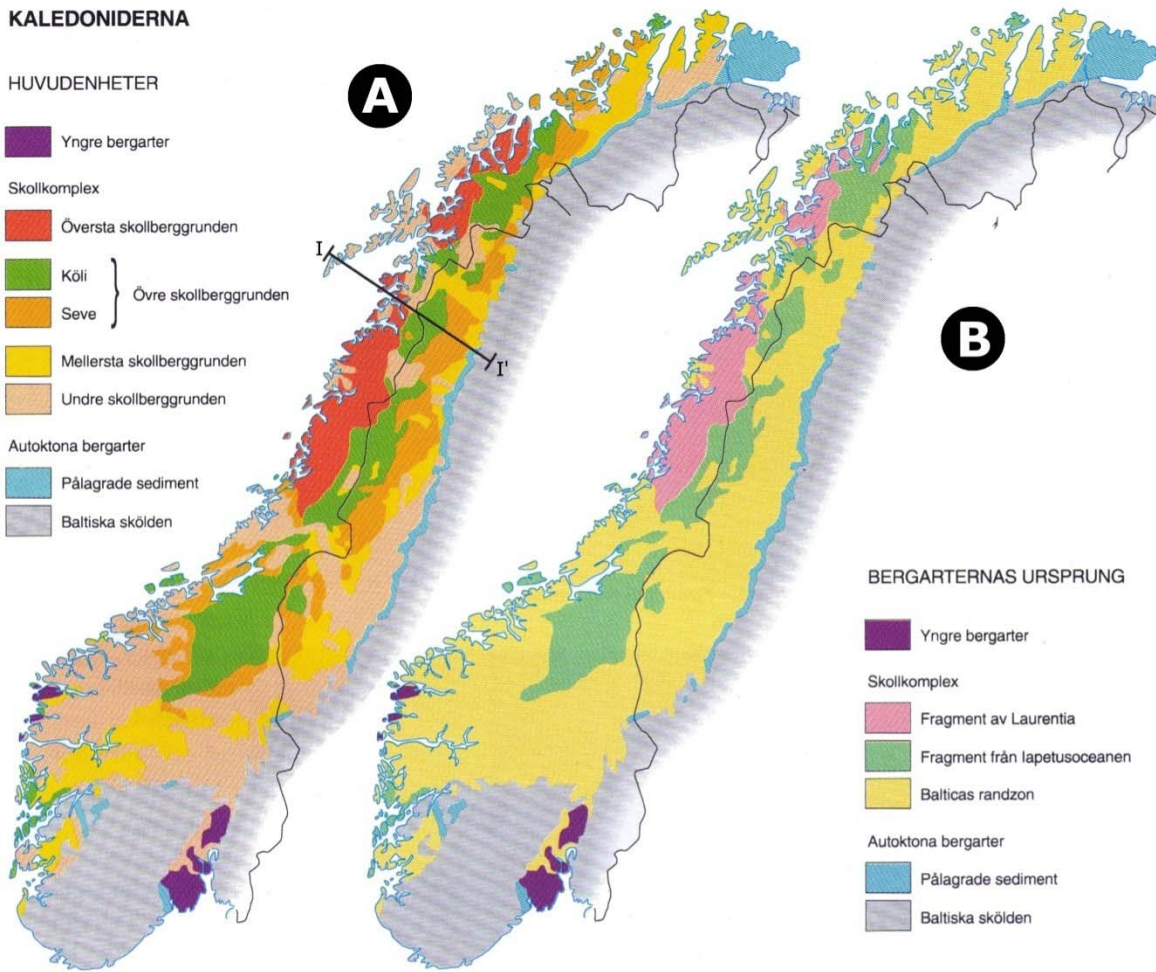
**Mellersta skollberggrunden** är liksom den undre skollberggrunden endast till låg grad påverkad av metamorfos, även om den delvis är mycket kraftigt deformerad. Deformationen har i vissa fall bildat myloniter, vilket är finkorniga bandade eller folierade bergarter som bildats genom mycket omfattande uppkrossning. De förekommande bergarterna i mellersta skollberggrunden är främst kristallin berggrund från prekambrium samt sandstenar och skiffer.

**Övre skollberggrunden** består av Seve- och Köliskollorna. Seve är den undre enheten som huvudsakligen återfinns i den östra delen av de svenska fjällen. Köli är alltså den övre enheten och finns i de västra delarna. Graden av metamorf omvandling är hög i Seve och den består till stor del av bergarter som gnejser och amfiboliter. Många av de högsta delarna i svenska fjällen utgörs av Seve, exempelvis Kebnekaise och Åreskutan. Köli består av sedimentära och vulkaniska bergarter med låg metamorfosgrad. Dessutom förekommer kvartsiter, glimmerskiffer och marmor.

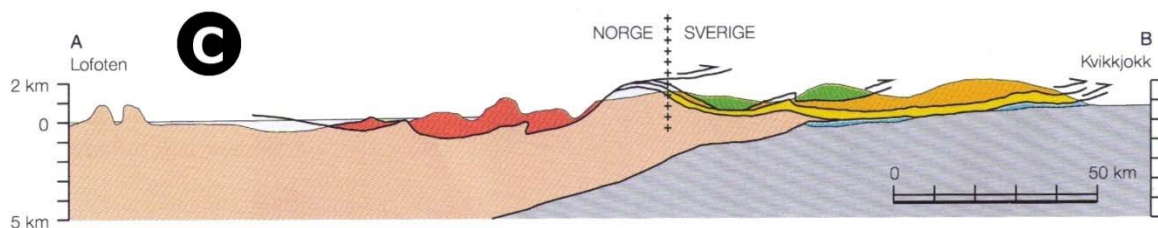
**Översta skollberggrunden** finns i stor omfattning i de norska fjällen men utgör endast en mycket liten del av Sverige. Denna översta skollberggrund innehåller delar av en annan kontinent, vilket troligtvis är Laurentia [SNA, 2002]. Metamorfosgraden är hög och bergarter som förekommer är glimmerskiffer, gnejs och marmor. Dessutom finns graniter, vilka har tillkommit vid något tillfälle när skollberggrunden befunnit sig på stora djup i jordskorpan.

## KALEDONIDERNA

### HUVUDENHETER



### BERGARTERNAS URSPRUNG



Figur 4.3, Kaledoniderna. A) Berggrundens indelning. B) Berggrundens ursprung. C) Profil mellan I och I' i (A). [SNA, 2002]

### 4.1.3 Sedimentär berggrund utanför Kaledoniderna

Av Sveriges ytberggrund utgörs en mindre del av sedimentära bergarter (se figur 4.2). Dessa har avsatts både under prekambrium och i fanerozoikum och bergarterna är skiffer, sandsten och kalksten. Större delen av den sedimentära berggrunden är fossilförande, vilket betyder att den innehåller lämningar av levande organismer. Vid datering av bergarter är bestämning av fossiltyper en viktig del, eftersom många av dem levt under bestämda tidsintervall. Största mäktigheter har Sveriges sedimentära berggrund i Skåne samt på Öland och Gotland.



## 4.2 Järn & mangan i berggrunden

De utfällningar som bildas och sätter igen dräner är vanligtvis baserade på järn och/eller mangan. Berggrunden utgör en viktig källa för dessa utfällningar, eftersom ämnen i berggrunden avges till grundvattnet som i sin tur transporterar dem till dränerna. Viktiga faktorer för att järn och mangan ska lösas i grundvattnet är dock pH och Eh (se kapitel 5.2 om grundvattenkemi), vilket betyder att järn eller mangan i berggrunden inte nödvändigtvis leder till igensättningsproblem hos dräner. Förutom järn och mangan är många utfällningar baserade på kalcium. Kalcium är det femte vanligaste grundämnet i jordens skorpa [Nesse, 2000], men i injekterade tunnlar har det huvudsakligen sitt ursprung från injekteringsbruket.

**Järn** är det fjärde vanligaste grundämnet i jordskorpan med en viktprocent av mellan 4-5 % [Lindblad-Påsse, 1986; Faure, 1998; Nesse, 2000]. Ett stort antal mineral innehåller järn och i princip finns järn i alla bergarter. Bortsett från järnmalmer finns de högsta järnhalterna i basiska bergarter som t.ex. diabas och amfibolit. I något lägre halter finns järn dessutom i exempelvis granit och det kan även förekomma i kalksten som förorening. Järnhaltiga mineral är t.ex. magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) och olivin ( $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ ). Vid tunneldrivning i berg kan gångar av exempelvis diabas innebära att risken för järnutfällningar ökar om grundvatten transporteras genom sprickor i diabasen.

**Mangan** förekommer som det 12:e vanligaste grundämnet i jordskorpan [www.slu.se; Bazylnski & Frankel, 2003]. Jämfört med järn säger ett ungefärligt värde att järnhalten är 3-5 gånger högre än manganhalten [Faure, 1998]. Mineral som innehåller höga halter mangan är t.ex. manganit ( $\text{MnO}(\text{OH})$ ) och pyrolusit ( $\text{MnO}_2$ ). Små mängder mangan förekommer i exempelvis järn-magnesium mineral som magnetit, biotit, olivin och pyroxen. I de enskilda mineralen är manganets andel låg, men förekomsten av dessa mineral är så utbredd att den sammanlagda manganhalten blir betydande. I dessa mineral är vissa platser i kristallstrukturen som normalt innehåller järn eller magnesium ersatta av mangan. Detta betyder att järn och mangan ofta förekommer tillsammans och därför tillförs grundvattnet samtidigt, även om manganhalten blir lägre än järnhalten.

## 4.3 Tektonik

Tektonik behandlar hur strukturer i jordskorpan har bildats och bildas än idag. Sprickor och veckbildningar i berggrunden är exempel på tektonik. Vid byggandet av bergtunnlar bildas en del sprickor i samband med sprängningsarbeten, men den största delen sprickor i berg beror på krafter som verkar på berget. Jordskorpan är uppdelad i ett antal plattor som långsamt men säkert rör på sig. Eftersom dessa plattor rör sig olika mycket och i olika riktningar relativt varandra så uppstår drag-, tryck- och skjivspänningar i berggrunden. Dessa spänningar orsakar bl.a. sprickor och krosszoner. Förutom krafter orsakade av plattrörelser så uppstår spänningar i berggrunden bl.a. om ovanliggande berg eroderas, vilket alltså minskar trycket ovanifrån. Trycket kan även öka om istället deposition av material sker. När sprickor och krosszoner har bildats så fungerar de som transportvägar för grundvattnet. På sin väg genom berggrunden orsakar vattnet vittring av de mineral som vattnet kommer i kontakt med.

Krosszoner innebär att vattnet får en större yta att röra sig genom än i en enskild spricka, vilket leder till större mängd vittringsmaterial.

## **5 Grundvatten**

Grundvatten bildas genom att ytvatten infiltrerar marken och fyller porer och sprickor hos jordarter och berggrund. Vattnets egenskaper beror till största delen på vilka förhållanden som gäller där det bildas, men även dess uppehållstid i marken och hur långt det har strömmat. Omsättningshastigheten hos grundvatten styrs av topografin och det geologiska material som vattnet rör sig genom. Mark med hög permeabilitet leder till höga grundvattenhastigheter och låg permeabilitet till låga hastigheter. När grundvattenhastigheten är låg och vattnet transporteras lång väg hinner vattnets pH att stiga från att ofta vara surt vid infiltrationen av marken till att vara neutralt eller t.o.m. basiskt i slutändan. Porositeten i marken styr hur mycket grundvattenytan skiftar i höjd. Låg porositet leder till mindre utrymme för vattnet och därför varierar grundvattennivån mer än hos mark med hög porositet. Med varierande nivåer hos grundvattenytan följer att miljön blir omväxlande oxiderande och reducerande.

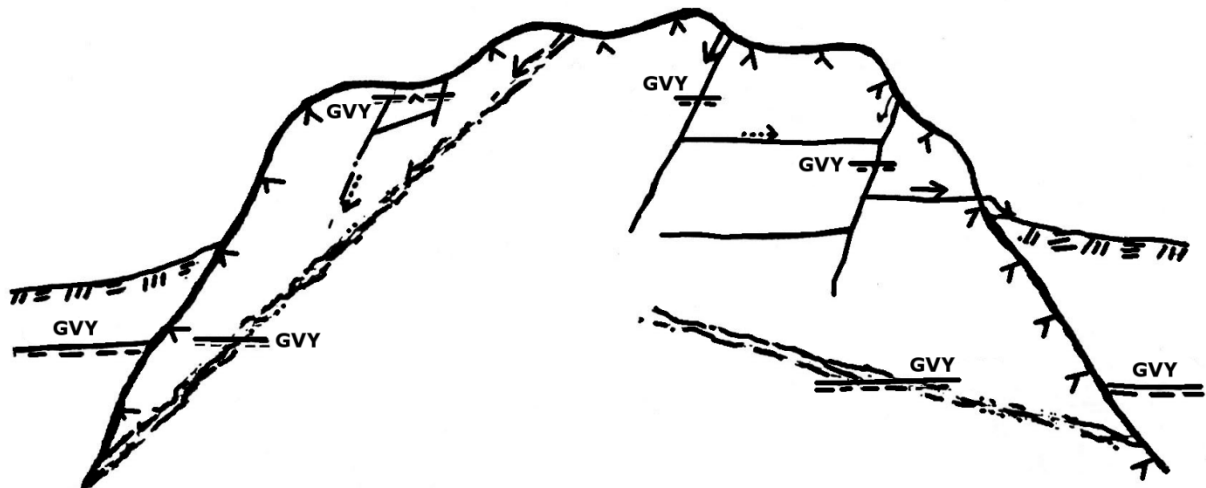
### **5.1 Grundvatten i berg**

Vattenföringen hos olika bergarter skiljer sig stort. I intakt urberg är vattenföringen mycket låg, medan den hos viss sedimentär berggrund, särskilt sandsten, är betydligt högre. Eftersom berggrunden sällan är helt intakt är det dock andra faktorer som styr. Det som avgör vattenföringen är berggrundens sammanlagda volym av hålrum som finns tillgänglig för vattentransport. Porositet beskriver mängden hålrum och kan anges som a) primär, b) kinematisk eller c) sekundär porositet. Primär porositet kallas även total porositet och är volymen av alla typer av hålrum. I t.ex. granit kan den primära porositeten vara flera procent, varav en stor del är mikroskopiska hålrum som är vätskefyllda. Dessa bidrar inte till att öka vattenföringen, eftersom de utgör hydrologiskt slutna system [KASAM, 2001]. Den kinematiska porositeten kallas även effektiv porositet och anger mängden hålrum som bidrar till grundvattenflödet. Den effektiva porositeten kan variera stort, men vanligtvis är den låg i kristallin berggrund. I Sverige uppskattas den effektiva porositeten vara mellan 0,0001 – 0,1 % [KASAM, 2001]. I sedimentär berggrund är den effektiva porositeten upp till 50 gånger högre än för kristallin berggrund [von Brömssen et al, 2007]. Sekundär porositet är den volym i berget som utgörs av sprickor. Den varierar mycket beroende på vad berggrunden utsatts för tektoniskt och bidrar inte alltid till grundvattenflödet eftersom sprickorna kan vara osammanhängande.

Berggrundens porositet kan öka genom vittring. I Sverige är vittringszonen oftast mycket tunn eller obefintlig. Detta är ett resultat av den ur geologiskt tidsperspektiv nyligen avslutade nedisningen av landet, vilken eroderade bort merparten av vittrad berggrund. Det förekommer dock vittrat berg i sprickzoner och i delar av landskapet som är skyddade från erosion.

I sedimentär berggrund kan grundvattenytan vara sammanhängande över större områden, vilket inte gäller för kristallin berggrund. Eftersom grundvattnet i kristallin berggrund huvudsakligen förekommer i sprickor och dessa bildar ett stort antal avskilda spricksystem,

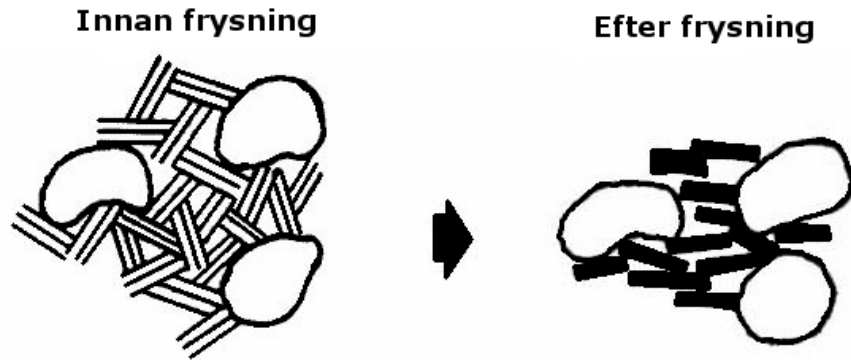
kommer varje spricksystem att ha en specifik grundvattenyta [KASAM, 2001; Andrén, 2006] (figur 5.1). Skillnader finns mellan olika bergarter, exempelvis har sprickorna i granit ofta olika riktningar och är sammanbundna, medan gnejser ofta har sprickor i en enda riktning vilka då inte är sammanbundna. Undantag från detta förekommer t.ex. i sprick- och krosszoner där större sammanbundna system bildas.



Figur 5.1, Flera grundvattenytor (GVY) i kristallin berggrund. [Andrén, 2006]

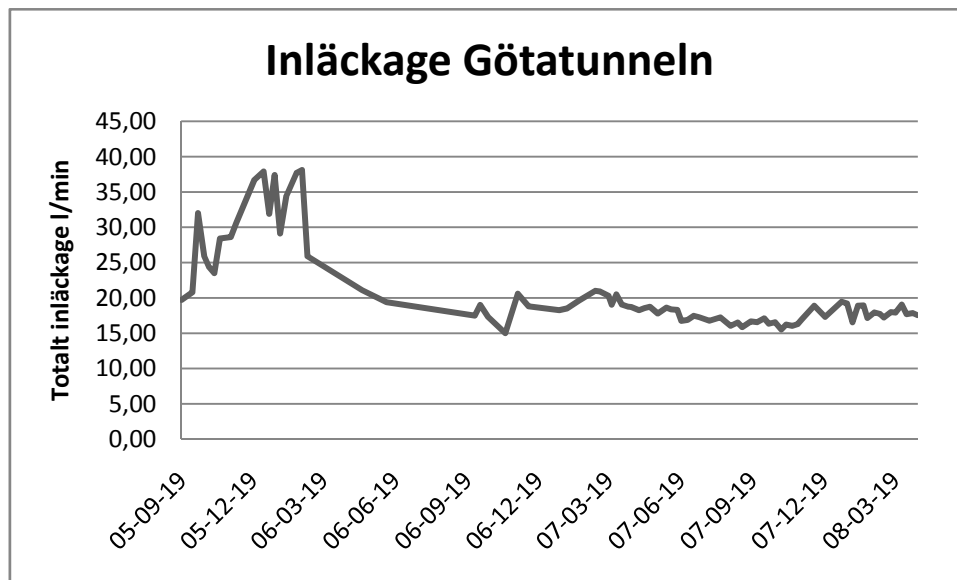
Anläggandet av en bergtunnel påverkar vattnets flöde på olika sätt. Bergtuttaget orsakar exempelvis spänningsomlagringar i berget. Detta kan i sin tur öka den axiella konduktiviteten upp till tio gånger, samtidigt som den radiella konduktiviteten istället minskar fem gånger [Hargelius, 2006]. Det vanliga fenomenet att vattenläckage flyttar sig i tunnlar kan delvis förklaras av dessa spänningsomlagringar. Om klimatet tillåter kommer även delar av berggrunden som gränsar till tunneln att utsättas för frostgrader. Att berget fryser kan påverka vattenflödet genom frostsprängning, vilket utökar de befintliga sprickorna. Dels ökar vattnet sin volym med 9 % vid frysning [Andrén, 2006], vilket är en anledning till frostsprängning. Dessutom transporteras vatten till frysfronten av kapillärkrafter [Andrén, 2006], vilket leder till större mängd vatten som kan frysa. Det leder i sin tur till att isen bildar ett högre tryck i berget och utgör ytterligare en orsak till frostsprängning. Förutom dessa två orsaker spelar bergets mättnadsgrad roll för hur stor uppsprickning som sker. Om mättnadsgraden är hög betyder det att berget har mindre ledig porvolym som kan ta upp volymökningen hos isen.

Sprickor eller zoner i berget som innehåller lera kan också påverkas av frysperioder. När leran fryser kan dess struktur ändras genom att lerpartiklarna omorienteras (figur 5.2). Leran kompakteras då och sprickor bildas i leran, vilket kan leda till högre vattenflöde och därmed ökat inläckage i tunneln [Andrén, 2006].



Figur 5.2, Omorientering av lerpartiklar genom omväxlande frysning och upptining. [Andrén, 2006]

Det finns även faktorer som minskar grundvattenflödet i berg. I sprickor och porer fastnar små partiklar, bakterier och kolloider (mycket små, finfördelade partiklar), vilket leder till att storleken hos sprickor och kanaler minskar med tiden [Lindblad-Påsse, 1986]. Dessutom sker sprickmineralisering av t.ex. klorit eller calcit [SKB, 2004], vilket också leder till att vattnets flödesvägar sätts igen. Minskat inläckage med tiden har observerats i flera tunnlar. Ett exempel är Götatunneln i Göteborg. I Götatunneln har inläckande vatten mätts i stort sett varje vecka med start under byggskedet. Mätvärden över totalt inläckage i tunneln finns tillgängliga för en period av 2,5 år (september 2005 och framåt). Fram t.o.m. början av 2006 utfördes injekteringsarbeten i tunneln vilket ledde till kraftigt minskat inläckage. Variationer i nederbörd spelar dessutom in, men mängden inläckande vatten har ändå en minskande trend även efter injekteringsarbetena avslutades, vilket figur 5.3 visar.



Figur 5.3, Minskande trend hos inläckande vatten i Götatunneln. Mätvärden från Tyréns.



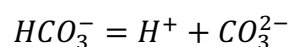
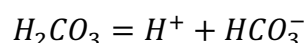
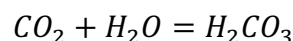
## 5.2 Grundvattenkemi

Igensättningsproblem hos dräner orsakas ofta av utfällningar som är baserade på järn, mangan, eller kalcium [Lindblad-Påsse, 1986]. För att utfällningar ska kunna bildas krävs det att järn, mangan eller kalcium finns löst i grundvattnet. Detta uppnås genom att ämnena frigörs direkt från berggrunden eller från vittringsprodukter i de jordarter som vattnet passerar igenom. Järn tillförs dessutom grundvattnet i märkbara mängder genom atmosfäriskt nedfall [Andersson, 1991]. I anslutning till injekterade tunnlår tillförs grundvattnet stora mängder kalcium från injekteringsbruket.

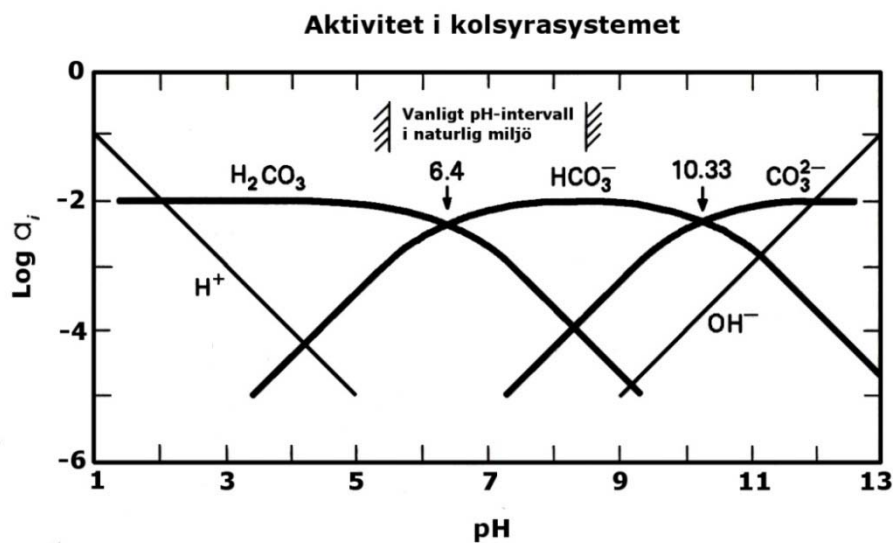
Vatten är p.g.a. sin molekylstruktur ett effektivt lösningsmedel för olika jonföreningar. Detta innebär att grundvatten som rör sig genom marken orsakar kemisk vittring av mineraler. Andra viktiga egenskaper som påverkar vittringen är vattnets pH och redoxpotential (Eh). En sänkning av vattnets pH betyder att mängden fria vätejoner ( $H^+$ ) ökar, vilket påverkar flera reaktioner. Vätejoner medverkar exempelvis vid hydrolys och redoxreaktioner, vilka frigör joner i fasta föreningar som då tillförs grundvattnet. Redoxreaktioner innebär att ett utbyte av elektroner sker mellan ämnen. Det ämne som ger ifrån sig elektroner oxideras och det ämne som tar upp elektroner reduceras. Redoxpotentialen mäts i mV och anger hur stora förutsättningarna är att oxidation eller reduktion ska ske. Syrerikt vatten har högt Eh och oxiderande förhållanden. I syrefattigt vatten är Eh lågt och förhållandena är reducerande. Redoxreaktioner påverkar ofta pH i marken. Exempelvis leder oxidation av sulfidhaltiga jordar till bildandet av försurande sulfater. Flera typer av bakterier som lever i grundvatten kan katalysera redoxreaktioner. Det finns bakterier som livnär sig på att reducera exempelvis  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$  och  $SO_4^{2-}$  medan andra bakterier istället oxiderar dessa joner [Ambrosi et al, 2001].

Hydrolys leder till att mineral omvandlas till andra mineral samtidigt som joner frigörs till grundvattnet. Hydrolys förändrar mineralens yta genom att t.ex. Ca, K, Na, Fe försvinner, men mineralens kärna förblir oförändrad. Ytan kan täckas av lermineral, vilket minskar hastigheten på den fortsatta vittringen. Hydrolys är som effektivast vid hög temperatur, lågt pH och låg redoxpotential.

Vid nedbrytning av organiskt material i marken bildas koldioxid ( $CO_2$ ), vilken kan lösas i grundvatten och då ingår i det s.k. kolsyrasystemet [Drever, 1997; Mossmark, In press]. Koldioxiden som löses i vattnet bildar kolsyra ( $H_2CO_3$ ), vilken i sin tur delar upp sig i väte ( $H^+$ ) och bikarbonatjoner ( $HCO_3^-$ ). En annan vanlig benämning på bikarbonat är vätekarbonat. Även bikarbonat delar upp sig, nämligen i väte och karbonatjoner ( $CO_3^{2-}$ ). Reaktionerna sker enligt:

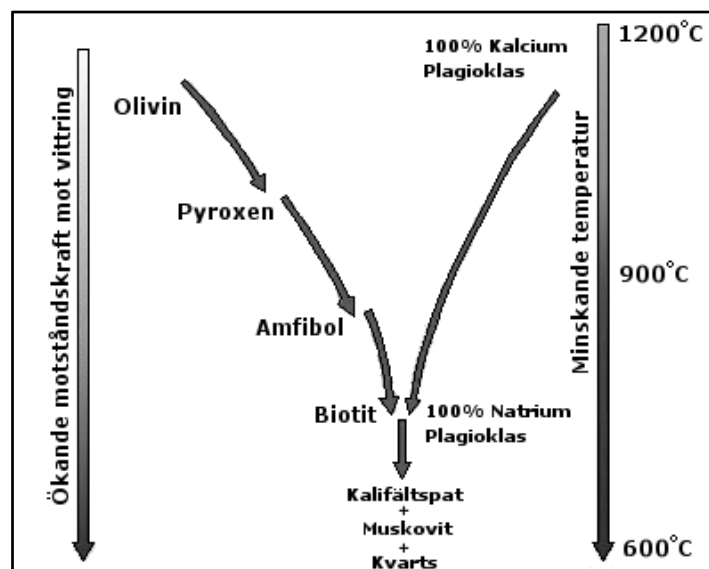


Hur stor andel varje komponent utgör bestäms av vattnets pH-värde. Figur 5.4 visar fördelningen vid olika pH. Kolsyra påskyndar vattnets förmåga till kemisk vittring, särskilt kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ) löses upp av kolsyra.



Figur 5.4, Fördelning av komponenter i kolsyrasystemet vid  $25^\circ\text{C}$ . [Drever, 1997]

När bergarter bildas befinner de sig i jämvikt med den miljö som omger dem. Med tiden ändras bl.a. temperatur och tryckförhållanden vilket betyder att bergarterna inte längre är i jämvikt. Eftersom olika bergarter bildas vid olika förhållanden betyder det också att de befinner sig i olika jämviktslägen. Större skillnad mellan bildningsmiljö och dagens förhållanden leder till ökad vittringsförmåga. En uppskattning av bergarters vittringsbenägenhet kan göras genom att bestämma de ingående mineralen. Silikatmineral är de vanligast förekommande mineralen i jordskorpan. Bowens reaktionsserie (figur 5.5) visar vid vilken temperatur ett antal silikatmineral kristalliserar ur en svalnande magma. De mineral som kristalliserar först är också mest benägna att vittra.

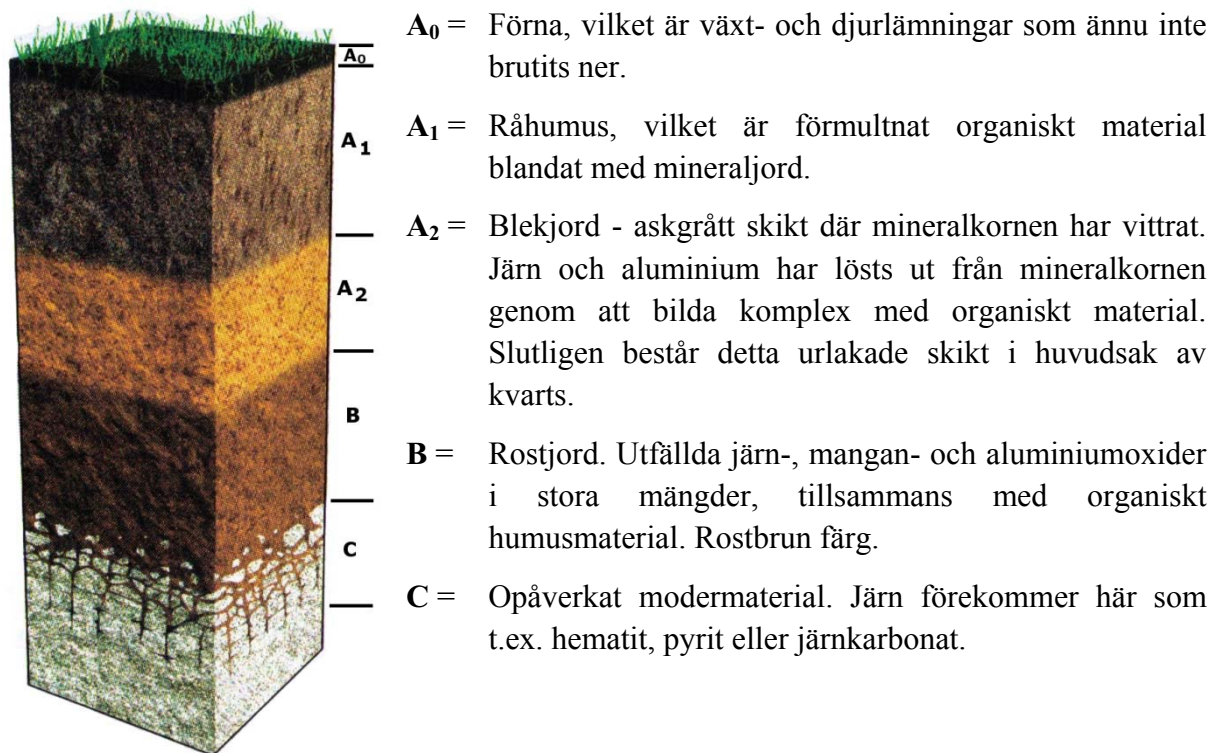


Figur 5.5, Bowens reaktionsserie. Modifierad från [http://imnh.isu.edu].

Mängden av ett mineral som går i lösning beror på hur lång tid mineral och vatten är i kontakt med varandra samt hur stor area som är i kontakt med vatten. Med större djup följer att vattnets flödes hastighet minskar, vilket leder till längre kontakttid mellan vatten och berg. Detta leder i sin tur till större mängd jonföreningar som går i lösning. Däremot innebär låga vattenflöden att det tar längre tid för de vittrade ämnena att transporteras bort, vilket kan hämma fortsatt vittring. De joner som är vanligast förekommande i grundvatten är  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  och  $\text{CO}_3^{2-}$  [Fetter, 2001].

Järn i löst form förekommer främst som  $\text{Fe}^{2+}$ . Endast i sura lösningar ( $\text{pH} < 4,8$ ) förekommer det som  $\text{Fe}^{3+}$ . Vid låg kolsyrehalt kan järnet även förekomma som t.ex.  $\text{FeOH}^+$  och om sulfathalten är hög som  $\text{FeSO}_4$ . Mangan förekommer oftast i lägre koncentrationer än järn och i löst form vanligtvis som  $\text{Mn}^{2+}$  och  $\text{Mn}^{4+}$ . I syresatta vatten dominerar  $\text{Mn}^{4+}$  och i syrefattiga vatten dominerar  $\text{Mn}^{2+}$ . Kalcium i jonform förekommer vanligtvis som  $\text{Ca}^{2+}$  eller  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ .

Grundvatten transporteras ner i marken från markytan och påverkas på vägen. Den vanligaste jordmånen i Sverige är podsolen, vilken innehåller mycket järn. Podsolens stora utbredning leder till att den påverkar en stor del av grundvattnet. Podsol är uppbyggd av följande horisonter, uppifrån och ner:



Figur 5.6, Podsol [Marshak, 2001]

När grundvattennivån befinner sig i C-horisonten kan syre diffundera ner i marken från atmosfären och koldioxid kan i sin tur avges från marken till atmosfären. Om grundvattnet stiger upp i B-horisonten minskar syrets diffusionshastighet kraftigt i denna horisont. Samtidigt förbrukas vattnets syreinhåll snabbt vid nedbrytning av organiskt material och reducerande förhållanden uppstår. Detta leder till att järn och mangan som fällt ut i

horisonten går i lösning som  $\text{Fe}^{2+}$  och  $\text{Mn}^{2+}$ . Även koldioxiden som bildas löses i vattnet och bildar kolsyra.

I tunnlar används bl.a. förstärkningsbultar av stål. Bultarna kan i vissa fall ge grundvattnet ett tillskott av järn. Faktorer som påverkar ev. korrosion av stålmaterial är hur aggressivt grundvattnet är, samt hur väl korrosionsskyddade bultarna är [Mossmark, In press]. Även en väl utförd ingjutning av förstärkningsbultar kan vara otillräcklig vid exempelvis rörelser i berget, vilka kan leda till att delar av bultarna blottläggs. Om bultarna inte har något kompletterande rostskydd i form av ytbeläggning eller består av rostfritt stål av god kvalitet, kan korrosion ske [Mossmark, In press].

Koncentrationen av ämnen i grundvatten styrs av tillgången på mineral i de jord- och berglager som vattnet strömmar genom. Dessutom påverkas koncentrationen av mineralens löslighet och av hastigheten hos de kemiska processerna.

## 6 Dräner

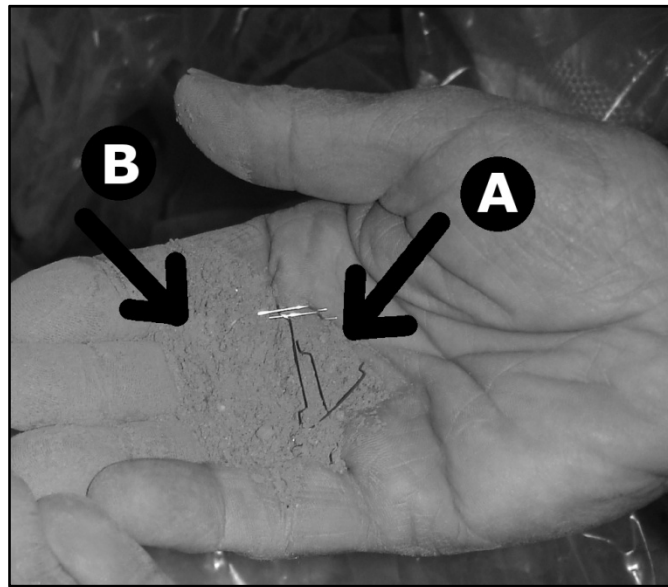
Vanligtvis utförs förinjektering av bergtunnlar innan de sprängs ut (se figur 1.1 och 3.1). I de fall större läckage fortfarande förekommer efter att tunneln har tagits upp utförs efterinjektering. Om ytterligare läckage kvarstår efter att injekteringsarbetet är slutfört, vilket oftast är fallet, hanteras detta med någon form av dränerande konstruktion. Dessa varierar beroende på tunnelns egenskaper och användningsområde. I varma tunnlar, d.v.s. där temperaturen aldrig når ner till minusgrader, kan det räcka med skärmar som leder vattenläckaget till tunnelns botten. I tunnlar som utsätts för frost måste läckaget dessutom isoleras mot kylan för att undvika isbildning. Med drän menas vanligtvis den konstruktion som mer eller mindre följer bergets kontur. Allra vanligast är att en vattentät matta placeras närmast berget och fungerar både som isolering och leder vattnet ner i tunnelsulan. Mattan täcks sedan med sprutbetong, vilken fungerar som ett mekaniskt skydd för dräner. Dessutom fungerar den som brandskydd, eftersom dränmattorna tillverkas av brandfarliga material. Åldringsprocessen hos dräner innehåller ett antal faktorer. Dessa är a) igensättning, b) fysiska skador på dräner och c) bristande funktion hos infästningar, vilka påfrestas av trafiklasten. Fokus i denna rapport ligger på igensättning.

### 6.1 Konstruktion

Fram till omkring 1980 [Hargelius, 2006] bestod dräner huvudsakligen av inplastad mineralull som ytterst förstärktes med stålnät. Mineralullen fungerade som isolering, plasten som tätskikt och stålnätet som skydd mot trafiklast och för att stadga upp dräner. Dränens bredd var oftast c:a 30 cm och dräner följde den läckande sprickan oavsett om den var orienterad horisontellt eller vertikalt. Infästningen i berget utfördes med ingjutna bultar och dränkonstruktionen utfördes både insprutad och ej insprutad.

Runt 1980 började dräner utföras med mattor av cellplast, vanligtvis polyeten, vilka fungerar både som isolering och tätskikt. Mattorna är brandfarliga och täcks därför med sprutbetong, utom i vissa fall där räddningstjänsten gett dispens. Betongen fungerar även som ett mekaniskt skydd för dräner. Infästningen av dräner i berget görs med expanderbult eller

ingjutna bultar. Trafik som passerar dräner belastar dem genom att tryck- och suglaster uppstår. Dessa laster behöver tas upp av dränerna och överförs till berget. Dräner förstärks med armering och kan på så vis ta upp laster. Överföringen av laster till berget sker antingen genom den vidhäftning som uppstår längs dränens kanter mellan sprutbetongen och berget. I dessa fall används de klenare expanderbultarna för infästning. Om inte vidhäftningen räcker till används de kraftigare ingjutna bultarna för infästning och överföring av lasterna. Armeringen utförs antingen med nät som monteras utanpå dränmattan med en viss distans till mattan. Nätet täcks sedan med sprutbetong och blir på så sätt ingjuten i betongen. En annan typ av armering sker genom att sprutbetongen blandas med fibrer (figur 6.1) som kan vara tillverkade av stål eller plast. Fiberlängden varierar från c:a 5 mm till omkring 40 mm och utformningen av fibrerna skiljer sig något. Poängen med fiberarmering är att den fördelar spänningar i betongen över en större yta. Detta motverkar bildandet av större sprickor i betongen, vilket lättare uppstår med nätarmerad betong.



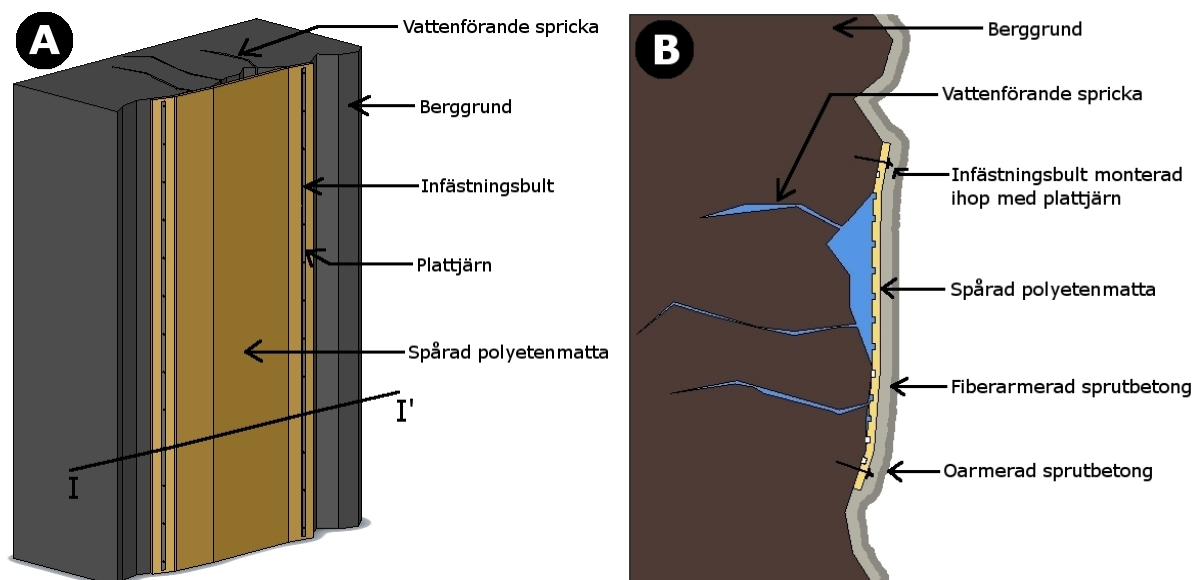
Figur 6.1, Torrvara för fiberarmerad sprutbetong. A) Stålfibrer B) Cementbruk

Den fiberarmerade sprutbetongen används när dränlaster ska överföras genom vidhäftning till berget, men är även att föredra i övriga fall. Utanpå det fiberarmerade betongskiktet sprutas ofta ett tunnare lager med oarmerad sprutbetong. Detta lager är tänkt som ett skydd mot skrap- och sticksador längs exempelvis utrymningsvägar där människor kan tänkas röra sig. Det fungerar dessutom som korrosionsskydd för stålfibrer, även om detta inte anses vara nödvändigt för betongens beständighet [Vägverket, 2004]. Mellan berget och dränmattan används ibland vertikalt monterade distansrör för att öka det utrymme som vatten kan röra sig i. Om igensättningsrisken p.g.a. utfällningar är stor används distansrör med anslutningar som nås utifrån den färdigmonterade dränkonstruktionen. Rören används för att spola bort utfällningar med högtryckstvätt, men oftast har spolningen begränsad effekt på de utfällningar som finns utanför själva röret. Istället för att använda distansrör bakom dränmattan kan bakbrickor hålla mattan på bestämt avstånd från berget. Bakbrickorna utgör egentligen en del av tätningen för bultgenomföringen i mattan, men om bergytan är väldigt ojämn gör de också

att mattan kan monteras utan att böjas alltför mycket. En annan lösning är att montera dränmattorna på ett skelett av armeringsjärn på ett visst avstånd till bergväggen [Vägverket, 2001]. Bultarna bör sitta relativt tätt för att ge stöd åt mattan.

Ett flertal liknande dränkonstruktioner förekommer, vilka kan kombineras till en passande utformning. Enligt Vägverket [Fredriksson et al, 1996] är den enklaste dränen ur monteringsynpunkt utformad enligt följande:

Polyetenmattan är 50 mm tjock och den sida av mattan som vänds mot berget är utformad med vertikala spår som ska leda vattnet nedåt. Tanken med detta är att vattnet ska hindras från att läcka ut längs dränens vertikala kanter. Dränkonstruktionen kan utföras med olika bredd, där flera mattor skarvas ihop vid behov. Om konstruktionen är under två meter bred görs infästningen i berget med expanderbult av dimensionen 8x165 mm, samt plattjärn som fästs tillsammans med bultarna. Plattjärnen är 4 mm tjocka, 40 mm breda och längden varierar beroende på dränkonstruktionens höjd. Bultar och plattjärn monteras längs dränens vertikala kanter, c:a 10 cm från mattkanten. Plattjärnens funktion är att pressa mattan mot berget och de dimensioneras för att kunna bockas för hand så att de följer bergkonturen. Avståndet mellan bultarna är omkring 400 mm och de bör monteras i lågpunkter om det är möjligt. Anledningen till detta är att plattjärnen ska pressa mattan så bra som möjligt mot berget. Dränmattan täcks med 40 mm fiberarmerad sprutbetong och 20 mm oarmerad sprutbetong. Vid bredare dränkonstruktioner än c:a 2 m används kraftigare ingjutna bultar med diametern 12 mm och längden minimum 400 mm. Dessa kraftiga bultar monteras i ett nätmönster med inbördes avstånd av max 1200 mm. Sprutbetongens främsta uppgift är att fungera som brandskydd och som mekaniskt skydd för dränen, men har även en förstärkande effekt. Om det finns risk för igensättning av dränen så kombineras den med ett spolrör. Figur 6.2 visar uppbyggnaden av en drän.

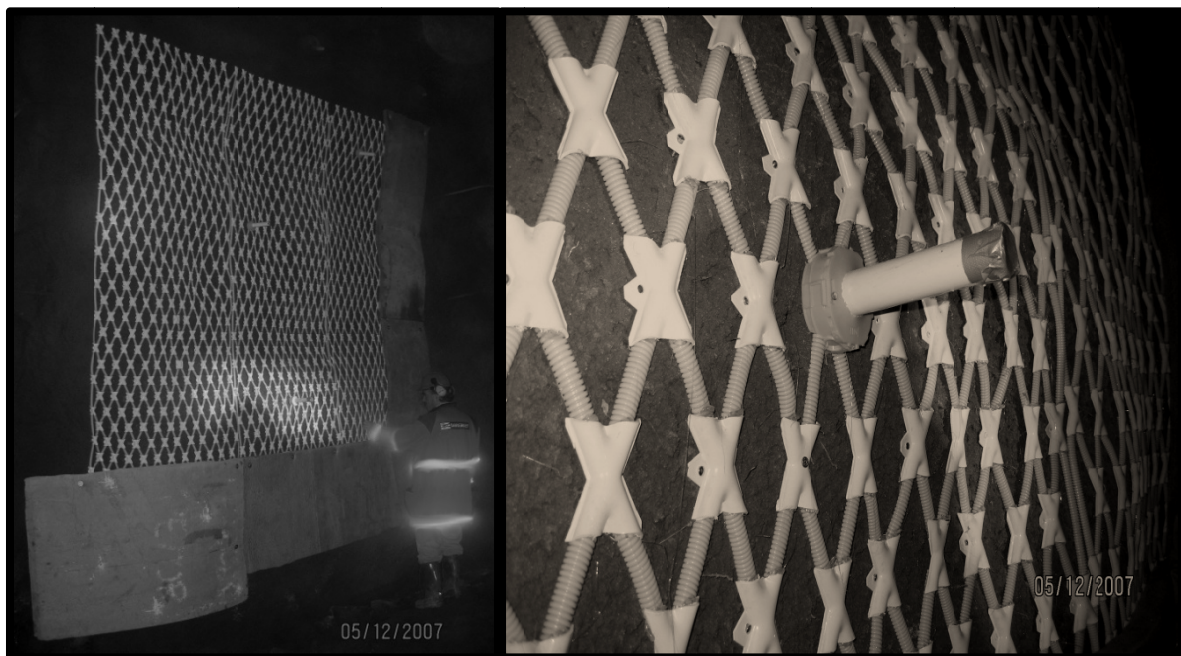


Figur 6.2, Typisk dränkonstruktion. A) Polyetenmatta monterad över vattenförande sprickor. Utanpå mattan tillkommer sprutbetong, vilken inte visas i figuren. B) Horisontalsnitt I-I' i (A), men dessutom med sprutbetong.



Dränmattor tillverkas som sagt av cellplast. Cellplast produceras genom att tillsätta blåsmedel i plastmassan, som expanderar senare i processen när det omgivande trycket sjunker. Denna typ av cellplast kallas just expanderad. Extruderad cellplast trycks under högt tryck genom ett munstycke innan den tillåts att expandera. Metoden ger bättre kontroll över produktens form och till viss del cellstruktur än om plasten får expandera under friare förhållanden [Miljösamverkan Älvsborg, 1997; www.dow.com; www.polybase.se]. Eftersom dränmattan ska utgöra ett tätskikt så är det viktigt att dess cellstruktur är sluten. Materialen som används till dränmattor är polyeten (PE) som är en delkristallin plast, eller polystyren (PS) som är en amorf plast. Om polystyrenplasten är extruderad kallas den XPS.

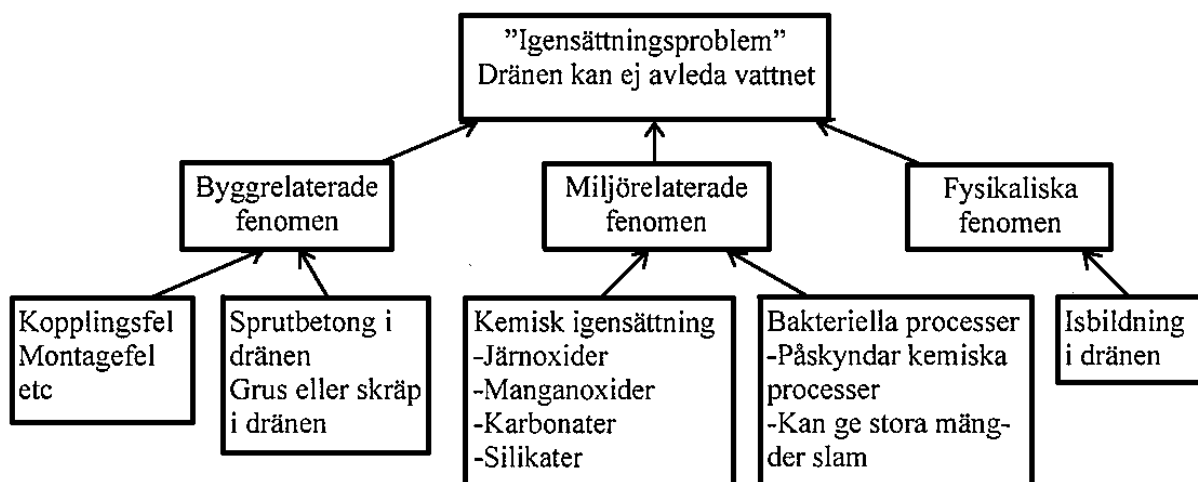
I stället för att använda dränmattor har andra lösningar testats. En lösning som håller på att provas ut nu (2008) har tagits fram av Lars Jönsson på Banverket. Bergytan sprutas först med betong, på vilken ett nät av rörhalvor monteras (figur 6.3). Nätet är utformat så att ytterligare lager med sprutbetong får tillräcklig vidhäftning i nätets öppna partier. För att vattenläckagen ska frostisolerats används en sprutbetong med större andel luftbubblor än vanligt, vilket ger en isolerande effekt. På ett antal platser i nätet monteras dosor som ändå möjliggör expansion hos eventuell isbildning. Fördelen med konstruktionen är bl.a. att den blir enklare att montera än konventionella dränmattor och att det är fördelaktigt att komma ifrån de brandfarliga mattorna. Denna typ av drän monterades i slutet av 2007 på en teststräcka i Nygårdstunnelns ena parallelltunnel. Nygårdstunneln är en del av sträckan Göteborg – Trollhättan på Norge/Vänerbanan. Enligt Lars Jönsson pågår diskussioner om att använda dränkonstruktionen som primär drän i flera nya projekt.



Figur 6.3, Provmontering av ny dräntyp i Nygårdstunneln. [Foto: Anna Andrén]

## 6.2 Igensättning

Att en drän tätnar och tappar sin funktion innebär att vattenläckaget bakom dränen måste ta en annan väg, vilket orsakar vattenläckage genom sprutbetongen bredvid dränen. Det finns ett antal sätt som dräner kan sättas igen på (figur 6.4). Kemiska och biologiska utfällningar av metaller som finns lösta i grundvattnet är troligtvis den vanligaste orsaken. De metaller som orsakar störst problem med utfällning är järn, mangan och kalcium. När det gäller järnutfällningar så avgör Eh- och pH-förhållanden om den kemiska eller biologiska utfällningen dominerar [Johansson & Stille, 1996; Salomonsson, 2001; Svensson, 2007]. Vid högt Eh och pH förbrukas det  $\text{Fe}^{2+}$  som finns löst i grundvattnet snabbt genom kemisk utfällning, vilket hindrar den biologiska utfällningen. Vid lägre Eh och pH är de rent kemiska reaktionerna långsamma och utfällningen är huvudsakligen biologisk. Material som rasar ner från berget bakom dränen är ytterligare en orsak till igensättning, samt finmaterial som finns suspenderat i grundvattnet. Om dränens kanter inte sluter helt tätt mot berget finns risk för att sprutbetong tränger in bakom dränen vid montering. Detta leder till att dränen sätts igen redan under byggskedet. Dessutom kan isbildning bakom en otillräckligt isolerad drän leda till igensättning. Sprickmineralisering i berget tvingar också vattnet att söka sig andra vägar, men det är ett problem som inte är kopplat till dränerna. Den allra viktigaste orsaken till igensättning anses vara biologisk utfällning.



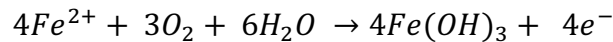
Figur 6.4, Orsaker till igensättningsproblem hos dräner. [Johansson & Stille, 1996]

### 6.2.1 Kemisk utfällning

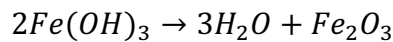
Vid ett tunnelbygge störs den kemiska jämvikt som råder mellan grundvattnet och det omkringliggande berget. Den största skillnaden är syresättningen av det vatten som befinner sig i sprickor som har anknytning till tunneln. Dessutom sker en förändring av tryck och temperatur som påverkar vattnet. Grundvatten i berggrund har mer eller mindre reducerande förhållanden och när syre blir tillgängligt i anslutning till tunneln så kommer vissa ämnen som är lösta i grundvattnet att falla ut genom oxidation. De ämnen som vanligtvis bildar utfällningar i bergtunnlar är som tidigare nämnts järn, mangan och kalcium.



Järn i grundvatten förekommer främst som  $Fe^{2+}$ . När syretillgången ökar oxideras  $Fe^{2+}$  till  $Fe^{3+}$  samtidigt som det reagerar med vatten enligt:

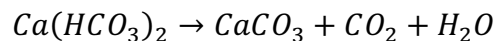


Järnhydroxiden ( $Fe(OH)_3$ ) som faller ut är en rödbrun elastisk massa som är svårslöslig i vatten. Med tiden avges vatten som är bundet i utfällningens struktur och istället bildas järnoxider, som exempelvis hematit ( $Fe_2O_3$ ) eller magnetit ( $Fe_3O_4$ ). Vid omvandlingen hårdnar utfällningen. Reaktionen vid omvandling till hematit sker enligt:

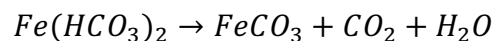


Mangan som är löst i grundvatten med låg syrehalt förekommer som  $Mn^{2+}$ . Vid ökad syretillgång bildas liksom för järn en utfällning orsakad av oxidation.  $Mn^{2+}$  oxideras till  $Mn^{4+}$ .

Kalcium faller ut p.g.a. ändrade förhållanden när grundvattnet rinner ut i en tunnel. Vattnet blir övermättat på kalcium orsakat av exempelvis en trycksänkning i tunneln jämfört med i berget, eller att eventuell högre temperatur i tunneln orsakar viss avdunstning av vattnet. Kalcium i form av  $Ca(HCO_3)_2$  reagerar på följande vis:



Om vattnet innehåller järn kan det på samma sätt falla ut som järnkarbonat [Lindblad-Påsse, 1986]:

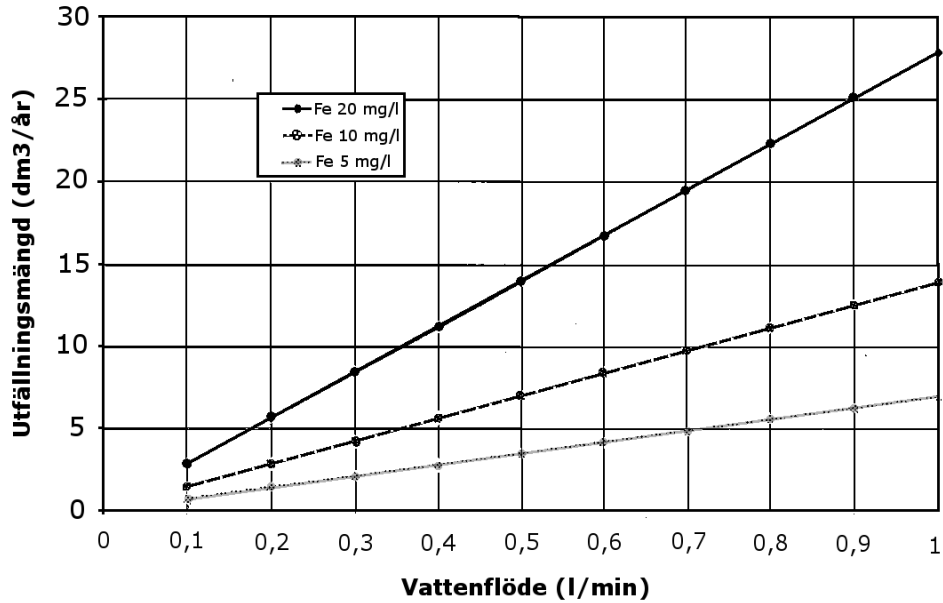


## 6.2.2 Biologisk utfällning

Biologisk utfällning innebär att den kemiska utfällningen påskyndas av bakterier. Bakterier är encelliga organismer med en genomsnittlig storlek av en mikrometer. De existerar som tusentals olika arter i världen [SKB, 2002; [www.bioresurs.uu.se](http://www.bioresurs.uu.se)] och förekommer i mycket skiftande miljöer. För att bakterier ska överleva kräver de vatten, energi och tillgång till kol, antingen organiskt eller oorganiskt. Bakterier förökar sig genom delning och med rätt förutsättningar kan en bakterie dela sig var 20:e minut [Lindblad-Påsse, 1986]. Det som begränsar bakterietillväxten är dels brist på näring, men även att bakterier motverkas av olika virus [Eydal et al, 2008]. Ett virus måste använda andra levande organismer som näringskälla och i berggrunden finns virus som livnär sig på bakterier. När virus förbrukar bakterier försvinner samtidigt deras näringskälla och det leder till minskat antal virus. Detta leder i sin tur till att bakterierna åter kan föröka sig. En växelverkan mellan bakterier och virus uppstår och det håller mängden av de båda i jämvikt. I sedimentär berggrund förekommer bakteriearter som förmodligen blivit instängda i sedimenten och sedan anpassat sig till miljön [SKB, 2002]. Magmatiska bergarter bildas vid högre temperaturer än något liv tål ( $\sim 1000^\circ C$ ). I dessa bergarter har bakterier tillkommit först efter att berggrunden har spruckit upp och vatten har letat sig ner i sprickorna [SKB, 2002].

I litteraturen beskrivs oftast bakterier förknippade med järn i samband med utfällningsproblem. Det finns både järnreducerande och järnoxiderande bakterier, vilka omvandlar järn mellan olika oxidationstal. De reducerande bakterierna bidrar som namnet

anger till att reducera järn i olika kemiska föreningar. De skapar inte själva några utfällningar men bidrar indirekt genom att öka mängden  $\text{Fe}^{2+}$  i grundvattnet, vilket gynnar de järnoxiderande bakterierna. De bakterier som oxiderar  $\text{Fe}^{2+}$  till  $\text{Fe}^{3+}$  och som dessutom utnyttjar den energi som frigörs vid oxidationen kallas järnbakterier. Vilka bakterier som anses tillhöra järnbakterierna varierar något. Detta beror på olika uppfattningar om huruvida bakterien faktiskt drar nytta av energi från oxidationsprocessen eller inte [Lindblad-Påsse, 1986; Deinema et al, 1978]. Till järnbakterierna räknas ofta *Gallionella ferruginea*, *Acidithiobacillus ferrooxidans* och bakterier från gruppen *Sphaerotilus-Leptothrix*. Den mängd energi som blir tillgänglig för järnbakterierna vid oxidationen är ganska liten. Detta betyder att stora mängder  $\text{Fe}^{2+}$  måste oxideras för att bakterierna ska överleva, vilket också ger stora mängder utfällningar. Figur 6.5 visar mängden järnutfällningar som enligt beräkningar kan bildas under ett år. Volymen bestäms av vattenflöde och vattnets järnhalt, samt att bakterier finns närvarande. Förutom att bilda stora mängder utfällningar så fastnar utfällningar som orsakats av bakterier lättare på ytor än vad rent kemiska utfällningar gör [Lindblad-Påsse, 1986]. Utöver järnbakterier finns det bakterier som skyndar på oxidationen av  $\text{Fe}^{2+}$  till  $\text{Fe}^{3+}$  utan att utnyttja den frigjorda energin. Dessa bidrar till att skapa stora volymer utfällningar dels genom att fungera som katalysator för oxidationsprocessen och dels genom att det utfällda järnet binder direkt på bakterierna i fråga. Utfällningarna av järn benämns BIOS, vilket står för ”bacteriogenic iron oxides”. Förutom att oxidera  $\text{Fe}^{2+}$  kan vissa bakterier bidra till oxidation av  $\text{Mn}^{2+}$  till  $\text{Mn}^{3+}$  eller  $\text{Mn}^{4+}$ . Bakteriesläktena *Leptothrix* och *Crenothrix* tillhör de bakterier som kan oxidera både  $\text{Fe}^{2+}$  och  $\text{Mn}^{2+}$  [Ghiorse & Siering, 1997; Salomonsson, 2001]. Ett stort antal bakterier är kända som ger utfällningar av antingen järn eller mangan, eller båda dessa metaller [Andersson, 1991; Salomonsson, 2001; Bazylnski & Frankel, 2003]. Här kommer endast fyra av de mer kända bakterierna att beskrivas närmare. Tabell 1 ger en översikt av fler bakterier som förknippas med järn- och manganutfällningar. I naturen förekommer dessa bakterier i miljöer som skiljer sig stort beträffande förhållanden som pH och Eh.



Figur 6.5, Mängden bakteriella järnutfällningar som funktion av vattenflöde och vattnets järnhalt. [Johansson & Stille, 1996]

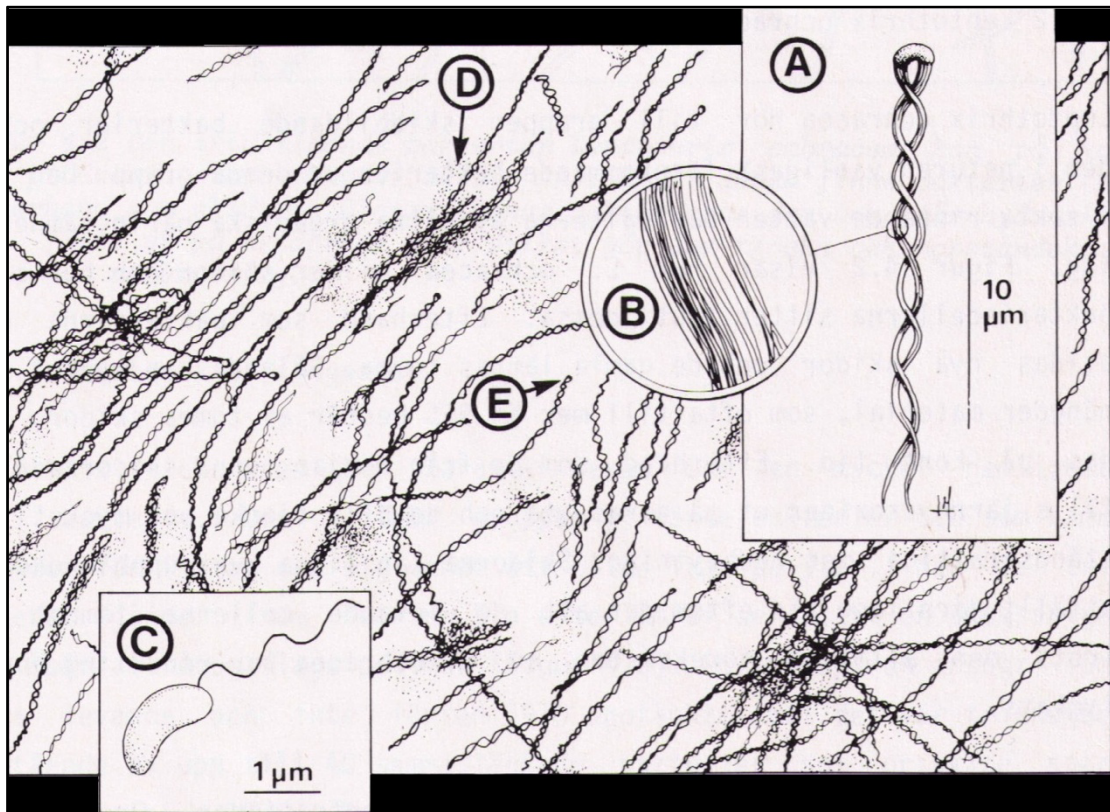
Tabell 1, Bakterier som fäller ut järn och/eller mangan. Baserad på [Andersson, 1991] och [Salomonsson, 2001].

Släkte	Utfälld metall	Släkte	Utfälld metall
Acidithiobacillus	Fe	Naumaniella	Fe
Arthrobacter	Mn	Ochrobium	Fe
Clonothrix	Fe, Mn	Pseudomonas	Mn
Clostridium	Fe	Siderobacter	Fe
Crenothrix	Fe, Mn	Siderocapsa	Fe, Mn
Desulfovibrio	Fe	Siderocystis	Fe, Mn
Ferribacterium	Fe, Mn	Sideromonas	Fe, Mn
Ferrobacillus	Fe	Sideronema	Fe, Mn
Gallionella	Fe	Siderophacus	Fe
Hyphomicrobium	Fe, Mn	Siderosphaera	Fe
Leptothrix	Fe, Mn	Sphaerotilus	Fe
Metallogenium	Fe, Mn	Sulfolobus	Fe
Micromonospora	Fe	Toxothrix	Fe

**Gallionella ferruginea** är den bakterie som är vanligast vid kända problem med bakteriell igensättning [Lindblad-Påsse, 1986; Johansson & Stille, 1996]. Den tillhör gruppen stjälkförsedda bakterier och kan producera en stjälk som består av två tvinnade knippen av tunna fibrer. Varje knippe består i sin tur av 70-80 fibrer var. Den enda levande delen på bakterien är den bönformade cellkroppen och stjälkarna växer till först när bakteriens

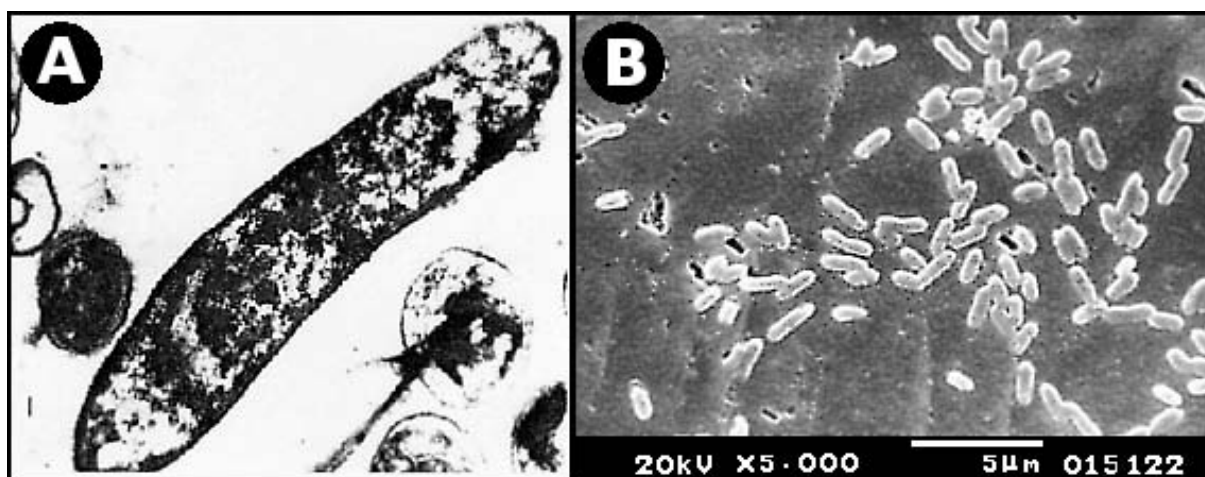
livsmiljö blir ansträngd. Innan bakterien har bildat stjälk är den frilevande och förflyttar sig med en eller flera flageller. I samband med bildandet av stjälk övergår bakterien istället till att vara fastsittande. Enbart cellkroppen är svår att upptäcka i ljusmikroskop, men med sin karakteristiska stjälk är bakterien mycket lättidentifierad. Längden på den bildade stjälken kan vara direkt relaterad till hur mycket  $\text{Fe}^{2+}$  som oxideras [Anderson & Pedersen, 2003]. Detta innebär i så fall att allt  $\text{Fe}^{3+}$  som bildas binds vid bakteriens stjälk. Desto mer  $\text{Fe}^{3+}$  som bildas, desto längre måste stjälken vara för att kunna binda järnet. Oavsett om allt  $\text{Fe}^{3+}$  binds vid bakteriestjälkarna eller inte så binds åtminstone en stor del av det utfällda järnet här. Den stora volymen hos utfällningar orsakade av *Gallionella ferruginea* beror på att bakteriens stjätkar blandas med det utfällda järnet. Dessutom sker utfällningen av  $\text{Fe}^{3+}$  60 gånger snabbare i miljöer som domineras av *Gallionella ferruginea* jämfört med miljöer utan bakterier [Anderson & Pedersen, 2003].

*Gallionella ferruginea* kräver en viss mängd syre för att trivas, helst mellan 0,1-1 mg/l. Om syrehalten är högre än detta är inte  $\text{Fe}^{2+}$  längre stabilt vilket betyder att bakteriens huvudsakliga energikälla försvinner. *Gallionella ferruginea* trivs bäst när pH är mellan 6,0-7,6 och redoxpotentialen (Eh) någonstans mellan +200 till +350 mV. Temperaturen bör vara mellan 8-16°C och även om den föredrar järn(II) halter mellan 5-25 mg/l så kan den leva vid lägre halter. Koldioxidhalten bör vara  $\geq 20$  mg/l och det är gynnsamt om halten av organiskt material är låg. Förutom nämnda förhållanden behöver bakterien en viss mängd organiska salter, som t.ex. ammonium och även god tillgång på karbonater. När syrehalten är mellan 0,3-1,5 mg/l och redoxpotentialen är större än 145 mV lever bakterien under ansträngda förhållanden och bildar därför stjälk [Anderson & Pedersen, 2003].



Figur 6.6, *Gallionella ferruginea*. A) Cellkropp med stälkar B) Stälkarna består av ett flertal fibrer C) Frilevande cell som förflyttar sig med flagell D) Utfällda järnhydroxider E) Cellkroppen är i sig mycket svåridentifierad [Lindblad-Påsse, 1986]

**Acidithiobacillus ferrooxidans** är namnet på den bakterie som tidigare hette *Thiobacillus ferrooxidans*. Namnbyten gjordes på flera arter som hörde till släktet *Thiobacillus*, eftersom de visade mycket stora skillnader i egenskaper [Kelly & Wood, 2000]. De nya, mindre grupperna består av bakteriearter med egenskaper som är mer homogena. *Acidithiobacillus ferrooxidans* är stavformad med en längd av 1-3,5 µm och en diameter av 0,3-0,6 µm [www.bioxgf.co.za]. Bakterien räknas till järnbakterierna och livnär sig alltså på att oxidera  $Fe^{2+}$  [Lindblad-Påsse, 1986; Hultman et al, 1996; Kelly & Wood, 2000]. Den kan även få energi från att oxidera svavelföreningar [Hultman et al, 1996; Bonnefoy et al, 2002], vilket utnyttjas inom gruvindustrin. *Acidithiobacillus ferrooxidans* är en av de bakterier som används bl.a. för att utvinna guld. Bakterien bryter ner sulfidmineral, som exempelvis pyrit ( $FeS_2$ ), genom oxidation och frigör då guld som är bundet till sulfidmineralet. Det som skiljer *Acidithiobacillus ferrooxidans* från övriga arter i det tidigare *Thiobacillus*-släktet är att dessa inte oxiderar järn, utan främst svavel i olika kemiska föreningar. *Acidithiobacillus ferrooxidans* har optimala förutsättningar vid temperaturer mellan 30-35°C och vid pH 2,5. Detta betyder att bakterien vanligtvis inte förekommer i de miljöer som ytliga bergtunnlar utgör. Däremot kan den om det behövs acceptera temperaturer mellan 10-37°C och pH från omkring 1,5 till 6 [Hultman et al, 1996; Kelly & Wood, 2000]. Bakterien föredrar låga halter organiskt material, den kräver tillgång till syre och använder främst atmosfärisk koldioxid som kolkälla [Kusano & Rawlings, 1994; Hultman et al, 1996].

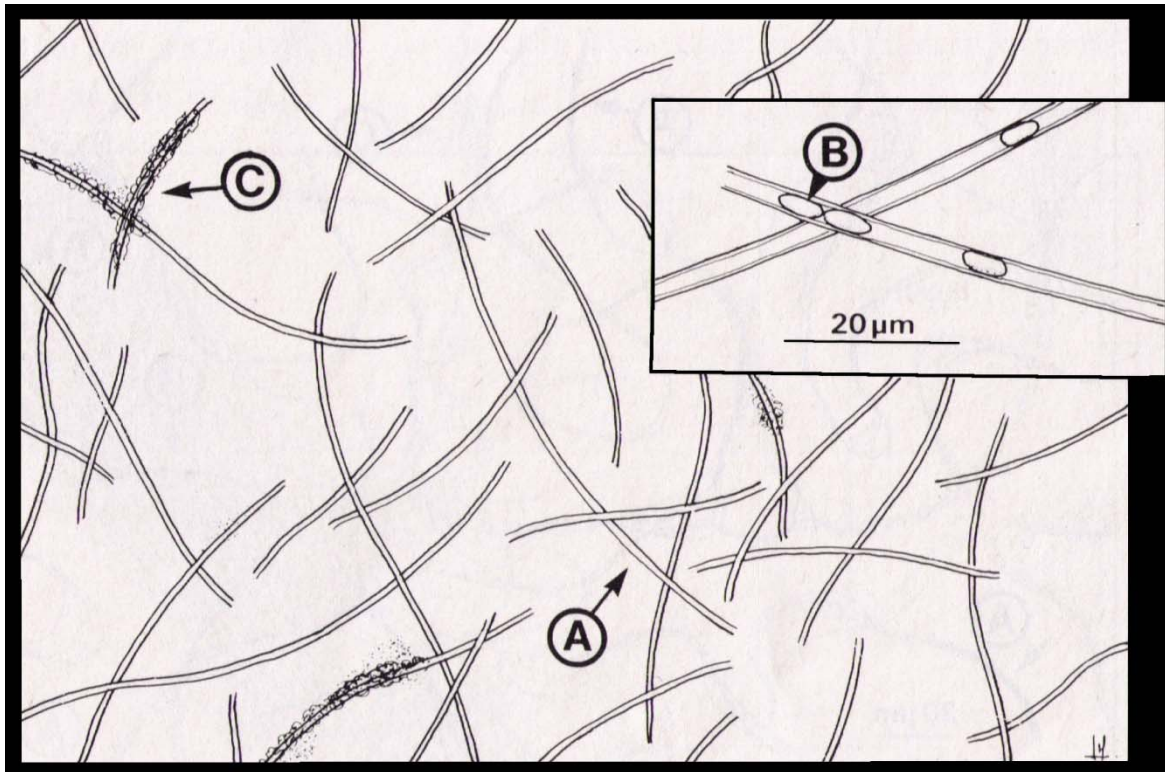


Figur 6.7, *Acidithiobacillus ferrooxidans* i elektronmikroskop. A) 30 000 ggr förstoring B) 5 000 ggr förstoring [www.jesse.usra.edu]

**Leptothrix ochracea** är typarten i den grupp bakterier som kallas Sphaerotilus-Leptothrix gruppen [Lindblad-Påsse, 1986; Ghiorse & Siering, 1996]. Denna grupp är en sammanslagning av de båda släktena Sphaerotilus och Leptothrix, vilka anses vara nära besläktade [Deinema et al, 1978; Ghiorse & Siering, 1996]. Gruppen tillhör de bakterier som kan oxidera både  $\text{Fe}^{2+}$  och  $\text{Mn}^{2+}$ . De räknas till järnbakterierna även om det inte anses vara bevisat att de använder den energi som frigörs vid oxidationen [Deinema et al, 1978]. Bakterierna är skidbildande och trivs i långsamt rinnande vatten som innehåller låga halter av organiska näringsämnen. Skidan som bildas innehåller ett antal av bakteriernas cellkroppar och gör att bakterien kan inta ett fastsittande läge på ytor i sin närmiljö. När bakterierna växer bildas nya skidor medan de gamla lämnas tomma. På dessa tomma skidor kan järnhydroxider och manganoxid falla ut, vilket gör att de blir mycket tjockare än de var ursprungligen. Dessutom gör utfällningarna att skidorna blir mycket motståndskraftiga mot nedbrytning.

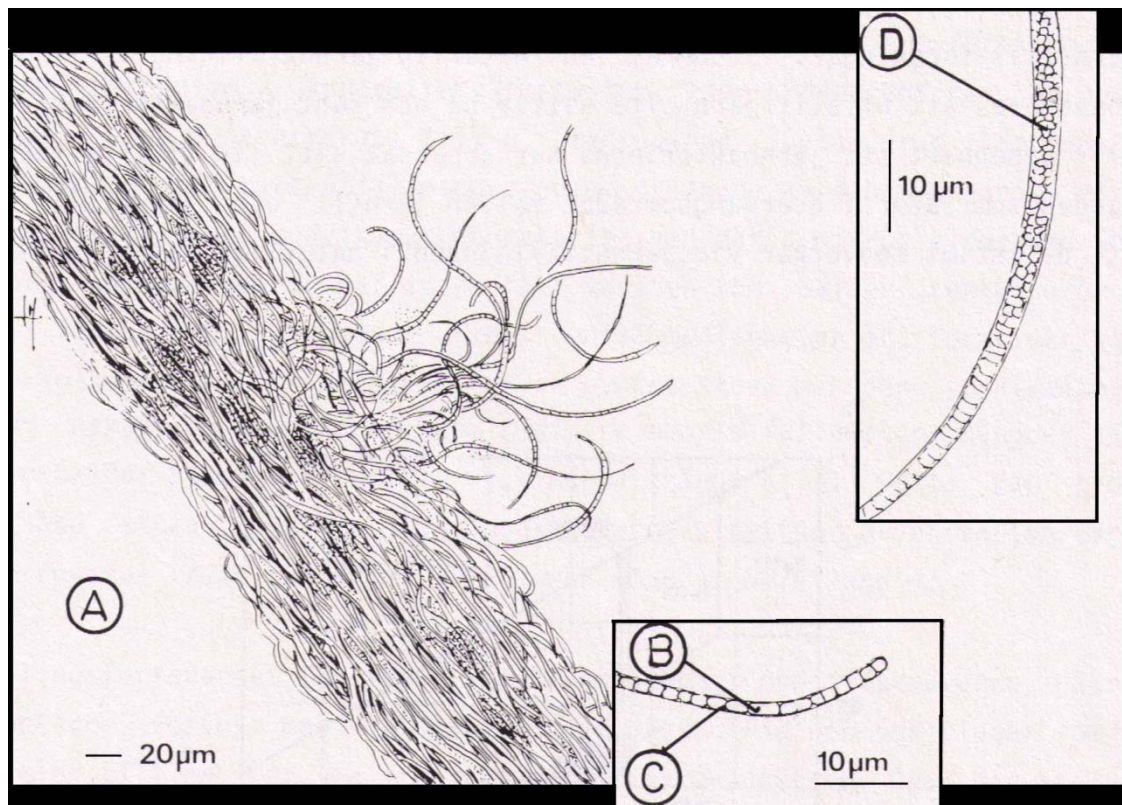
Leptothrixbakterier kan leva vid låga syrehalter och har bäst tillväxt vid pH 6,0-7,5. Avvikelser från neutrala pH är den vanligaste orsaken till att Leptothrixarter endast oxiderar små mängder  $\text{Mn}^{2+}$ . Eh bör vara mellan +200 och +400 mV och temperaturen mellan 15-25°C. Förutom små mängder organiskt material behöver bakterien vitaminerna  $\text{B}_{12}$ ,  $\text{B}_1$  (tiamin) och  $\text{B}_8$  (biotin).





Figur 6.8, *Leptothrix ochracea*. A) Bakterien bildar skidor. B) Inuti skidorna växer bakteriecellerna. C) Utfällda järnhydroxider fäster på skidorna. [Lindblad-Påsse, 1986]

**Crenothrix polyspora** är ytterligare en av de bakterier som kan oxidera både  $\text{Fe}^{2+}$  och  $\text{Mn}^{2+}$ . *Crenothrix polyspora* är liksom *Leptothrix* en skidbildande bakterie, men med mycket tunnare skidor än hos *Leptothrix*. Skidorna är långa (upp till 3mm), trådlika och kan ibland sitta ihop med flera andra skidor vilket skapar kraftiga massor [Lindblad-Påsse, 1986]. Till största delen är skidorna fyllda av enkla rader med bakterieceller, men ibland förekommer flera celler bredvid varandra [Hirsch et al, 1977; Lindblad-Påsse, 1986]. Detta sker främst i skidornas ändar som med tiden förlorar sin form p.g.a. trycket från växande bakterieceller och blir bredare än resten av skidan [Hirsch et al, 1977]. Efterhand får cellerna en brunaktig färg p.g.a. järnutfällningar som fastnar på deras yta. *Crenothrix polyspora* är vanligt förekommande där järnhalten är hög och där det finns en viss mängd organiskt material. Övriga krav på levnadsmiljö är inte kända [Lindblad-Påsse, 1986].



Figur 6.9, *Crenothrix polyspora*. A) Bakteriens skidor kan bilda kraftiga massor. B) Bakterieceller C) Ett tunt hölje runt bakteriecellerna bildar skidan. D) I vissa fall kan bakteriecellerna förekomma i oordnad struktur. [Lindblad-Påsse, 1986]

### 6.2.3 Suspenderat material

Med grundvattnet transporteras bl.a. lerpartiklar, levande och döda bakterier samt kolloider av olika slag. Dessa fastnar på vägen genom berget i sprickor och porer, vilket sätter igen delar av vattnets flödesvägar. Den del av materialet som når fram till en tunnel kan även medverka vid igensättningen av dräner. Störst bidrag till igensättning ger troligtvis lermaterial, vilket bildas genom vittring av berggrunden i de sprickor som grundvattnet rör sig.

### 6.2.4 Utrasat material samt sprutbetong

Dräner monteras antingen direkt mot bergytan eller utanpå betongsprutat berg. Material från berg eller betong kan falla ut och ner i dränen där det bidrar till igensättning. Att material faller ut kan bero på krypningar i berget. Dessa orsakas av att spänningssituationen i berget med tiden skapar rörelse in mot det hålrum som en tunnel utgör [Lindblom, 1999].

Lermineraler tillhör skiktsilikaterna vilket betyder att de har en struktur som är uppbyggd av skikt. Mellan dessa skikt kan joner eller jonföreningar tas upp eller avges hos vissa lermineral, vilka då benämns svällande leror. Vatten är en av de jonföreningar som ofta förekommer mellan skikten och därför påverkar lermineralets volym. Om svällande leror förekommer i sprickor så kan dessa skapa tryck som lösgör delar av berget. De leror som har störst förmåga att variera i volym tillhör en grupp mineral som kallas smektit och ett vanligt förekommande



mineral i gruppen är montmorillonit [Drever, 1997; Nesse, 2000]. Leror minskar även friktionen i sprickor och kan få enskilda block att röra sig p.g.a. tyngdkraften.

Bergets kvalitet påverkar risken för utrasat material. Hårt berg med få sprickor ger lägre risk än exempelvis uppsprucket eller vittrat berg.

Om isbildning sker i berget eller i sprutbetongen så kan den orsaka frostsprängning, vilket leder till nedfall av materialet som sprängs loss. Om frostsprängning sker eller inte beror på om vattnet har chans att expandera i berggrunden [Andrén, 2006]. Vid frysning till is ökar vatten sin volym med 9 %. Ett material som är helt vattenmättat tillåter ingen expansion och därför uppstår brott. Om nedkylningen av berget går långsamt kommer dessutom vatten att röra sig mot frysfronten och bidra till ett ökat istryck [Andrén, 2006]. En snabb nedkylning hindrar vattnets rörelse och därför är risken för frostsprängning mindre än vid långsam nedkylning.

Dränkonstruktioner som inte sluter helt tätt mot berget riskerar att orsaka läckage av vatten längs dränkanterna. Dessutom är risken stor att sprutbetong tränger in bakom dränen och orsakar igensättning redan under byggskedet. Detta problem är störst hos smala dränkonstruktioner.

### **6.2.5 Isbildning**

Isbildning i dräner är som igensättningsproblem självläkande eftersom de upphör så fort temperaturen stiger och isen smälter. Däremot skapar isen flera följdproblem. Kraftig isbildning i dräner riskerar att skada dränkonstruktionen genom att utsätta den för tryck som är högre än vad konstruktionen tål. I kapitel 5 nämndes att lera i berggrunden kan kompakteras p.g.a. frysning. Lerpartiklarna omorienteras under ett antal perioder med omväxlande frysning och upptining [Andrén, 2006], vilket leder till att sprickor uppstår i leran. Sprickorna möjliggör högre vattenföring, vilket t.ex. kan innebära att kemisk och biologisk utfällning ökar. Högre vattenföring kan även innebära att dränen inte längre klarar av att leda bort vattnet som istället läcker ut bredvid dränen.

Trots risken för frostsprängning så är isbildning i berget att föredra framför att vatten fryser i dränen. Detta för att undvika direkta skador på dränen. Med rätt konstruktion av drän kyls berget bakom dränen snabbare än luften i dränen. Vattenflödet från berget minskar då innan frysning kan ske i dränen. Enligt Vägverket [Fredriksson & Persson, 1996] uppfyller ett 50 mm tjockt isoleringsskikt funktionskraven. Dessutom måste bredden på isoleringsskiktet vara minst 1,5 m, eftersom kyla annars kan tränga in i dränen från sidorna.

## 7 Fältundersökning och resultat

Fältundersökningen har utförts för att öka förståelsen för bergtunnelldräner och igensättningen av dessa. Under Göteborg finns ett system av tunnlar som bl.a. hanterar telefoni och bredband, elförsörjning, fjärrvärme och fjärrkyla samt färskvatten och avloppsvatten. TeliaSonera äger ett antal av dessa tunnlar och som studieobjekt har två av TeliaSonerars tunnlar valts. Totalt utgörs TeliaSonerars tunnelnät i Göteborg av Masthuggstunneln, Citytunneln, Vasatunneln, Kålltorpstunneln och Delsjötunneln. Fördelen med dessa tunnlar är att de varit i drift relativt länge, redan sedan slutet av 1960-talet. Dessutom uppvisar dessa tunnlar problem med utfällningar. Dränerna mynnar strax ovanför tunnelsulan och gör det därför möjligt att se i vilket tillstånd de befinner sig. Anledningen till denna konstruktionslösning är att temperaturen i TeliaSonerars tunnlar aldrig sjunker under fryspunkten, utom mycket lokalt runt enstaka stigningsschakt. I trafiktunnlar för bil- och tågtrafik sjunker temperaturen vanligtvis under fryspunkten på vintern, vilket kräver att dränerna är isolerade och neddragna i tunnelsulan till frostfritt djup. Detta ger mycket begränsad möjlighet att studera dessa dräners tillstånd.

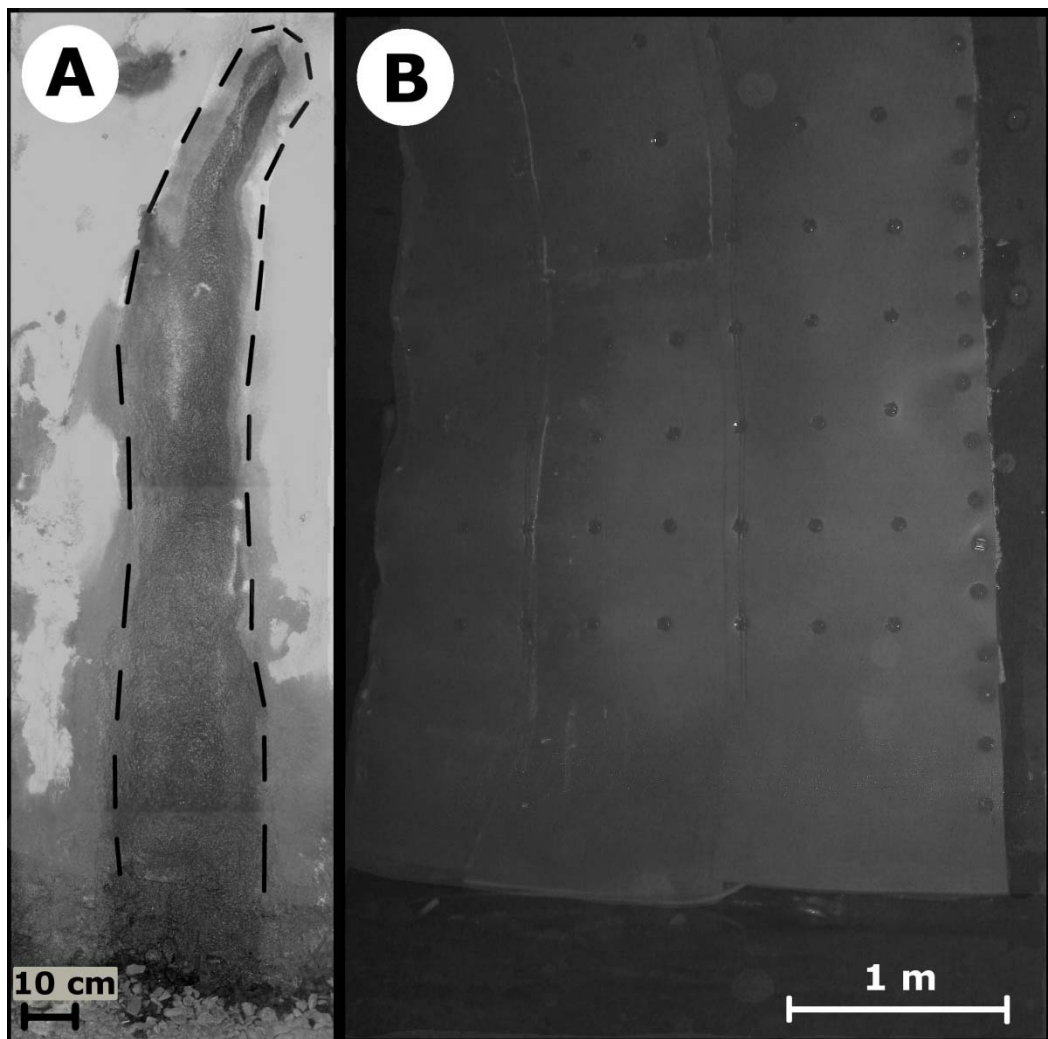
### 7.1 Undersökta tunnlar

Dränerna i TeliaSonerars tunnlar är smala, c:a 30 cm, och täckta med sprutbetong. Detta gör det mycket tidskrävande att identifiera alla dräners läge och avgöra i vilket skick de befinner sig. En inventering av dräner i Kålltorps- och Delsjötunneln var sedan tidigare utförd av Björn Albino som hade iakttagit ett antal typtillstånd hos dränerna. Dessa var dräner med gulvit, brunröd, svart eller olikfärgad fällning, varav vissa var helt täta och vissa fortfarande fyllde sin funktion. Dessutom fanns öppna men helt torrlagda dräner, samt fullt fungerande dräner utan utfällningar. Av praktiska skäl gjordes ett urval från de dräner som Björn Albino identifierat i de båda tunnelarna. Dessa dräner granskades sedan närmare. Några foton från tunnelarna visas i figur 7.2.

Den del av Kålltorps- och Delsjötunneln som studerats har en sammanlagd längd av c:a 7,7 km och utgör omkring 35 % av TeliaSonerars tunnlar i Göteborg. Tunnelsystemens sträckning är sekretessbelagd, varför inga kartor kommer att visas här. Delsjötunneln utnyttjas endast av TeliaSonera, medan Kålltorpstunneln dessutom utnyttjas av Göteborg Energi. I Kålltorpstunneln är därför den ena tunnelväggen använd för dragning av fjärrvärmeledning, vilket ökar temperaturen jämfört med i Delsjötunneln. Uppskattningsvis pendlar temperaturen i Delsjötunneln mellan 10-15°C under året och temperaturen i Kålltorpstunneln omkring 20-25°C till följd av fjärrvärmeledningarna.

Bygget av TeliaSonerars tunnlar pågick under slutet av 1960-talet och början av 1970-talet. Både för- och efterinjektering utfördes, men i mycket varierande mängd och främst där det ansågs mest nödvändigt [Albino & Carlsson, 2003; Thorén, muntlig information]. Dräner är vanligt förekommande och konstruktionen består av inplastad mineralull som täckts med stålmat och oarmerad sprutbetong. Dränerna följer helt sprickornas riktningar längs berget och täcker endast en liten del av berget vid sidan av sprickorna. Detta skiljer sig från modernare dräner som täcker in hela bergväggen där vattenförande sprickor förekommer (figur 7.1). Den

smala konstruktionen tillsammans med i vissa fall otillräcklig tätning mot bergytan har troligen gjort att ett antal dräner satts igen av sprutbetong redan i monteringskedet [Thorén, muntlig information].



Figur 7.1, Olika dränlösningar. Skalan är inte exakt. A) Äldre, smal dränkonstruktion som helt följer den vattenförande sprickan. Fotot visar en drän i Delsjötunneln. Dränen är betongsprutad men den streckade linjen visar ungefärligt läge. B) Nyare dränkonstruktion som täcker in både den vattenförande sprickan och hela ytan intill. Konstruktionen täcks senare med sprutbetong. Foto från Nygårdstunneln.

## 7.2 Tunnelgeologi

Både Kålltorps- och Delsjötunneln är helt betongsprutade och bergartsbestämning är därför inte möjlig. Däremot finns det material från förundersökningarna som visar vilka bergarter som förekommer i ett antal borrhälor längs tunnelsträckningarna, samt vissa sprick- och bergartskarteringar gjorda under byggskedet.

Borrhälekartering längs Kålltorpstunnelns sträckning visar att berggrunden domineras av två typer av gnejs. Vanligast förekommande är en rödgrå intermediär gnejs och näst efter denna

följer en grå plagioklasrik gnejs. Dessa gnejser utgör tillsammans ca 90 % av den totala längden borrkärnor. Resterande 10 % är främst fördelade på tre bergarter varav två basiska sådana. Den ena har amfibolitisk sammansättning och den andra diabasliknande sammansättning. Den tredje bergarten är pegmatit. Sprickfrekvensen i de båda basiska bergarterna är något högre än för de dominerande gnejserna. Detta kan leda till förhöjda järn- och manganhalter i grundvattnet eftersom dessa grundämnen förekommer i relativt stor mängd i amfibolit och diabas och eftersom berggrundens sprickor styr vattnets väg.

För Delsjötunneln finns främst information om sprickor och vittrade zoner, vilka båda förekommer i relativt hög omfattning. Den studerade delen av Delsjötunneln utgör i stort sett hälften av tunnelns totala längd. Vattenförande sprickor har karterats mycket frekvent längs delar av tunnelsträckningen, i vissa fall förekommer de oavbrutet över sträckor av 70 meter. Även vittrade zoner har karterats över längre ihållande sträckor av upp till 60 meter. Ett antal pegmatitgångar har dokumenterats, varav åtminstone två gånger har en bredd av mellan 5-7 meter. Utfällningar förekommer där vattenförande sprickor har karterats, vilket inte är särskilt överraskande. Däremot finns det dräner som är torrlagda, vilka monterats över vattenförande sprickor i vittrade zoner. I dessa fall har vattenläckaget flyttat sig eller upphört av någon anledning.

### 7.3 Vattenkemi

Detta examensarbete var från början tänkt endast som en litteraturstudie och därför var inga provtagningar budgeterade. Vid tunnelbesöken beslutades dock att ta några vattenprover för att få ut mer information om de observerade utfällningarna. Det främsta syftet med vattenproverna var att visa hur vattenkemin varierar mellan de olika utfällningstyperna. Ett problem var att hitta dräner med tillräckligt hög vattenföring, så att analys var möjlig. Fyra dräner i Kålltorpstunneln ansågs vara lämpliga. En drän gav svarta fällningar, en gav vita avlagringar och två gav rödbruna fällningar. De två sistnämnda är placerade med ett avstånd av endast fem meter från varandra. Ur en av dem rinner klart vatten och fällningarna har bildats utanför dränen. Den andra dränen är igensatt av fällningar, men genom att rensa ur den för hand blev vattenföringen tillräcklig för provtagning. Proverna skickades till Lantmännen Analycen i Lidköping där analyserna utfördes.

De tre typer av utfällningar och avlagringar som förekommer i tunnarna är rödbruna, svarta eller vita till färgen och respektive bildning antas vara baserad på järn, mangan eller kalcium. De fyra vattenproverna visar som väntat att vattnet som bildat rödbruna fällningar innehåller relativt hög halt av järn och att de svarta fällningarna är bildade av vatten med hög manganhalt. Däremot är de vita avlagringarna bildade ur vatten som inte innehåller anmärkningsvärt hög halt kalcium. En enkel förklaring kan vara att kalciumet inte längre är i lösning i det analyserade vattnet, utan redan bildat kalцит ( $\text{CaCO}_3$ ). Frågan om huruvida ämnen är lösta i grundvattnet eller om de fallit ut gäller även övriga analyserade ämnen. Detta betyder att analysresultaten bör ses mer som orienterande än som absoluta sanningar.

De två vattenprover som togs ur närliggande dräner där den ena var helt igensatt och den andra helt öppen visar helt olika resultat. Förklaringen är inte känd men det är intressant att så

stora skillnader i grundvattenkemi och utfällningspotential förekommer alldeles intill varandra i en tunnel och visar också hur svårt det är att avgöra var dräner riskerar att sättas igen p.g.a. utfällningar.

Den stora volymen hos de järnbaserade utfällningarna talar för att bakterier har inverkat vid utfällningsprocessen. Vattenkemin enligt analysen talar dock mer för att utfällningarna bildats genom kemisk oxidation av  $\text{Fe}^{2+}$  i grundvattnet p.g.a. vattnets pH och järnhalt. Vid  $\text{pH} > 7$  och järnhalt  $< 1$  mg/l anses den kemiska oxidationen av järn dominera och bakteriell oxidation vara mindre trolig [Johansson & Stille, 1996]. I det analyserade vattnet är  $\text{pH} 7,7$  och järnhalten  $0,80$  mg/l. Fullständiga analysresultat visas i bilaga.

#### **7.4 Referenstunnlar**

TeliaSonerars tunnlar är byggda utan systematisk förinjektering och vattenläckaget är på vissa ställen rikligt. Höga vattenflöden skapar i sin tur förutsättningar för stora mängder utfällningar och därmed igensättning av dräner. Vid besök i två tunnlar som tillhör Göteborg Energi konstaterades att inläckande vatten och utfällningar endast förekom i mycket begränsad mängd. Detta kunde avgöras eftersom antalet dräner som döljer problemen i dessa tunnlar är väldigt låg. De två tunnarna är Guldhedstunneln och Majornatunneln, vilka byggdes under början av 1980-talet. Tunnarna är sammanknutna med delar av TeliaSonerars tunnelnät och det är troligt att förutsättningar gällande berggrunden är lika för TeliaSonerars och Göteborg Energis tunnlar. I äldre tunnlar tillhörande Göteborg Energi förekommer utfällningsproblem till viss del, men i Guldhedstunneln och Majornatunneln har mängden utfällningar begränsats genom omfattande förinjektering. Förinjektering har gjorts på hela tunnelsektionen och längs vissa delsträckor i tunnarna förekommer tredubbla injekteringskärlar för att hindra inläckande vatten [Bo Blixt, muntlig information]. Det låga flödet av inläckande vatten orsakar i sin tur mindre mängd utfällningar. Även om injekteringsarbetet utförs mycket noggrant så ställer dock berggrunden till med problem i vissa fall. Starkt förskiffrad berggrund leder till svårigheter att få ut injekteringsbruket i berget om tunneln skär förskiffringen så att injekteringshålen kommer att gå parallellt med strukturen. Leromvandlade zoner orsakar också svårigheter gällande spridningen av injekteringsbruket i berggrunden.

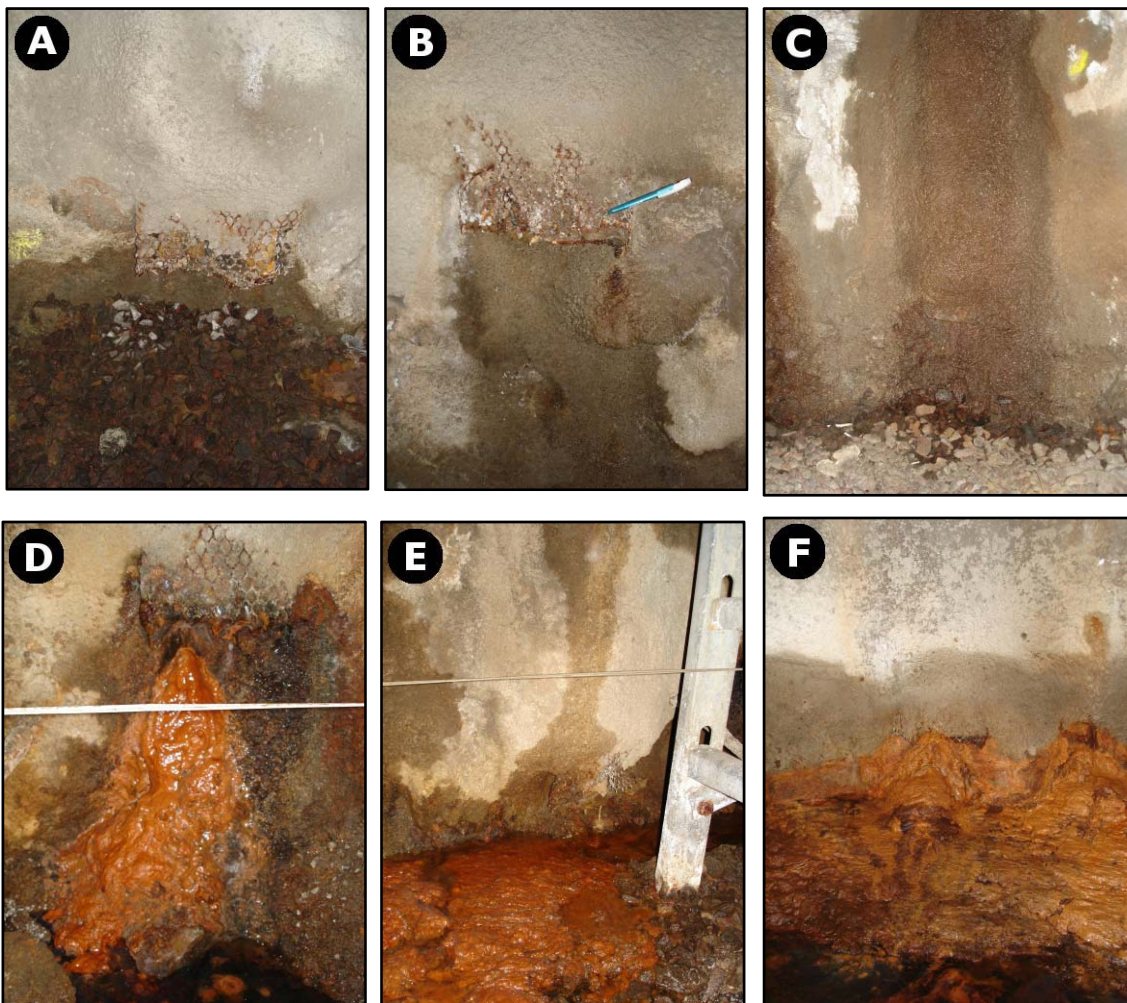
Inläckande vatten av skiftande omfattning förekommer i princip i alla bergtunnlar. I en rapport från SveBeFo [Hargelius, 2006] diskuteras vattenproblematik i flera svenska bergtunnlar. För ett par av tunnarna har utfällningar uppmärksammats, vilka dessutom i något fall har orsakat igensättning av dräner. Problemet i de flesta tunnlar är att dränerna är neddragna i tunnelsulan, vilket gör att igensättning är mycket svår att upptäcka. Vattenläckage bredvid dräner kan bero på att dränerna är igensatta, men kan lika gärna ha andra orsaker. Vattnets flödesvägar kan exempelvis ändras p.g.a. spänningsomlagringar i berggrunden, eller till följd av att sprickmineralisering läker vissa sprickor och leder vattnet andra vägar.

#### **7.5 Felkällor**

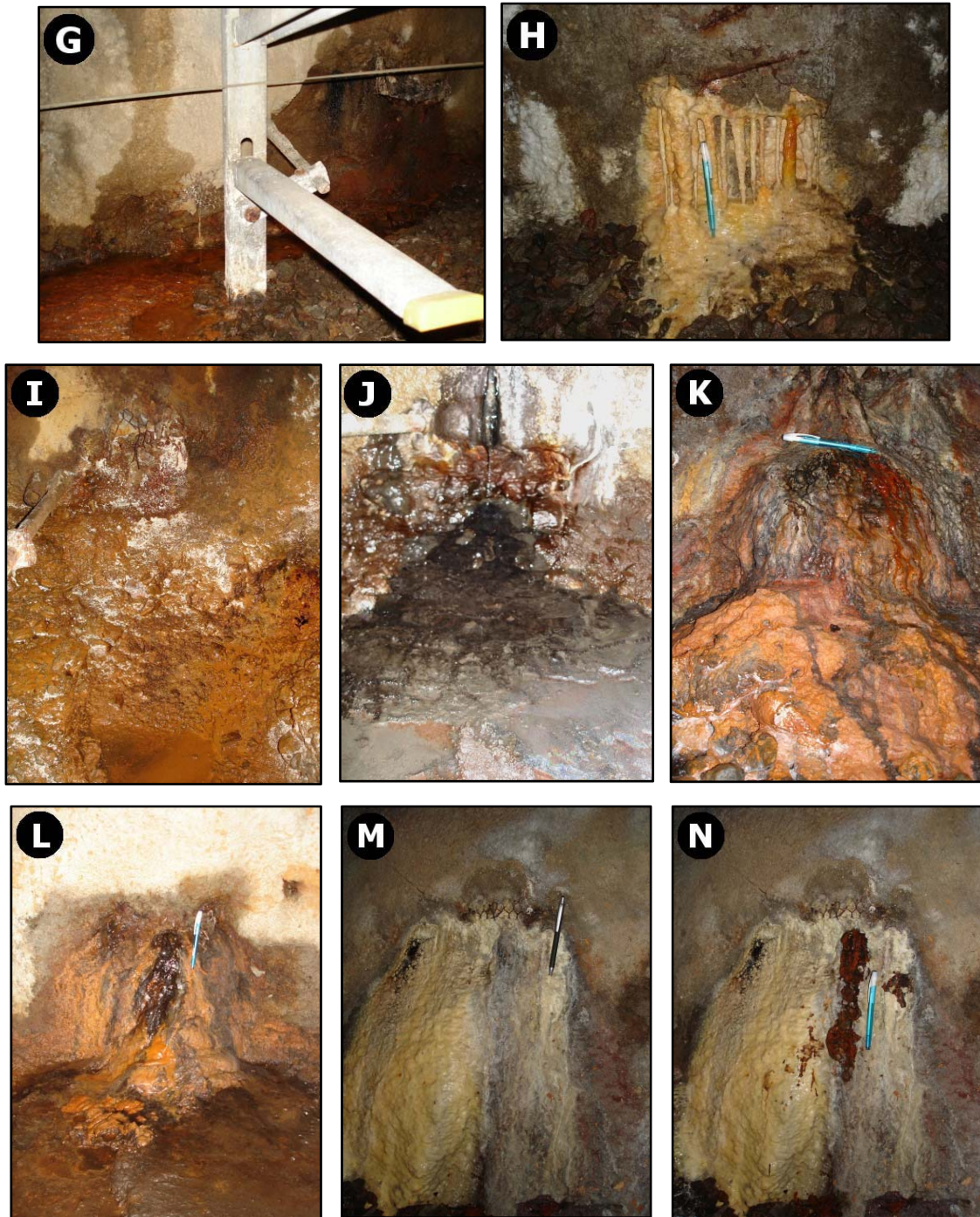
De iakttagelser som gjorts i TeliaSonerars och Göteborg Energis tunnlar är med stor sannolikhet representativa även för andra bergtunnlar. Dock skiljer sig dessa tunnlar från de

flesta trafikunnelar genom att i princip aldrig utsätts för temperaturer under fryspunkten. Utfällningar förekommer i både varma och kalla tunnelar, men det är möjligt att omfattningen skiljer sig mellan olika tunnelar. Ett exempel är bakterier, vilka trivs bäst under bestämda förhållanden, exempelvis viss temperatur. En tunnel som håller jämn temperatur över de olika årstiderna kan eventuellt erbjuda en mer gynnsam miljö för bakterier att etablera sig i.

Vattenanalyserna har använts för enklare bestämning av grundvattenkemin som hänger samman med de olika utfällningstyperna. I några fall kan resultaten vara missvisande p.g.a. att inga mätningar gjordes i fält. Samtliga värden kommer från analys utförda på laboratorium, vilket exempelvis kan ge för höga pH-värden jämfört med mätningar i fält [Lindblad-Påsse, 1986].







Figur 7.2, Foton från Källtorpstunneln och Delsjötunneln. A) Torr drän utan utfällningar. B) Fullt fungerande drän. C) Tät drän, vattnet tränger igenom sprutbetongen. D) Nästan helt tät drän, järnutfällningar. E) Fullt fungerande drän, järnutfällningar har bildats utanför dränen. F) Järnutfällningar G) Två fungerande dräner, järnutfällningar nedanför. H) Drän med järnförorenade kalcitavlagringar. Bredvid dränen har ren kalcit bildats på sprutbetongen. I) Delvis förhårdnade järnutfällningar. J) Manganutfällningar K) Järn- och manganutfällningar. L) Järn- och manganutfällningar. M+N) Järn- och manganutfällningar med kalcitskorpa.

## 8 Diskussion och slutsatser

Igensättning av dräner är en stor orsak till underhållsbehov i berganläggningar. Igensättningen leder till att vattenläckage bakom dränerna tvingas leta sig andra vägar och därför läcker fram bredvid dränerna. Dock är igensatta dräner inte den enda anledningen till att vattenläckage flyttar sig. Anläggandet av bergtunnlar orsakar spänningsomlagringar i berggrunden. Detta påverkar i sin tur berggrundens konduktivitet och därmed vattnets flödesvägar. Även sprickmineralisering i berggrunden påverkar vattnets flöde genom att täta vissa sprickor. Vatten söker sig dessutom till områden med lägsta möjliga energinivå, alltså från varmare zoner till kallare [Andrén, 2004]. Detta betyder teoretiskt att vatten bakom en isolerad drän under kalla perioder skulle sträva efter att ta sig till sidan av dränen eftersom temperaturen är lägre där.

I princip alla bergtunnlar har problem med inläckande vatten, men problemets storlek skiftar starkt. I många fall är mängden inläckande vatten direkt relaterad till hur omfattande injekteringsarbeten som har utförts. Även tunnlar som går i väl injekterad berggrund kan dock ha problem med vattenläckage. Förutom de tekniska svårigheter som injekteringsarbeten innebär så påverkar även faktorer som berggrundens strukturer, porositet och eventuella lerzoner hur väl injekteringsmedel sprider sig i berggrunden.

I tunnlar som utsätts för frostgrader är dräner isolerade och neddragna i tunnelsulan. Inläckande vatten i tunneln är enkelt att konstatera, men inte att avgöra om det beror på igensatta dräner eller på andra faktorer. Om läckaget uppstår i direkt anslutning till en drän och utfällningar bildas på tunnelväggen så är det rimligt att anta att dränen satts igen av dessa. Andra typer av igensättning än utfällningar är svårare att avgöra eftersom de inte lämnar samma form av ledtrådar. Att avgöra om vattenläckage i en tunnel beror på igensättning av dräner eller inte kan vara ekonomiskt betydelsefullt vid beslut om åtgärder. En riktig bedömning av igensättningsrisken hos dräner under en tunnels byggskede kan alltså löna sig senare.

Risken för igensättning p.g.a. utrasat material kan till viss del avgöras genom besiktning av tunnelväggar och sprutbetong innan dränmontage. Tyvärr kan krypningar i berggrunden, sprickbildning i betongen och frostsprängning ändå leda till att material faller ut. Att sprutbetong tränger in bakom dräner vid sprutningen undviks genom kontroll av att dränerna sluter tätt mot tunnelväggen. Risken för isbildning mellan drän och berg begränsas genom att utforma dränkonstruktionen frostsäkert. Suspenderat material förekommer i första hand kopplat till lerzoner i berggrunden. Potential för kemisk och biologisk utfällning kan bestämmas genom att studera bergytan där vatten förekommer. Utfällningar uppstår relativt snart efter utsprängning, men mängden vatten avgör hur fort de kan observeras. Därför är tidsaspekten avgörande för att upptäcka riskområden gällande utfällningar. I ett tunnelprojekt betyder det att desto längre tid som går mellan utsprängning och betongsprutning samt dränmontering, desto större är chansen att undvika igensättningsproblem. I dagsläget är den bästa lösningen vid kända utfällningsproblem att montera spolbara dräner. Dessa kräver dock en underhållsplan som ser till att spolning sker tillräckligt ofta. Utfällningar av järnhydroxid kan sätta igen dräner inom sex månader [Johansson & Stille, 1996], men det tar tid för



utfällningarna att hårdna. Detta betyder att en dränspolning varje halvår kan räcka för att hålla dränen i funktion, men att längre tid mellan spolningarna inte ger någon effekt på de förhårdnade utfällningarna. När kalcium faller ut som kalcit bildar det direkt en hård avlagring och rensning genom spolning ger troligtvis inte någon större effekt.

Risken för att utfällningar ska bildas varierar i en tunnel. TeliaSonerars tunnlar är ett bra exempel på hur svårt det är att bedöma igensättningsrisken. Dränerna är omkring 40 år gamla och vissa fungerar fortfarande perfekt, medan andra är helt igensatta av utfällningar. Det finns en mängd faktorer som skulle kunna användas för att bedöma risken för utfällningar vid varje läckagepunkt i en tunnel. Dessa presenteras kortfattat i tabell 2. Önskvärt är att skapa en enkel matris där ett fåtal av dessa faktorer leder till beslut om exempelvis montering av spolbara eller icke spolbara dräner. Tyvärr är det mycket svårt att skapa en sådan matris eftersom samtliga faktorer måste tas ställning till. Frågan är om det är ekonomiskt försvarbart att lägga resurser på så djupgående undersökningar. Den metod som till viss del används idag är att notera var utfällningar bildas efter utsprängning av en tunnel och att välja dränkonstruktion efter detta. I en nysprängd tunnel kommer åtminstone de första järnutfällningarna att bildas inom loppet av några minuter till några timmar om förutsättningarna är rätt [Andersson, 1991]. Om den nysprängda bergytan tillåts vara orörd under minst det första dygnet betyder det att riskområden för järnutfällningar bör kunna bestämmas relativt väl. Detta förutsätter dock att vattenläckagen är stationära och dessutom tillräckligt stora. Om läckagen flyttar sig behövs mer tid för observation. Vattenföringen i berggrunden varierar dessutom under året och därför finns risk för att utfällningar bildas först när möjligheten till observation i byggskedet är över. Utfällningar av mangan är vanligtvis förknippade med järnutfällningar och bör därför kunna observeras samtidigt som dessa. När det gäller kalcitavlagringar är frågan vilken dränkonstruktion som är lämplig. Rensning av dräner genom spolning är troligtvis inte särskilt effektivt eftersom kalcit snabbt bildar hårda massor.

Det bästa sättet att undvika igensättning av dräner är naturligtvis att minimera mängden inläckande vatten i bergtunnlar. Mycket kraft läggs på att förbättra resultaten av både för- och efterinjektering av berggrunden, eller hitta alternativa sätt som exempelvis koncentrerar inläckande vatten till vissa bestämda områden. Under tunneldrivningen är det viktigt att inte skada injekteringskärmen, varför sprängningsmetoden också är avgörande för mängden inläckande vatten. Med framgångar inom dessa områden kan dränbehovet minskas och därmed också risken för igensatta dräner.

### **8.1 Förslag på ytterligare studier**

För ytterligare ökad förståelse av de utfällningsproblem som kan förekomma i bergtunnlar föreslås följande:

- Bestämning av ett antal typvatten som förekommer i bergtunnlar. Med dessa typvatten kan laktester utföras på vanligt förekommande bergarter. Detta skulle kunna visa var utfällningspotentialen är hög p.g.a. lösta metaller i grundvattnet.
- Bestämning av hur fort utfällningar bildar hårda massor under olika förhållanden, samt hur lösa utfällningar respektive hårda avlagringar bäst kan avlägsnas.

- Nedmontering av igensatta dräner för att undersöka om och hur igensättningen varierar i dränen. Är mängden utfällningar jämt fördelad i dränen eller går det att se något mönster i hur den varierar?
- Fortsatta studier av bakteriers förekomst i berggrund. Jämförelse av de förekommande bakteriernas uppbyggnad med hänsyn till hur mycket de påverkar utfällningarnas volym. Bakterier som bildar långa trådar bör vara ett större problem än de som har mindre yta för utfällningar att fästa vid.

Tabell 2, Faktorer som påverkar risken för utfällning.

Faktor	Förklaring
Tid	Tidsaspekten avgör främst om utfällningspotential kan observeras och leda till förebyggande åtgärder.
Vattenföring	Mängden vatten avgör hur mycket metalljoner som transporteras till tunneln och därmed hur stor volym utfällningar som kan bildas.
Bergart	Tillför grundvattnet metalljoner genom vittring.
Bakterier & Virus	Bakterier medverkar både vid vittringsprocesser och vid utfällning. Virus motverkar bakterier och begränsar därmed mängden utfällningar.
pH	Påverkar vittringsgrad samt vilka bakterier som förekommer och om utfällning sker rent kemiskt eller med hjälp av bakterier.
Eh (redox)	Påverkar om kemisk eller biologisk utfällning dominerar, samt om miljön är gynnsam eller inte för olika bakterier.
Mängd cementinjektering	Tillför kalcium till grundvattnet samt påverkar pH.
Kolsyra	Bidrar till vattnets vittringsförmåga.
Temperatur	Påverkar vilka bakterier som förekommer.
Bergtäckning över tunnel	Påverkar vattnets uppehållstid i berggrunden och därmed bl.a. syrehalt samt jonstyrka hos grundvattnet.
Markförhållanden över tunnelsträckning	Om organiskt material förekommer i stor mängd så bidrar det till reducerande förhållanden, vilket ökar risken för höga halter järn i grundvattnet.
Bergbultar	Kan tillföra metalljoner till grundvattnet p.g.a. korrosion.

## Referenser

- Albino B, Carlsson D, (2003) *Bergbesiktning av Citytunneln*, Tyréns AB, Göteborg.
- Ambrosi J-P, Banwart S.A, Bateman K, Eisenlohr L, Griffault L, Gustafsson E, Hama K, Kotelnikova S, Lartigue J-E, Michaud V, Milodowski A.E, Pedersen K, Puigdomenech I, Rivas Perez J, Trotignon L, Tullborg E-L, West J.M, Yoshida H, (2001), *O<sub>2</sub> depletion in granitic media*, TR-01-05, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Anderson C.R, Pedersen K, (2003), In situ growth of Gallionella biofilms and partitioning of lanthanides and actinides between biological material and ferric oxyhydroxides, *Geobiology*, Vol 1, Upplaga 2, Sid 169-178.
- Andersson A-C, (1991), *Förekomst av järn i grundvatten*, Publikation 2:91, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Andrén A, (2004), *Köldinträngning och istillväxt i järnvägstunnlar*, Förstudie, Rapport BB 04-05, Banverket, Borlänge.
- Andrén A, (2006), *Degradation of Rock and Shotcrete Due to Ice Pressure and Frost Shattering*, 2006:19, Luleå University of Technology, Luleå.
- Bazylnski D.A, Frankel R.B, (2003), Biologically Induced Mineralization by Bacteria, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Vol 54:1, Sid 95-114.
- Bonnefoy V, Bruscella P, Guacunano M, Holmes D.S, Inostroza C, Jedlicki E, Levicán G, (2002), Characterization of the petI and res Operons of Acidithiobacillus ferrooxidans, *Journal of Bacteriology*, Vol 184, Nr 5, Sid 1498-1501.
- Brömssen M. von, Gunnemyr L, Jonasson S, Lindstrand O, (2007), *Modeller för transport och spridning av föroreningar fas 2*, Rapport 5692, Naturvårdsverket, Stockholm.
- Bäckblom G, Christiansson R, Lagerstedt L, (2004), *Choice of rock excavation methods for the Swedish deep repository for spent nuclear fuel*, R-04-62, SKB - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm.
- Dalmalm T, (2004), *Choice of Grouting Method for Jointed Hard Rock based on Sealing Time Predictions*, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Deinema M.H, Mulder E.G, Veen W.L. van, (1978), The Sphaerotilus-Leptothrix Group of Bacteria, *Microbiological Reviews*, Vol 42, Nr 2, Sid 329-356.
- Delin H, Thelander T, (2007), Kartområdena 16C Idre, 16D Lofsdalen NV och SV samt 17C Funäsdalen SV och SO, *Berggrundsgeologisk undersökning – Sammanfattning av pågående verksamhet 2006*, SGU – Rapporter och meddelanden 126, Sid 146-160.

- Drever J.I, (1997), *The Geochemistry of Natural Waters – Surface and Groundwater Environments*, Third Edition, Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River.
- Edrud P, Svensson H, (2007), *Design och uppföljning av injektering i berg - En fältstudie av dropptätning i två större järnvägstunnlar*, 2007:4, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Eydal H.S.C, Ferris F.G, Kyle J.E, Pedersen K, (2008), Viruses in granitic groundwater from 69 to 450 m depth of the Äspö hard rock laboratory, Sweden, *The ISME Journal, International Society for Microbial Ecology*, Vol 2, Utgåva 5, Sid 571-574.
- Faure G, (1998), *Principles and applications of geochemistry*, Second edition, Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River.
- Fetter C.W, (2001) *Applied Hydrogeology*, Fourth Edition, Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River.
- Fredriksson A, Johansson J, Persson L, Stille B, (1996), *Ringen & Yttre Tvärleden, Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Slutrapport, Dräner för bergtunnlar – Funktion och utformning*, Vägverket, Stockholm.
- Fredriksson A, Persson L, (1996), *Ringen & Yttre Tvärleden, Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport nr 5, Dränfunktion vid kyla*, Vägverket, Stockholm.
- Ghiorse W.C, Siering P.L, (1996), Phylogeny of the Sphaerotilus-Leptothrix Group Inferred from Morphological Comparisons, Genomic Fingerprinting, and 16S Ribosomal DNA Sequence Analyses, *International Journal of Systematic Bacteriology*, Vol 46, Nr 1, Sid 173-182.
- Ghiorse W.C, Siering P.L, (1997), Development and Application of 16S rDNA-Targeted Probes for Detection of Iron- and Manganese-Oxidizing Sheathed Bacteria in Environmental Samples, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol 63, Nr 2, Sid 644-651.
- Hargelius H, (2006), *Dräner i tunnlar för vatten och frostsäkring – Inventering baserad på litteratur, intervjuer och fältstudier*, SveBeFo Rapport 77, SveBeFo, Stockholm.
- Hirsch P, Schweisfurth R, Völker H, (1977), Morphology and Ultrastructure of Crenothrix polyspora Cohn, *Journal of Bacteriology*, Vol 131, Nr 1, Sid 306-313.
- Hultman B, Levlin E, Westlund L, (1996), *Rening av avloppsslam från tungmetaller och organiska miljöfarliga ämnen*, Rapport 1996-08, Svenska Vatten- och Avloppsverksföreningen, VAV, Stockholm.
- Johansson J, Stille B, (1996), *Ringen & Yttre Tvärleden, Test av dräner i tunnel vid Hornsberg, Delrapport nr 4, Dränfunktion vid igensättning*, Vägverket, Stockholm.

- KASAM, (2001), *Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2001*, SOU 2001:35, Fritzes Offentliga Publikationer, Stockholm.
- Kelly D.P, Wood A.P, (2000), Reclassification of some species of Thiobacillus to the newly designated genera Acidithiobacillus gen. nov., Halothiobacillus gen. nov. and Thermithiobacillus gen. nov., *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, Vol 50, Sid 511-516.
- Kusano T, Rawlings D.E, (1994), Molecular Genetics of Thiobacillus ferrooxidans, *Microbiological Reviews*, Vol 58, Nr 1, Sid 39-55.
- Lindblad-Pässe A, (1986), *Järnutfällningsproblem i grundvattenvärmsystem*, Byggnadsforskningsrådet rapport R109:1986, Liber Tryck AB, Stockholm.
- Lindblom U, (1999), *Bergbyggnadsteknik*, Kurslitteratur vid kursen i Bergbyggnadsteknik 1999, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Lindström M, Lundqvist J, Lundqvist T, (2000), *Sveriges geologi från urtid till nutid*, Andra upplagan, Studentlitteratur, Lund.
- Marshak S, (2001), *Earth: Portrait of a Planet*, W.W. Norton & Company Inc, New York.
- Miljösamverkan Älvsborg, (1997), *Handledning plastadditiv*, Projektbeskrivning.
- Mossmark F, (In press) *Vattenkemisk miljö och dess långsiktiga påverkan på injektering och det bärande huvudsystemet i undermarksanläggningar*.
- Nesse W.D, (2000), *Introduction to mineralogy*, Oxford University Press, New York.
- Salomonsson M, (2001), *Utvärdering av manganavskiljningen i Söndrums vattenverk*, Luleå Tekniska Universitet, Luleå.
- SKB, (2002), *Mikrober*, Informationsblad om mikrober
- SKB, (2004), *FUD-program 2004, Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering av kärnavfall, inklusive samhällsforskning*, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SNA, (2002), *Sveriges Nationalatlas – Berg och jord*, Tredje utgåvan, Sveriges Nationalatlas Förlag, Italien.
- Svensson M, (2007), *Vattenkvalitén i Fredstorpsbäcken – dikad bäck på fastigheten Rämningstorp i Skara kommun*, 2007:4, Sveriges Lantbruksuniversitet, Umeå.
- Vägverket, (2000), *Tätning av bergtunnlar – förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser*, 2000:101, Vägverket, Borlänge.
- Vägverket, (2001), *Tätning och frostsäkring av tunnlar*, Förstudie till FoU-ramprojekt, Vägverket, Borlänge.

Vägverket, (2004), *Tunnel 2004*, 2004:124, Vägverket, Borlänge.

Vägverket, (2005), *Tunnlar i berg och betong*, Informationsmaterial om Norra Länken, EO Print, Stockholm.

**Källor på internet** (Samtliga använda senast 2008-05-08):

Citytunneln i Malmö:

[www.citytunneln.se](http://www.citytunneln.se)

DOW Products and Services:

[www.dow.com](http://www.dow.com)

Gold Fields BIOX:

[www.bioxgf.co.za](http://www.bioxgf.co.za)

Herrenknecht AG:

[www.herrenknecht.com](http://www.herrenknecht.com)

Idaho Museum of Natural History:

<http://imnh.isu.edu>

Journal of Earth System Science Education, JESSE:

[www.jesse.usra.edu](http://www.jesse.usra.edu)

MicrobeWiki:

<http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/MicrobeWiki>

Nationellt resurscentrum för biologi och bioteknik, Uppsala Universitet i samarbetet med SLU, Sveriges Lantbruksuniversitet:

[www.bioresurs.uu.se](http://www.bioresurs.uu.se)

Polybase AB:

[www.polybase.se](http://www.polybase.se)

Rocks And Minerals 4 U:

[www.rocksandminerals4u.com](http://www.rocksandminerals4u.com)

SLU, Sveriges Lantbruksuniversitet:

[www.slu.se](http://www.slu.se)

**Muntliga källor:**

Bo Blixt, Göteborg Energi AB

Håkan Thorén, WSP

Lars Jönsson, Banverket

# Bilaga, sid 1/4

(Drän igensatt av rödbruna utfällningar)

## Analysrapport

AnalyCen 

NCC Construction Sverige AB  
NCC Teknik  
405 14 Göteborg

Rapport utfärdad av  
ackrediterat laboratorium

Report issued by  
Accredited Laboratory



Journalnr	V048359-07	Sida 1 (1)	
Kundnr			
Provtyp	Grundvatten		
Uppdragsmärkning	7024528		
Provtagare/referens	Jim Ekliden	Provtagningsdatum	2007-12-06
		Provet ankom	2007-12-06
		Analysrapport klar	2007-12-17
Provets märkning	Källtorp 1+638		

Analysnamn	Resultat	Enhet	Mäto.	Ref/instr.	Ort
Grumlighet storlek	Svag			SLV 900101	L
Grumlighet art	Gul opalescens			SLV 900101	L
Lukt styrka vid 20°C	Ingen			SLV 900101	L
Färgtal	46	mg Pt/l	± 20 %	SS EN ISO 7887:3 mod	L
Kemisk syreförbrukn, COD-Mn	2.7	mg/l	± 25 %	F.d. SS028118-1	L
pH	7.7		± 3 %	SS 028122-2.Titro.	L
Alkalinitet	140	mg HCO <sub>3</sub> /l	± 10 %	SS-EN ISO 9963-2	L
Konduktivitet	99	mS/m	± 10 %	SS EN 27888	L
Hårdhet total	5.2	dH		Ber. värde (Ca + Mg)	L
Ammonium-nitrogen	0.90	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Nitrat-nitrogen	<0.1	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Nitrit-nitrogen	<0.002	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Fosfatfosfor	0.0070	mg/l	± 30 %	Konelab	L
Klorid	210	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Fluorid	0.52	mg/l	± 25 %	Konelab	L
Sulfat	41	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Kalcium Ca	22	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Koppar Cu	<0.02	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Järn Fe	0.80	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Kalium K	7.4	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Magnesium Mg	9.3	mg/l	± 15 %	ICP-AES	L
Mangan Mn	0.31	mg/l	± 15 %	ICP-AES	L
Natrium Na	130	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L



Paola Nilson, kemist

0510-88849, telefontid 14.00-16.00

Metallerna är analyserade direkt på konserverat prov.

Förklaring till förkortningar och \*, se omstående sida.

NCC Construction Sverige AB  
 NCC Teknik  
 405 14 Göteborg

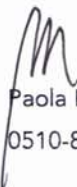
Rapport utfärdad av  
 ackrediterat laboratorium

Report issued by  
 Accredited Laboratory



Journalnr	V048360-07	Sida 1 (1)	
Kundnr			
Provtyp	Grundvatten		
Uppdragsmärkning	7024528		
Provtagare/referens	Jim Ekliden	Provtagningsdatum	2007-12-06
		Provet ankom	2007-12-06
		Analysrapport klar	2007-12-17
Provets märkning	Källtorp 1+643		

Analysnamn	Resultat	Enhet	Mäto.	Ref/instr.	Ort
Grumlighet storlek	Ingen			SLV 900101	L
Lukt styrka vid 20°C	Ingen			SLV 900101	L
Färgtal	7	mg Pt/l	± 20 %	SS EN ISO 7887:3 mod	L
Kemisk syreförbrukn, COD-Mn	2.7	mg/l	± 25 %	F.d. SS028118-1	L
pH	7.9		± 3 %	SS 028122-2.Titro.	L
Alkalinitet	83	mg HCO <sub>3</sub> /l	± 10 %	SS-EN ISO 9963-2	L
Konduktivitet	43	mS/m	± 10 %	SS EN 27888	L
Hårdhet total	3.2	dH		Ber. värde (Ca + Mg)	L
Ammonium-nitrogen	0.10	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Nitrat-nitrogen	0.18	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Nitrit-nitrogen	<0.002	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Fosfatfosfor	0.0060	mg/l	± 30 %	Konelab	L
Klorid	68	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Fluorid	0.38	mg/l	± 25 %	Konelab	L
Sulfat	24	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Kalcium Ca	14	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Koppar Cu	<0.02	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Järn Fe	<0.02	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Kalium K	4.7	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Magnesium Mg	5.3	mg/l	± 15 %	ICP-AES	L
Mangan Mn	0.011	mg/l	± 15 %	ICP-AES	L
Natrium Na	48	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L

  
 Paola Nilson, kemist  
 0510-88849, telefontid 14.00-16.00



NCC Construction Sverige AB  
NCC Teknik  
405 14 Göteborg


Rapport utfärdad av  
ackrediterat laboratorium

Report issued by  
Accredited Laboratory



Journalnr	V048361-07	Sida 1 (1)	
Kundnr			
Provtyp	Grundvatten		
Uppdragsmärkning	7024528		
Provtagare/referens	Jim Ekliden	Provtagningsdatum	2007-12-06
		Provet ankom	2007-12-06
		Analysrapport klar	2007-12-17
Provets märkning	Källtorp 3+072		

Analysnamn	Resultat	Enhet	Mäto.	Ref/instr.	Ort
Grumlighet storlek	Ingen			SLV 900101	L
Lukt styrka vid 20°C	Ingen			SLV 900101	L
Färgtal	<5	mg Pt/l	± 20 %	SS EN ISO 7887:3 mod	L
Kemisk syreförbrukn, COD-Mn	1.9	mg/l	± 25 %	F.d. SS028118-1	L
pH	7.2		± 3 %	SS 028122-2.Titro.	L
Alkalinitet	260	mg HCO3/l	± 10 %	SS-EN ISO 9963-2	L
Konduktivitet	108	mS/m	± 10 %	SS EN 27888	L
Hårdhet total	11	dH		Ber. värde (Ca + Mg)	L
Ammonium-nitrogen	0.082	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Nitrat-nitrogen	0.17	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Nitrit-nitrogen	<0.002	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Fosfatfosfor	0.0090	mg/l	± 30 %	Konelab	L
Klorid	190	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Fluorid	<0.2	mg/l	± 25 %	Konelab	L
Sulfat	33	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Kalcium Ca	50	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Koppar Cu	<0.02	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Järn Fe	<0.02	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Kalium K	7.4	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Magnesium Mg	18	mg/l	± 15 %	ICP-AES	L
Mangan Mn	1.0	mg/l	± 15 %	ICP-AES	L
Natrium Na	100	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L

  
Paola Nilson, kemist  
0510-88849, telefontid 14.00-16.00

## Analysrapport

NCC Construction Sverige AB  
NCC Teknik  
405 14 Göteborg

Rapport utfärdad av  
ackrediterat laboratorium

Report issued by  
Accredited Laboratory



Journalnr	V048362-07	Sida 1 (1)	
Kundnr			
Provtyp	Grundvatten		
Uppdragsmärkning	7024528		
Provtagare/referens	Jim Ekliden	Provtagningsdatum	2007-12-06
		Provet ankom	2007-12-06
		Analysrapport klar	2007-12-17
Provets märkning	Källtorp 3+172		

Analysnamn	Resultat	Enhet	Mäto.	Ref/instr.	Ort
Grumlighet storlek	Ingen			SLV 900101	L
Lukt styrka vid 20°C	Ingen			SLV 900101	L
Färgtal	<5	mg Pt/l	± 20 %	SS EN ISO 7887:3 mod	L
Kemisk syreförbrukn, COD-Mn	1.0	mg/l	± 25 %	F.d. SS028118-1	L
pH	8.3		± 3 %	SS 028122-2.Titro.	L
Alkalinitet	240	mg HCO <sub>3</sub> /l	± 10 %	SS-EN ISO 9963-2	L
Konduktivitet	100	mS/m	± 10 %	SS EN 27888	L
Hårdhet total	10.0	dH		Ber. värde (Ca + Mg)	L
Ammonium-nitrogen	0.043	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Nitrat-nitrogen	0.14	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Nitrit-nitrogen	<0.002	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Fosfatfosfor	0.0090	mg/l	± 30 %	Konelab	L
Klorid	150	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Fluorid	0.20	mg/l	± 25 %	Konelab	L
Sulfat	54	mg/l	± 15 %	Konelab	L
Kalcium Ca	45	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Koppar Cu	<0.02	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Järn Fe	<0.02	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Kalium K	15	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L
Magnesium Mg	16	mg/l	± 15 %	ICP-AES	L
Mangan Mn	<0.01	mg/l	± 15 %	ICP-AES	L
Natrium Na	94	mg/l	± 10 %	ICP-AES	L

  
Paola Nilson, kemist

0510-88849, telefontid 14.00-16.00