

## Kvävehalter i berg

**Kunskapssammanställning bakgrundshalter.  
Fallstudie och vattenprovtagningar TASS,  
Äspö**

Karsten Håkansson, SWECO AB

Januari 2016

**Svensk Kärnbränslehantering AB**

Swedish Nuclear Fuel  
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm  
Phone +46 8 459 84 00



ISSN 1402-3091

SKB R-10-32

ID 1518860

# **Kvävehalter i berg**

## **Kunskapssammanställning bakgrundshalter. Fallstudie och vattenprovtagningar TASS, Äspö**

Karsten Håkansson, SWECO AB

Januari 2016

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).  
Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna. SKB kan dra andra  
slutsatser, baserade på flera litteraturkällor och/eller expertsynpunkter.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från [www.skb.se](http://www.skb.se).

© 2016 Svensk Kärnbränslehantering AB

# Sammanfattning

Denna rapport är en sammanställning om kväveföreningar i berg och analys av kvävedata framtagna i samband med drivningen av TASS-tunneln i Äspölaboratoriet (mellan 2007 och 2009). Syftet är att beskriva förväntade halter av kväve i bergmiljön efter sprängning och i samband med aktiviteter under och efter sprängningsarbeten. Konsekvenser av olika hantering av sprängmassor diskuteras också.

En inledande litteratursammanställning identifierade kunskapsluckor, bl a avseende halter av lakbart kväve i sprängmassor och långtidsmätningar av kvävehalter efter sprängning. Av litteraturstudien framgick också att resthalter av kväve (odetonerad eller i form av spill) var högst varierande, och inte direkt kunde sättas i samband med vare sig typ av sprängmedel eller använd mängd, vilket också minskar möjligheten att göra meningsfulla massbalanser.

På grund av de identifierade kunskapsluckorna omfattade fallstudien bestämning och analys av totalhalter och utlakbara mängder från sprängmassor från TASS-tunneln, samt analys av inträngande sprickvatten och vatten från sulan. Inom fallstudien har utvecklingen av kvävehalter över tid undersökts. Dessutom har bestämning av lakbarheten av utvalda kväveformer (nitrat, nitrit och ammonium) gjorts, och andelen vattenlösligt kväve har bedömts. Halterna av kvarvarande kväve i berg i TASS-tunneln har beräknats med syfte att utgöra ett underlag för att bedöma haltutveckling av kväve i ett tänkt slutförvar. Denna bedömning baseras på platsspecifika förhållanden aktuella vid TASS-tunneln, bl a liten omfattning av spränginducerade sprickor, rensning av sula, låg vatteninträning.

En total kvävemassbalans i vatten i TASS-tunneln kunde inte göras främst på grund av låg samstämmighet mellan flöden och kvävehalter. Lakförsök indikerar att det kvarvarande kvävet i sprängstems-massorna är lättlakat. Detta stöds av två litteraturstudier som har använt sig av en metodik snarlik de standardiserade försöken i fallstudien. Utlakningen förefaller vara en snabb process.

Resultaten från analyser av sprickvatten från TASS-tunneln visar på halter i samma storleksordning som de som kan förväntas i bergbrunnar. Halterna var konstanta eller för vissa sprickor avtagande under den tid mätningar skedde (3–9 månader för olika sprickor). Även halter från en rensad och tvättad sula visade resultat i samma nivå (0,4 mg tot-N/L).

Stora mängder av kväve kan finnas kvar i sprängmassor efter sprängning, från bildad spränggas men mer sannolikt från odetonerat sprängmedel och spill. Bedömningar baserade på litteraturstudier anger att mellan 1 och 10 % av sprängmedlets kväveinnehåll kan hamna i länshållningsvattnet. Minskningen av kvävehalter i länshållningsvatten är, om vatten finns tillgängligt, av allt att döma en snabb process. Motstridiga uppgifter finns i litteraturen om mängden kvarstannande gas i berget. Platsspecifika förhållanden har troligen stor betydelse. Resultat från TASS-tunneln visar att halterna i det länshållningsvatten som analyserades var en till två storleksordningar högre än halterna i det vatten som kom från sprickor. Detta indikerar att de uppkomna halterna i första hand beror på kväve i länshållningsvattnet och i mindre utsträckning beror på uttransport av spränggaser lösta i grundvatten.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	7
<b>2</b>	<b>Syfte och omfattning</b>	9
<b>3</b>	<b>Metodik</b>	11
3.1	Litteratursökning	11
3.2	Fallstudie TASS-tunneln	11
3.2.1	Vattenprovtagning	11
3.2.2	Analyser och data	11
3.2.3	Provtagning sprängmassor	11
3.2.4	Lakförsök	12
<b>4</b>	<b>Naturliga kvävehalter i berggrund</b>	13
4.1	Bergmassor	13
4.2	Grundvatten	13
<b>5</b>	<b>Kväveinnehåll i sprängmedel</b>	15
<b>6</b>	<b>Resthalter av kväve i olika media efter sprängning</b>	17
6.1	Gaser	17
6.1.1	Gassammansättning	17
6.1.2	Bildning av spränggaser	18
6.1.3	Innesluten gas	18
6.2	Sprängmassor	19
6.2.1	Förekomstformer	19
6.2.2	Halter och mängder	20
6.3	Vatten	21
6.3.1	Förekomstformer	21
6.3.2	Halter	21
<b>7</b>	<b>Diskussion och sammanfattning av kunskapssammanställningen</b>	25
<b>8</b>	<b>Resultat fallstudie TASS</b>	27
8.1	Genomgång av tillgängliga data från Sicada	27
8.2	Totalhalter sprängt berg	27
8.3	Lakförsök	27
8.4	Inträngande vatten	29
8.4.1	Borrhålsvatten	29
8.4.2	Sprickvatten	29
8.4.3	Sulvatten	31
<b>9</b>	<b>Kvarvarande halter av kväve i berg från sprängd tunnel, TASS, Äspölaboratoriet</b>	33
9.1	Bakgrund	33
9.2	Förutsättningar/antaganden	33
9.3	Tillvägagångssätt och Resultat	33
9.3.1	Specifik yta	34
9.3.2	Lakningar	36
9.4	Alt 1 Bedömning av maximal kvävetillförsel	37
9.4.1	Kvävetillförsel från sprickytor	37
9.4.2	Kvävetillförsel från gas i sprickor	38
9.4.3	Bedömning av osäkerheter	38
9.5	Alt 2 Bedömning av kvävehalter från tidsserier	38
9.5.1	Kvävetillförsel från vatten från sprickor	38
9.5.2	Kväve från icke-vattenförande sprickor	39
9.5.3	Kvävetillförsel från gas i sprickor	39
9.5.4	Bedömning av osäkerheter	39

9.6	Slutsatser	39
<b>10</b>	<b>Slutsatser</b>	41
<b>11</b>	<b>Rekommendationer</b>	43
	<b>Referenser</b>	45

# 1 Introduktion

Kunskap om halter av kväve i berg uppkomna naturligt eller till följd av mänsklig verksamhet är relevant för att kunna bedöma risken för spänningskorrosion till följd av höga kvävehalter, som därmed skulle kunna påverka möjligheten för ett säkert slutförvar. Korrosion är ett samlingsbegrepp då metaller reagerar med omgivningen genom oxidation av metallytorna. Korrosionshastigheten är beroende av materialets egenskaper och omgivningens kemiska egenskaper. Spänningskorrosion på koppar kan orsakas av kväveföreningarna ammonium eller nitrit (det senare eventuellt omvandlat från nitrat) (King et al. 2001, Arilahti et al. 2000).

Vidare, är det av stor vikt att ha kunskap och kontroll över kvävehalter i grundvattnet eftersom det är ett viktigt substrat/närsalt som ingår i näringskedjan i den mikrobiella aktiviteten i grundvattnet. Höga halter av kväve kan påskynda dessa processer som kan leda till ökad korrosion av koppar-kapslarna i det slutliga förvaret.

De flesta sprängmedel innehåller kväve i form av nitrat och ammonium. Under och efter detonation tillförs dessa kväveformer till omgivningen i form av gas och icke detonerade sprängämnesrester. Detta leder till att t ex länsvatten från sprängområdet samt bergmassorna är kontaminerade. Om kväveformerna blir kvar i berget kan risk för korrosion föreligga beroende på i vilka halter de förekommer i, samt beroende på deras kemiska form.

En kunskapssammanställning utfördes avseende halter av kväve i berg och uppkomna halter i samband med bergarbeten. Resultaten visade bland annat att det förekommer kväve i länsvallningsvatten, som kan bero på antingen utlakning från sprängmassor eller på utlakning från spränggaser som finns i sprickor i berget.

Under arbetet med sammanställningen har det visat sig uppkomma frågor som inte tydligt har kunnat besvaras med ledning av litteraturen. De flesta sprängplatser som gicks igenom saknade data tillräckliga för massbalansberäkningar, uppföljningen av halter i dräneringsvattnet över tid förekom nästan inte, analys av ventilationsluft gjordes endast i syfte att kontrollera arbetsmiljön. Detta medförde att en fallstudie genomfördes i samband med drivningen av TASS-tunneln i Äspö. Syftet var att i samband med drivning av tunneln med dess olika aktiviteter – sprängning, borrhning, injektering, hantering av sprängmassor osv – analysera kvävedata i olika media. TASS-tunneln är en tunnel som drivits på 450 m djup för att bland annat undersöka om silicasol är ett lämpligt injekteringsmedel som kan användas vid de höga vattentryck som råder vid förvarsdjup.

En viktig kvarstående frågeställning var frågan om hur stor andel av spränggaserna som stannar kvar i berget och hur stor andel av de olika kväveformerna (t ex nitrat och ammonium) som adsorberas på sprängmassor. För att bedöma andelen av kväve från gas eller från bergkross beslöts därför att lakförsök skulle utföras i samband med sprängning, och samtidigt skulle tidsserier av kväveinnehåll i vatten från utträngande sprickor tas fram på samma plats. Genom jämförelse mellan totalanalys av kväve i fast material och lakbart kväve bedömdes vidare att mängden vattenlösligt kväve skulle kunna uppskattas.

Föreliggande rapport innehåller resultaten från TASS-tunneln som fanns tillgängliga per den 2010-11-10 (SKB:s databasutdrag Sicada 11-033).

## 2 Syfte och omfattning

Syftet med kunskapssammanställningen var att beskriva förväntade halter av kväve i bergmiljön under och efter sprängningsarbeten. Förändringar av kvävehalter över tiden ingick också i arbetet.

Syftet med fallstudien var att utgående från kunskapssammanställningen, identifiera och undersöka frågeställningar som inte var klarlagda i kunskapssammanställningen. De data som användes, omfattade undersökningar av olika media från TASS-tunneln på Äspö och olika typer av aktiviteter.

- Tidsserier av data studerades för att kunna dra generella slutsatser i fråga om minskningstakten av kvävehalter i länshållningsvattnet över tiden.
- Lakningar av sprängmassor gjordes för att bättre kunna kvantifiera bidraget av korrosivt kväve från spränggaser, som stannar kvar i berget, och kväve adsorberat på sprängmassor.
- Andelen vattenlösligt kväve av totalt tillgängligt uppskattades genom jämförelser mellan totalhalter kväve i utsprängt berg och lakbart kväve.

## 3 Metodik

### 3.1 Litteratursökning

Information om kväve har sökts (på engelska) både på internet och i vetenskapliga databaser med något av sökorden *nitrogen*, *nitrate*, *ammonium*, *nitrite* i kombination med *ore*, *quarry*, *tunnel*, *explosive residues and blasting*. Antalet positiva träffar var antingen mycket få, alternativt erhöles många sökträffar där resultaten inte var kopplade till föreliggande frågeställning. Detta innebär att litteratursökningen har varit ett mindre tidseffektivt arbete.

Ett antal examensarbeten inom ämnesområdet har publicerats på Mitthögskolan (Berg och Blom 2001), Chalmers Tekniska Högskola (Ekblad 1995) samt flest från Luleå Tekniska Universitet (Forsberg och Åkerlund 1999, Johansson 2002, Sjölund 1997). Den mest omfattande sammanställning som har påträffats är rapporten *Vattenburna kväveutsläpp från sprängning och sprängstensmassor* (Tilly et al. 2005). För att hitta mer detaljerad information kring ämnet har ovan nämnda publikationers referenslistor använts för att effektivisera sökandet.

Utöver ovan nämnda informationskällor har kontakt tagits med personer på företag (LKAB, Orica Mining service, Skanska, KIMIT, NCC, Boliden, Dragon Mining, Vägverket, Banverket), på större infrastrukturprojekt (Citybanan och Botniabanan), organisationer (Stockholm Vatten AB) och på länsstyrelser (Västra Götaland, Västerbotten, Stockholm), som har kommit i kontakt med frågeställningen. Resultatet av förfrågningarna har mynnat i uppgifter från ett antal kontaktpersoner.

### 3.2 Fallstudie TASS-tunneln

#### 3.2.1 Vattenprovtagning

Aktiviteterna för vattenprovtagning i TASS har haft flera syften; förutom att följa kvävevariationerna i olika delar av tunnel och drivningsaktiviteter, även att utgöra en bas för miljökontroll inklusive påverkan från olika experiment. Provtagning och analys av kolloider har också genomförts i drivningens initialskede.

Kärnbrorrhål är prover som tagits i det område där tunneln sen skulle byggas, vilket innebär att de skulle kunna representera bakgrundshalter. Två prover med analys av kvävehalter finns tillgängliga. Skärnbrorrhål anlagda inför ny omgång sprängning samt läckage från skärnbrorrhål har sammanslagits till en grupp, totalt har 12 analyserats med avseende på kvävehalter.

Provtagning i TASS-tunneln (sulan och sprickor) beskrivs i avsnitt 8.1.

#### 3.2.2 Analyser och data

Från Sicada databasen erhöles kvalitetsgranskade data i ett par omgångar dels 2009-05-18 och dels 2010-11-10. De dataset som erhöles från Sicada innehöll i huvudsak vattenkemi för TASS-tunneln, "activity log" och "activity comments" (databasutdrag Sicada 11-033).

Huvuddelen av vattenkemianalyserna har genomgått analys enligt SKB kemiklass 5 eller SKB kemiklass 4, med tillägg av kväveformer (nitrat, nitrit och ammonium). De vattenprover som analyserats har kommit från olika delar av tunneln. Parametrarna som analyseras för varje kemiklass beskrivs i Smellie et al. (2002, Table 3-1).

#### 3.2.3 Provtagning sprängmassor

Provtagning av massor efter sprängning utfördes vid TASS-tunneln i Äspö 2008-12-15. Provtagningen utfördes efter sprängning i tunnelavsnittet 77,14 m till 80,73 m efter någon timmes ventilation av bildade spränggaser. Provuttag skedde på tre ställen i den brutna tunneln vid de ungefärliga positionerna 60 m (TASS1), 70 m (TASS2), respektive 80 m (TASS3) mätt ifrån tunnelns start. Provuttaget gick till så att större stenar (600–200 mm) lyftes upp och det material som fanns på ytan av stenen (grus,



sand och silt) fördes för hand ned i en plastpåse av polyeten. Mindre stenar och grovgrus (60–20 mm) plockades bort från proven. I laboratoriet torrsiktades proverna i tre fraktioner; 0–2 mm, 2–10 mm och större än 10 mm, som vägdes. Bestämning av totalhalt utfördes på TASS2 av fraktionerna 0–2 mm samt 2–10 mm, se tabell 8-1. Analys utfördes av torrsubstans, glödförlust, de vanligast förekommande mineralen, spårämnen samt totalkväve. På alla prover utfördes skakförsök av de siktade fraktionerna 0–2 mm samt 2–10 mm. Laklösningarna från skakförsöken analyserades med avseende på ungefärligen samma uppsättning parametrar som totalhaltsanalyserna. I tabellen nedan har ämnena sorterats så att en jämförelse kan göras mellan parametrar som har analyserats i bägge försöken.

**Tabell 3-1. Översikt över analyser utförda på bergkross efter sprängning i TASS-tunnel 2008-12-15.**

	Huvudämnen	Gemensamma spårämnen	Skilda ämnen	Övrigt
Lakförsök	Ca, Fe, K, Mg, Na, S, tot-N*	Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn	Sb, Se	pH, elektrisk konduktivitet, DOC, HCO <sub>3</sub> , Cl, F, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N, turbiditet
Totalhalter	Ca, Fe, K, Mg, Na, S, tot-N*	Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn	Be, Nb, Sc, Sn, Sr, V, W, Y, Zr	Si, Ti

\* Summerat från NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>.

### 3.2.4 Lakförsök

Lakningar gjordes enligt en svensk standardmetod SS-EN 12457-2 vilket är enstegs lakförsök där förhållandet mellan laklösning och fast fas är 10. Laklösningen är demineraliserat, eller jonbytt eller destillerat vatten som uppfyller att pH är mellan 5 och 7,5 samt el. kond. mindre än 0,5 mS/m, temperatur 20±5 °C. Dessa försök kallas oftast skakförsök men bygger på att prov samt vätska antingen vänds (end-over-end) mellan 5 och 10 ggr/min eller att man använder skakbord med 10 rpm. Avvikelser gentemot standard är att nedkrossning inte utfördes utan i stället torrsiktades materialen i fraktionerna 0–2 mm respektive 2–10 mm. Metoden används som ett enklare kontrolltest vid klassificering av avfall, och som ett av flera test t ex för att bestämma om farligt avfall kan deponeras eller måste behandlas före deponering. Den används t ex på förorenad jord eller fyllnadsmassor.

## 4 Naturliga kvävehalter i berggrund

### 4.1 Bergmassor

I allmänhet förekommer kväve inte som fasta föreningar i berggrunden. I naturligt berg är ursprunget till kväve det organiska material som fanns med vid bildningen och som sedan mineraliserats. I en sammanställning av Pitcairn et al. (2005) redogörs för de naturliga kvävehalter som återfinns i bergmassor. De högsta halterna återfinns i sedimentära och vissa metamorfa bergarter. Det totala kväveinnehållet i sedimentära bergarter kan enligt denna referens uppgå till 100–2800 mg/kg. Kväveinnehållet i metamorfa bergarter är ofta lägre då kväve avgår under ombildningsprocessen. Typiska halter ligger i storleksordning 30–900 mg/kg. Kväveinnehållet i eruptiva och vulkaniska bergarter är mycket lågt på grund av avsaknaden av organiskt material i bildningsprocessen. I granit kan man hitta 3–180 mg/kg (medel 45 mg/kg).

### 4.2 Grundvatten

Eftersom kväve normalt sett är ett bristämne som tas upp av vegetationen är också kvävehalterna relaterade till förekomst av organiskt material. I bergborrade brunnar är halterna organiskt material relativt låga och därmed är även naturliga halter i bergborrade brunnar oftast låga se SGU <http://www.sgu.se/sgu/>.

Även för grävda brunnar är kvävehalten ofta låg. De förhöjda halter som ibland mäts upp orsakas oftast av gödsling på jordbruksmark eller av påverkan från avlopp. I södra Sverige förekommer en ganska stor luftdeposition av kväve, eftersom en stor del av kvävet härrör från aktiviteter i Europa (vägtrafik, industrier) och transporteras hit med förhärskande västliga eller sydvästliga vindar.

Förekomstformen av kväve i brunnar är oftast som nitrat. I brunnar påverkade av avlopp eller gödsling kan ammonium förekomma samt nitrit genom reduktion av nitrat. En beskrivning av tillstånd med avseende på nitrat i brunnar görs i Naturvårdsverket (1999). Fem tillståndsklasser (1 = mycket låg halt, 2 = låg halt, 3 = måttlig halt, 4 = hög halt samt 5 = mycket hög halt) redovisas. I publikationen redovisas en jämförelsehalt som anges representera ett naturligt tillstånd utan mänsklig påverkan. Ett jämförvärde definieras som utgör gränsen mellan klass 1 och klass 2 i denna beskrivning. Denna anges till 0,5 mg NO<sub>3</sub>-N/L. Av publikationen framgår emellertid också att halterna varierar beroende på typområden (t ex kristallin berggrund, morän eller isälvsavlagringar). Jämförvärdet är satt så att 74 % av alla brunnsanalyser enligt SGUs databas (<http://www.sgu.se/sgu/>) har halter lägre än detta värde. Denna databas anger medianvärde för nitrat i jordbrunnar (n = 10571) till 3 mg/L och i bergbrunnar (n = 14008) till 1 mg/L. Dessa halter motsvarar 0,7 mg NO<sub>3</sub>-N/L, respektive 0,2 mg NO<sub>3</sub>-N/L.

## 5 Kväveinnehåll i sprängmedel

Sprängmedel kan delas upp i två olika kategorier beroende på deras sammansättning: enhetsprängämnen som består av en kemisk komponent, samt blandsprängämnen som består av en blandning av olika komponenter (Ekblad 1995). Exempel på enhetsprängämnen är nitroglycerin, nitroglykol, nitrocellulosa, dinitrotoluen samt trinitrotoluen. Blandsprängämnen kan i sin tur delas upp i plastiska sprängämnen, pulverformiga sprängämnen samt vattenhaltiga sprängämnen.

Nitratinnehållet i olika typer av blandsprängämnen härrör t ex från ammonium- och natriumnitrater. Andelen nitrat i olika typer av blandsprängämnen enligt Högström och Olin (1990) sammanställs i tabell 5-1. Kväve i blandsprängmedel kan även komma från exempelvis nitroglycerin, nitroglykol, nitrocellulosa samt nitroaromater, som utgör ytterligare komponenter.

Påverkan på kväveflöden av sprängning och sprängstensmassor har undersökts av Tilly et al. (2005). Enligt denna undersökning är huvuddelen av de sprängämnen som används i Sverige idag nitratbaserade, där det vanligaste sprängämnet består av ammoniumnitrat ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). Detta salt är mycket lösligt i vatten, och bidrar till att odetonerat sprängmedel läcker kväve till vatten. Sprängämnen kan vara av typen bulkemulsionsprängmedel som antingen tillverkas på plats (SME, site mixed emulsion) eller bulkmedel som känsliggörs i samband med att de pumpas in i borrhålet (SSE, site sensitized emulsion). Det enklaste kommersiella sprängmedlet är ANFO (Ammonium Nitrat och diesel Fuel Oil) som är ett sprängmedel som laddas för hand från en säck eller laddapparat. De övriga sprängämnen är paketerade produkter i form av dynamiter, emulsionsprängämnen eller specialprodukter.

Vid byggandet av Södra Länken har ett sprängmedel som kallas för SSE 01 använts (Mathiulakis 2000). Detta sprängmedel bestod av ca 60 % oorganiska nitrater, med ett totalt kväveinnehåll på 27 %. TOVEX är ett liknande sprängämne med aktiv substans i form av monometylaminnitrat och en totalkvävehalt på 23–24 %. I vissa fall används blandsprängmedel med dieselolja som inte innehåller något kväve (ANEX, HYDRANEX).

Försök utförda av Nitro Nobel visar att emulsionsmedlet Emulite är resistent mot vatten och endast låga halter kväve lakar ut vid vattenkontakt.

ANFO (AmmoniumNitrat och diesel FuelOil)-sprängämnet Prillit A och det nitroglykolbaserade sprängämnet Dynamex läckte däremot höga halter kväve (Forsberg och Åkerlund 1999). Dynamex är dock oftast väl förpackat, vilket innebär att kontakten med vatten minskar. Läckage från ANFO har också noterats av Grinder (2003) som beskriver tidsserier av totalkvävehalter vid Stäkettunneln. Vid tunnelbygget uppkom de högsta halterna när sprängmedlet ANFO användes. Vid Hjältatunneln (Berg och Blom 2001) var emellertid läckaget vid användandet av ANFO lågt i jämförelse med ett bulkemulsionsmedel. Handhavandet av sprängmedlet har emellertid en stor betydelse för läckaget. Undersökningar av Werneman et al. (2005) visar att användandet av sprängmedlet, ett bulkemulsionsmedel av typen SSE, gav mindre kväveutsläpp per kg laddning jämfört med t ex ANFO.

Av ovanstående framgår att inga generella slutsatser kan dras om vilka sprängmedel som avger mest kväve till omgivningen. Samma slutsatser har dragits av Tilly et al. (2005) som menar att hantering, sprängteknik och bergtekniska förhållanden är avgörande för kväveläckagets storlek och att mindre skillnader i olika sprängämnens kvävehalt är av underordnad betydelse.

**Tabell 5-1. Nitratinnehåll i olika typer av blandsprängämnen (% av massan, Högström och Olin 1990).**

Plastiska	Pulverformiga	Vattenhaltiga
35–65 %	75–97 %	50–85 %

## 6 Resthalter av kväve i olika media efter sprängning

### 6.1 Gaser

#### 6.1.1 Gassammansättning

Vid en ideal detonation avgår allt kväve till luften i form av kvävgas, N<sub>2</sub>. I realiteten är dock de flesta detonationer ofullständiga, vilket innebär att toxiska gaser som kväveoxid och kvävedioxid (NO<sub>x</sub>) kan bildas (Ekblad 1995). Sprängämnen som nitroglycerin (NG) och nitroglykol (EGDN) kan även ge upphov till gas som innehåller mindre mängder av själva komponenten kväve. Enligt Ekblad (1995) finns en viss risk att sprängämnet reagerar med berg som innehåller reaktiva komponenter (t ex sulfider), både före och under sprängning, vilket skulle kunna ge upphov till en ökad mängd föroreningar i gasen. I vilken omfattning detta kan ske och vilka ämnen som dylika reaktioner skulle ge upphov till var dock inte kartlagt vid denna tidpunkt.

Bland annat beroende på syretillgången kan både N<sub>2</sub> och NO ombildas till mer oxiderade former enligt:



Om höga halter NO<sub>2</sub> bildas i luften kan denna reagera med fukt i berget och spränggasen, vilket leder till att mindre mängder salpetersyra (HNO<sub>3</sub>) och salpetersyrilighet (HNO<sub>2</sub>) bildas (Ekblad 1995).

Om syretillförseln vid detonationen är dålig, kan ammoniak (NH<sub>3</sub>) bildas. Enligt Ekblad (1995) är dock denna form ej stabil i luften, utan reagerar sannolikt snabbt (inom 10–15 minuter) med surt vatten i spränggasen. Detta leder till att ammonium i vattenfas bildas enligt:



NH<sub>3</sub> kan även bildas om blandsprängmedel med ammoniumnitrat (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) reagerar med cement eller sprutbetong, enligt:



Vid denna reaktion kan bildningen av ammoniak pågå under lång tid och stora mängder kan alstras (Högström och Olin 1990). Enligt Tilly et al. (2005), förekommer avgång av ammoniak främst i länshållningsvatten, men kan även förekomma i sprängstensmassor som blandats med cementbase-rade tättningsmedel eller sprutbetong. Eftersom nitratjonen är förhållandevis stabil är det i första hand sprängämnets andel av ammoniumkväve som deltar i denna reaktion.

Spränggasens sammansättning varierar med de proportioner som anges i tabell 6-1. Sammansättningen beror på en rad olika faktorer (Högström och Olin 1990), t ex:

- Partikelstorlek.
- Detonationshastighet.
- Laddningsdiameter.
- Sprängämnets sammansättning.
- Kvalitetsvariationer i sprängämnet.
- Åldrings- och fuktskador.
- Inneslutning i borrhålet.
- Belastning vid detonation.
- Packningsgrad.
- Initiering.
- Omgivningens kemi.
- Utförandet av sprängningen.

**Tabell 6-1. Sammansättning av spränggas (Högström och Olin 1990).**

Komponent	Kemisk sammansättning	% av totalvolym spränggas
Vatten	H <sub>2</sub> O	35–65
Kvävgas	N <sub>2</sub>	20–30
Koldioxid	CO <sub>2</sub>	10–40
Vätgas	H <sub>2</sub>	0,5–10
Syrgas	O <sub>2</sub>	0,1–3,0
Metan	CH <sub>4</sub>	<0,5
Kolmonoxid	CO	0,5–10
Nitrösa gaser	NO <sub>x</sub>	0,1–2,0
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	0,0–0,1
Övriga ämnen		<0,1

### 6.1.2 Bildning av spränggaser

Enligt Ekblad (1995) kan 1 ton sprängämne ge upphov till bildandet av ca 1000 m<sup>3</sup> spränggas (vid T = 0 °C och P = 1 atm). Ca 10 % av denna volym kan utgöras av toxiska gaser, däribland NO<sub>x</sub>. Enligt en annan uppgift i samma rapport kan 1 kg sprängämne förorena upp till 1000 m<sup>3</sup> luft. Det framgår dock inte vilka kriterier som använts för att luften ska anses ”förorenad” (t ex överskridet gränsvärde i luft, etc).

I tabell 6-2 redovisas uppgifter från Nitro Nobel om bildning av spränggas för olika sprängmedel som de tillverkar (Forsberg och Åkerlund 1999). Vid försöket skedde detonation i homogent berg vid normal packningsgrad vid brytningsförhållanden med 43 mm hål, tunnelstross, och ett borrhål per skjutning.

### 6.1.3 Innesluten gas

Äldre undersökningar har visat att en mindre del (4–8 %) av bildade spränggaser återfinns i sprängmassorna (Persson et al. 1994). Ekblad (1995) redogör även uppgifter från ”sprängteknisk litteratur” (mer detaljerad referering till detta stycke saknas i rapporten) som gör gällande att upp till 60 % av gaserna kan stanna kvar i berget, varav 1/3 i sprängmassorna och 2/3 i själva berget. Dessa uppgifter ska enligt Ekblad ifrågasatts av andra referenser.

Mängden gas som pressas in i kvarvarande berg beror bl.a. på bergmaterialets struktur och hur kraftigt inspänt borrhålet varit (Högström och Olin 1990). Vid normalt sprängarbete anser emellertid författarna till skillnad från vad som angivits ovan av Ekblad att denna mängd spränggas kan negligeras.

**Tabell 6-2. Uppgifter från Nitro Nobel om bildning av spränggaser för olika sprängmedel. Sista kolumnen avser NO<sub>x</sub> i form av NO<sub>2</sub>, där densiteten för NO<sub>2</sub> i gasfas är 2,05 kg/normalkubikmeter (hämtad från Forsberg och Åkerlund 1999).**

Sprängämnestyp	CO (L/kg sprängämne)	NO <sub>x</sub> (L/kg sprängämne)	NO <sub>2</sub> kg/kg sprängämne
<i>Nitroglykolbaserade</i>			
GURIT och DYNAMEX	15–90	2	0,0041
<i>Emulsioner</i>			
EMULITE	8–20	<1	<0,0021
<i>ANFO</i>			
PRILLIT A	10–20	7–12	0,0144–0,0246

I LKABs gruva i Kiruna har kväveoxider i luft registrerats i samband med sprängning i berget (Forsberg och Åkerlund 1999). De genomförde två räkneexempel med syfte att beräkna kvävetillförsel från gas till gruvvatten. Baserat på mätningar i frånluftsventilation och med avräkning av fordonstillskott bedömde de att 0,6 % av den detonerade sprängämnesmängden bildade kväveoxider. De antog att 25 % av innesluten gas löser sig i vatten. Grunden för detta var en uppskattning av Sjölund (1997) som visade att 20–50 % av spränggaserna kan drivas ut genom en timmes bevattning av den nedskjutna bergmassan. Det sprängämne som användes var Kimulux R, ett emulsionssprängämne. I det ena exemplet studerades tillredningsarbeten. Det användes då totalt 31 000 kg sprängämne med ett innehåll av kväve motsvarande 7500 kg N. Slutsatserna var:

- 170 kg kväveoxider i form av NO<sub>2</sub> bildades,
- av dessa 170 kg stannade 14 kg kvar i det nedskjutna berget,
- av dessa 14 kg löser sig 3 kg och tillförs gruvvattnet dvs 0,9 kg räknat som N.

I det andra räkneexemplet studerades skivrasbrytning. I detta fall antogs att samma mängd nitrösa gaser bildas som i förra fallet, men av de bildade gaserna påträffades endast en mindre del i ventilationsluften, vilket tolkades som att en större andel av gaserna läckte via sprickzoner uppåt i berget. Samma sprängämne som vid tillredningsarbetena användes vid skivrasbrytningen. Den mängd sprängmedel som användes var dubbelt så stor som i första fallet:

- 340 kg kväveoxider i form av NO<sub>2</sub> bildades,
- av dessa 340 kg stannade 330 kg kvar i berget,
- av dessa 330 kg löser sig 80 kg och tillförs gruvvattnet dvs 25 kg räknat som N.

Exemplen var utformade med syftet att beskriva massbalanser av kväve från gruvan. I denna sammanställning ger de en indikation på att bergets sprickighet har stor betydelse för andelen kväve som stannar kvar i berget. Exempel 1:  $(14-3)/170 = 0,06$  och exempel 2:  $(330-80)/340 = 0,74$  visar att variationen kan vara stor (6 % i exempel 1 och 74 % i exempel 2). I tabell 6-3 nedan jämförs de olika uppgifter om kvarstannande gas i berget som framkommit vid litteraturstudien.

## 6.2 Sprängmassor

### 6.2.1 Förekomstformer

Vid upplösning av odetonerat sprängmedel som innehåller ammoniumnitrat (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) frigörs nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) och ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) som fastnar på bergytorna (Johansson 2002). Båda har en hög löslighet i vatten. Vid höga pH-värden kan ammonium övergå till ammoniak (NH<sub>3</sub>), som är en vattenlöslig gas (ekvation 3).

Bildandet av ammoniak underlättas således om berggrunden är kalkrik. Ammoniak kan också bildas om det förekommer betongkonstruktioner eller om vissa typer av injekteringsmedel använts. Både nitrat, ammonium och ammoniak kan omvandlas till andra kväveformer genom mikrobiologiska processer, men denna typ av omvandling omfattas ej av denna rapport.

**Tabell 6-3. Gasinnehåll i sprängmassor respektive berg i olika undersökningar (% av bildad gas). "Sprängteknisk litteratur" avser uppgifter refererade av Ekblad (1995).**

Referens	Sprängmassor (%)	Berg (%)
Ekblad	4–8	–
"Sprängteknisk litteratur"	20	40
Forsberg och Åkesson, tillredningsarbete	–	6
Forsberg och Åkesson skivrasbrytning	–	74
Högström och Olin		Negligerbart*

\* Vid normalt sprängningsarbete Högström och Olin (1990) anger att vid skjutning i helt inspända borrhål med fullständigt tät förladdning kan gstrycket dock bibehållas under längre tid, särskilt om berget innehåller sprickor eller är poröst.

## 6.2.2 Halter och mängder

I de beskrivningar om halter i fast material som påträffats vid insamlingen av data, har metoden för bestämning av kväve ofta innehållit en lakning med vatten före bestämningen. Det kan vara osäkert om vissa former av organiskt bunden kväve kan extraheras på detta sätt, och om de angivna totalhalterna därför är helt korrekta. Troligen är detta fel av mindre betydelse eftersom kvävet i sprängmedel i allmänhet är, eller blir, lösligt efter detonation. Även om metoden att bestämma totalhalt i fast fas på detta sätt, kan ge en underskattning kan i gengäld en beskrivning av olika kväveformer i det uppkomna lakvattnet göras. Beskrivningen av halter i sprängmassorna nedan grundar sig på bestämningar genom lakning med vatten av det fasta materialet. Metoderna beskrivs närmare i de olika referenserna och är huvudsakligen modifieringar av standardiserade metoder.

Laktester har utförts på tre olika sprängstensmaterial av Sjölund (1997). Alla metoder utom en (CON) använder sig av destillerat eller avjonat vatten som laklösning. Provvattag av lakvatten görs i ett steg eller flera och styrs i metoderna av förhållandet mellan den tillförda laklösningens massa (L) och det fasta materialets massa (S). De försök som kallas ENA, DIN eller skakförsök utförs genom att ett material skakas med laklösning, medan försöken CON eller kolonnförsök utförs genom uttag av laklösning som flödar genom ett material. Ett vanligt syfte med den senare uppställningen är att skilja lösliga ämnen från ämnen som har en varierande grad av adsorption till materialet.

Sprängsten, 0–11 mm från tunnelbrytning i Sundbyberg, malm, 0–10 mm, från gruvbrytning i Kiruna och fraktion 0–11 mm från täktbrytning (Riksten) analyserades med tre olika typer av lakförsök (Sjölund 1997). Två av testerna kallade ENA och DIN var utformade som laboratorieförsök medan det tredje var ett containerförsök (CON). För samtliga lakförsök visade sig tunnelberget innehålla högst mängder lakbart kväve. Sprängsten från Sundbyberg innehöll i storleksordningen 20–40 mg tot-N/kg och material från gruvbrytning innehöll i storleksordningen 10–20 mg tot-N/kg, medan material från ovanjordssprängningar innehöll 1–5 mg tot-N/kg. En jämförelse mellan de båda underjordssprängningarna (Sundbyberg och Kiruna) visar att materialet från Sundbyberg sprängt med ANFO innehöll något mer lakbart kväve än malmen från Kiruna sprängt med emulsionssprängmedel.

I Forsberg och Åkerlund (1999) redovisas varierande kvävehalter (6–35 mg tot-N/kg) i råmalm från LKAB under en veckans provtagning.

Lakförsök har också utförts på gråberg (Johansson 2002). Försök har utförts som skakförsök och kolonnförsök. I skakförsöken lakades som mest 5,5 mg tot-N/kg gråberg. Medelvärdet för alla försök var 3,4 mg tot-N/kg, vilket var något lägre än resultat erhållna från malmen (se ovan) samt också lägre än tidigare resultat från gråberg, där 20 mg tot-N/kg lakades ut. Skillnaden i lakbarhet troddes bero på olika mängder kväve i de gråbergsprov som användes. Den utlakade mängden kväve från gråberget (Johansson 2002) varierade något med skakperiodens längd, men det mesta av kvävet bedömdes laka inom ca 1–2 timmars skakning. Då kvävet sitter på bergmassornas yta och befinner sig i former som är lösliga i vatten kan man anta att upplösningsreaktionen är mer momentan. Utlakningen föreföll i de inledande försöken att påverkas av ökad kvävebelastning och ökad alkalinitet. Vid ökad alkalinitet kan emellertid viss förlust av kväve ske genom avgång av ammoniak i form av gas. Försöken utfördes så att fler än en av de parametrar som undersöktes varierades samtidigt. Den statistiska utvärderingen visade att skaktid samt tillsats av ammoniumnitrat hade betydelse för utlakningen av totalkväve när en uteliggare uteslutits. Anledningen till att alkalinitet inte påverkade utlakningen var troligen att lakvattnet även utan tillsats av alkalinitet, hade naturligt hög alkalinitet.

Då sprängmedlet som användes vid LKAB bestod av ammoniumnitrat, var det framförallt nitrat som dominerade i grundvattnet. Resultaten visade också att den enda reaktion som styrde över lakningen av N från gråbergsmassorna till vatten var upplösning av sprängmedelsrester på ytorna.

Kolonnförsök på gråbergsmassor från LKAB visade att den ackumulerade mängden utlakad N stagnerade efter ca 2 dygn, samtidigt som halten N i utgående vatten sjönk från 150 mg/L vid försökets start till nära 0 efter 2 dygn (Johansson 2002). Eventuellt kan partiklarnas porstorlek bidra till en viss fördröjning, då små porer kan bidra till att vattenströmningen sker något långsammare och föroreningar därigenom kvarhålls något längre.

## 6.3 Vatten

### 6.3.1 Förekomstformer

Förekomstformer av kväve i tunnelvatten eller processvatten är troligen samma som förekommer naturligt dvs nitrat, nitrit och ammonium. Eftersom pH-värdet i det vatten som står i kontakt med berggrunden oftast är alkaliskt innebär detta att jämvikten mellan ammonium och ammoniak (ekvation 3) kan vara förskjutet till ammoniak. Vanligen utförs inte någon speciering av kväve vid sprängningsarbeten utan analys utförs oftast med syftet att uppfylla tillsynsmyndigheters krav på högsta halter, som ofta anges som totalkväve. Ett fall av speciering redovisas emellertid av Sjölund (1997), som utförde lakförsök på olika typer av sprängstensmassor (underjordssprängning, sprängning vid gruvbrytning samt sprängning vid täkter). Speciering av kväve gjordes på det lakvatten som bildades vid försöken. Resultaten visade att andelen NO<sub>3</sub>-N initialt låg över 50 % för alla undersökta material och att NO<sub>3</sub>-N var helt dominerande för täktmaterialet. Under lakningens gång minskade denna andel vilket förklaras med att NO<sub>3</sub>-N är mer lättlakat medan NH<sub>4</sub>-N fördröjs genom jonbyte. Endast spår av nitrit påträffades i de undersökta materialen.

### 6.3.2 Halter

Högström och Olin (1990) analyserade grundvatten i en bergtäkt i Värmland. Jämfört med bakgrundshalterna av nitratkväve i området (medel 0,24 mg NO<sub>3</sub>-N/L) var halterna i täkten markant förhöjda (3–11 mg NO<sub>3</sub>-N/L), vilket innebär en ökning på 12–44 gånger. Även de analyserade halterna av nitritkväve (0–0,09 mg NO<sub>2</sub>-N/L) var högre jämfört med bakgrundshalterna (0,01 mg NO<sub>2</sub>-N/L), även om de generellt var betydligt lägre än nitratkvävehalterna. Sprängningsarbeten antogs kunna vara om inte den enda, så en bidragande orsak till de förhöjda kvävehalterna.

SveBeFo har gett ut en rapport som tar upp olika aspekter kring kväveutsläpp från sprängarbeten (Tilly et al. 2005). Enligt denna rapport är det hanteringen av sprängämnen, sprängtekniken samt bergtekniska förhållanden som avgör hur mycket kväve som släpps ut. Kväveinnehållet i sprängmedlet anses ha mindre betydelse. Enligt uppgifter kan 10–20 % av kväveinnehållet i sprängämnet läcka ut till läsvatten, vilket är i överensstämmelse med resultat beskrivna ovan av Mathiulakis (2000), men det ansågs sannolikt att mindre förluster än så var vanligare.

I ett examensarbete har omhändertagandet av processvatten från tunnelbyggen undersökts (Grinder 2003). Arbetet genomfördes i form av en litteraturstudie där dokumentation från tolv olika tunnelbyggen inkluderades. Sammanställningen visade att 0,3–9 % av det totala kväveinnehållet i sprängmedlen kvarstod som förorening i processvattnet. Enligt Grinder (2003) räknar man generellt med att ca 4 % av det totala kväveinnehållet i sprängämnen hamnar i tunnelvatten. Spill av kväve vid hantering av sprängämnen var den största källan (60 %), medan vattenangrepp efter laddning och på odetonerade rester stod för ca 25 % respektive 7,5 % av läckaget, medan kväveoxider som adsorberats på bergytan stod för 7,5 %. I tabell 6-4 sammanställs uppmätta kvävehalter i tunnelvatten. Variationer i halter inom projekten har visat sig variera en tiopotens inom loppet av ett dygn. Anledningen är enligt Grinder (2003) att hela kvävetillförseln sker vid laddning och sprängning medan avtagande halter sker vid momenten urlastning och borring.

**Tabell 6-4. Sammanställning av uppmätta kvävehalter i tunnelvatten (modifierad från tabell 5, Grinder 2003).**

	Tot-N			NH <sub>4</sub> -N			NO <sub>3</sub> -N		
	Median	Min	Max	Median	Min	Max	Median	Min	Max
Svartvikstunneln	3,2	0,2	87	0,56	0,01	35	1,9	0,1	51
Stäkettunneln	17	1,0	250	1,1	0,12	64	10,5	0,4	180
Hjältatunneln	100	8,3	540	38,5	3,8	120	40	0,5	95
Öbergstunneln	5,7	0,68	21	1,4	0,96	2,6	4,4	3,4	7,4



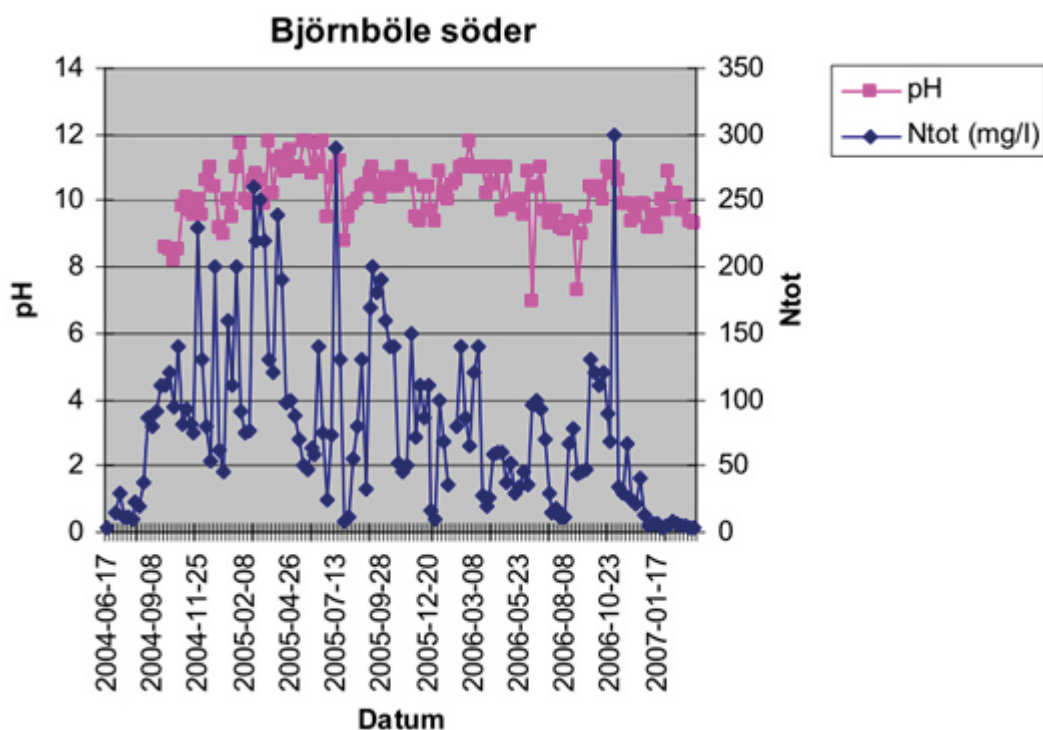
Eftersom halterna i tabell 6-4 beskriver stickprovstagning en gång per vecka kan variationen inom varje projekt förklaras med i vilket skede provtagning har ägt rum. I jämförande undersökningar av vägdagvatten (Grinder 2003) anges att variationen mellan högsta och lägsta värde för vägdagvatten var en faktor 2 medan variationen för tunnelvatten i de presenterade projekten var, som framgår av tabell 6-4 väsentligt högre. Variationen mellan olika projekt kan bero hur mycket spolvatten som används av entreprenören, av t ex arbetsmiljöskäl, eller på andelen odetonerat sprängämne etc.

Undersökningar av gruv- och tunneldrift i Norrland har visat att 5–10 % av den totala mängden ammoniumnitrat i sprängmedel kan avgå till tunnelvatten (Ekblad 1995). Enligt uppgifter i samma rapport från Botkyrka kommun innehöll tunnelvattnet totalkvävehalter på 100 mg/L, vilket motsvarar medianhalten i tunnelvatten från Hjältatunneln i tabell 6-4. Tunnelvatten från Södra Länken innehöll i genomsnitt 92,28 mg tot-N/L (Mathiulakis 2000).

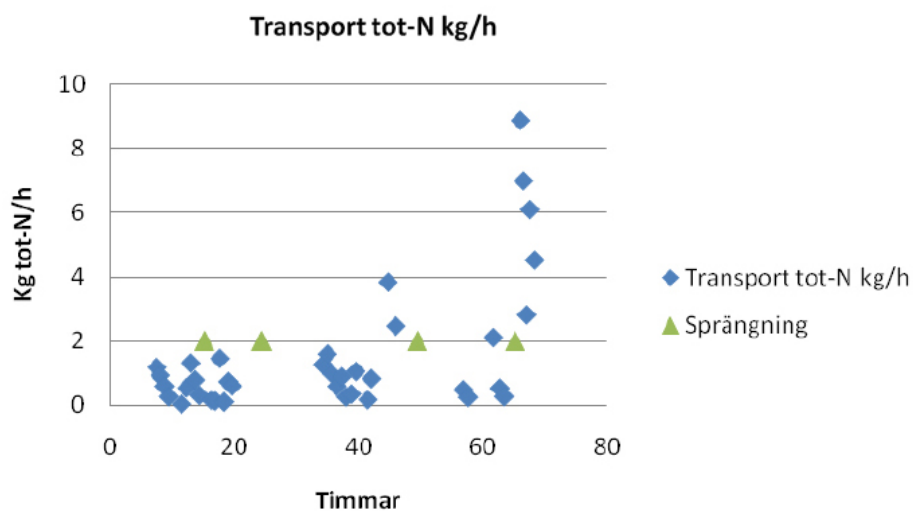
I Botniabanan, där SSE-systemet använts, har analys av tunnelvatten utförts under en längre period även efter att sprängningsarbetena avslutats. figur 6-1 illustrerar totalkväveinnehållet i vatten pumpat från en ca 5 km lång tunnel. Sprängningsarbetena avslutades i slutet av 2006 och figuren visar hur kvävehalterna har avtagit sedan dess (Rindeskog 2009).

I ett examensarbete gjordes en kartläggning av kvävehalter i processvatten från sprängning (SSE) i Hjältakullen (Berg och Blom 2001). Kvävehalterna uppvisade stor variation (30–970 mg/L): de högsta halterna sammanföll med själva sprängningsarbetena och troddes bero på spill och odetonerat sprängmedel, i övrigt minskade halterna med tiden. pH varierade mellan 8,1 och 11,8. men inget samband mellan kvävehalterna och pH-värdet kunde konstateras. Eftersom flödesmätning gjordes samtidigt med provtagget kan transporten via vatten beräknas. Utvecklingen av kvävetransporten från Hjältakullen under en del av en arbetsvecka beskrivs i figur 6-2.

Resultat av analyser från länshållningsvatten från sprängning av Norra länken har erhållits av Vägverket. Resultaten presenteras nedan i tabell 6-5. De lägsta kvävevärdena erhöles vid arbetets start samt vid provtagning 2007-07-06. Efter detta datum utfördes inga ytterligare mätningar.



**Figur 6-1.** Totalkväveinnehållet i vatten pumpat från en ca 5 km lång tunnel från Botniabanan. Figuren visar hur kvävehalterna har avtagit sedan sprängningsarbetena avslutades. Från (Rindeskog 2009).



**Figur 6-2.** Transport av totalkväve från Hjältakullen. De högsta kvävehalterna sammanföll med sprängningsarbeten och troddes bero på spill och odetonerat sprängmedel. Bearbetning av data från Berg och Blom (2001).

**Tabell 6-5. Sammanställning av uppmätta kvävehalter i länshållningsvatten vid Norra Länken NL 309, Vägverket.**

	Tot-N Median	Min	Max	pH Median	Min	Max
NL 309	60,5	13	130	9,1	7,6	10,2

## 7 Diskussion och sammanfattning av kunskapssammanställningen

### ***Bakgrundshalter i granit, brunnar i berg och jord***

Som tidigare nämnts har totalinnehållet av kväve i granit uppskattats (Pitcairn et al. 2005) till mellan 3 och 180 mg/kg (medel 45 mg/kg). Endast en mindre del förekommer i vatten. Bakgrundshalter i brunnar (enligt SGUs databas) uppgår till för jordbrunnar 0,7 mg NO<sub>3</sub>-N/L och för bergbrunnar till 0,2 mg NO<sub>3</sub>-N/L.

### ***Kvävehalter efter sprängning; Gas- och vattenfas***

Vid sprängning eftersträvas att gas bildas vid sprängningen. Spränggaserna består huvudsakligen av vatten, koldioxid och kvävgas. Genom gasbildningen uppnås sprängverkan. Efter detonation kan en mindre del av kvävet förekomma som kväveoxider som reagerar med vatten och bildar nitrat, möjligen också små mängder av nitrit. Ammoniak (NH<sub>3</sub>) står i jämvikt med ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) och kan vid höga pH-värden övergå till ammoniak som är en gas. En del av gasen kommer att stanna kvar i berget. Uppgifterna om hur mycket gas som kommer att finnas kvar i berget efter avslutad sprängning går isär och det finns uppgifter som säger att kvarstående gas kan negligeras, medan andra uppgifter talar om en betydande del som kan kvarstanna i berget (se tabell 6-3). Den mest genomarbetade massbalansen med kontroll av olika medier och tillförselvägar förefaller vara utförd av Forsberg och Åkesson (1999). I deras fallstudier framgår att mängden kvarvarande gas i berget kan variera kraftigt beroende på bergets sprickighet.

Av litteraturundersökningen framgår att inga generella slutsatser kan dras om vilka sprängmedel som avger mest kväve till omgivningen. Samma slutsatser har dragits av Tilly et al. (2005) som menar att hantering, sprängteknik och bergtekniska förhållanden är avgörande för kväveläckageets storlek och att skillnader i olika sprängämnenas kvävehalt är av underordnad betydelse.

### ***Kvävehalter efter sprängning; Sprängmassor***

En del sprängämne kommer att förbli odetonerat av olika orsaker. Sprängmassorna kan därför innehålla höga halter av kväve i form av nitrat och ammonium, vilket antyds av den topp som syns i figur 6-1 och som troligen orsakats av utlastning av sprängstensmassor. Genom rätt hantering och ett val av sprängmedel som baseras på platsspecifika förhållanden kan denna andel minskas. Beroende på platsspecifika faktorer kommer en stor del av dessa kväveföreningar i sprängmassorna att transporteras ut från anläggningar inneslutet eller på annat sätt bundet i den fasta fasen.

Sprängmassornas innehåll av kväve kan bedömas indirekt genom analys av halterna i det resulterande processvattnet, som bildats av inträngande vatten, eller vatten som använts för bevattning av massorna. Sprängmassornas innehåll kan också bedömas med ledning av lakförsök.

### ***Kvävehalter i länshållningsvattnet; processvatten från tunneldrivning samt inträngande grundvatten***

Resultat från analys av tunnelvatten eller länshållningsvatten visar att höga halter, i storleksordningen 100 mg tot-N/L, uppkommer i vattnet. I den dokumentation som gåtts igenom, avser mätningarna av vattenkemi oftast mätningar i en uppsamlingspunkt innan utsläppet till recipienten sker. På grund av långa uppehållstider, tillskott av spolvatten, eller vatten för dammbindning, kan inte halterna av kväve i vattnet lätt knytas till en aktivitet, som t ex sprängning eller uttransport av sprängmassor. Kortare tidsserier av kvävehalter i tunnelvatten har presenterats ovan. Längre tidsserier över halter av kväve efter avslutning av sprängning är inte så vanliga, men ett exempel finns presenterat i figur 6-1.

Resultat från lakförsök av sprängmassor antyder att det kvarstående kvävet i sprängstensmassorna är lättlakat. De lakdata som finns tyder på att utlakningen av kväve är en snabb process och att förekomst av vatten och exponering av ytor för vatten är styrande för de halter som uppkommer i vattnet.

I flera rapporter finns uppgifter om att endast 25–50 % av kvävet löser sig. Undersökningarna refereras både av Ekblad (1995), Sjölund (1997) samt Forsberg och Åkerlund (1999) och grundar sig på uppgifter av Persson et al. (1994) som undersökte kväveinnehåll efter 1 timmes intensiv bevattning. Av de lakförsök som utförts på sprängstensmassor och gråbergsmassor (berg uttömt på malm) av Sjölund (1997) och Johansson (2002), drar emellertid båda författarna slutsatsen att vattenutlakningen från massorna sker tämligen snabbt. Sjölund (1997) utförde bl.a. lakförsök baserade på en standardmetod där sprängsten utsätts för lakvatten i sekvenser av 18 timmar; resultaten visade att nästan allt kväve frigjordes under det första lakningen, dvs 18 timmar. Johansson (2002) utförde lakförsök med LKAB:s gråbergsmassor både i kolonnförsök och i skakförsök med varierande skaktider. Skakförsöken visade att kväve huvudsakligen löste sig upp under den första minuten, medan kolonnförsöken visade ”tydligt att första kontakten är viktig för utvattningen av kväve” (Johansson 2002). Den tidsserie som presenterats från Botniabanen (figur 6-1) indikerar också att lösligheten är hög och att utlakningen är en snabb process.

Omsättningstiden av vatten bör också ha betydelse för hur snabbt minskningen sker. Delar av berg med lågt vattenflöde och låg tillgänglighet för vatten kan ha en betydligt långsammare minskning. Huruvida dessa delar av berget är samma delar av berget som är lågt exponerade för höga kvävehalter är sannolikt, men kan inte bekräftas eller avfärdas på basis av det genomgångna materialet.

## 8 Resultat fallstudie TASS

### 8.1 Genomgång av tillgängliga data från Sicada

Huvuddelen av dataanalysen har gjorts med hjälp av filen "water\_composition" (databasutdrag Sicada 11-033). De flesta proverna har genomgått analys enligt SKB "chemistry class" 4 eller 5, i vissa fall med tillägg av NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> samt totalkväve. Parametrarna som analyseras för varje kemiklass beskrivs i Smellie et al. (2002, Table 3-1).

Provtagning och analys har skett från botten av TASS-tunneln (sulan). Flera av proverna har tagits då sprängmassor har funnits kvar i sulan. Åtta prover har tagits från sulan då denna kan ha varit påverkad av kvarliggande bergmassor. Analys av uppsträngande vatten har utförts på en punkt på sulan vid nivån 20 m in i tunneln vid tre tillfällen; i samband med sprängning, efter sprängning mellan 32,94–48,67 m och efter omfattande spolning i tunneln. Analys av rensad sula har gjorts på punkten 48 m som sprängdes 2008-06-17 och rensades före provtagning. Ytterligare sprängning skedde under september 2008 varefter sulan rensades och prov för analys uttogs. Det sista provet i serien (2008-10-17) togs efter att makadam hade lagts ut i tunneln.

Provtagning av vatten har också utförts på framträngande vatten från sprickor. Prover har tagits genom att ett kärl (5 eller 10 L dunkar) ställts öppet så att vatten har kunnat droppa direkt ned i kärlet. Någon eller några liter kunde "skördas" över natten på detta sätt. Placeringen har varit vid positionerna 43,6 och 43,9 m. Analys av till tunneln inträngande vatten från 18,80 m respektive 20,3 m har utförts vid två tillfällen; 2008-03-05 samt 2008-03-31.

### 8.2 Totalhalter sprängt berg

Skillnaderna i totalhalter mellan finfraktionen (0–2 mm) och den grövre fraktionen (2–10 mm) visas för två olika fraktioner i tabell 8-1 nedan.

Skillnaden i totalhalter mellan de båda fraktionerna bör, förutsatt att materialet är homogent vara marginell. Det ämnet som visar den största förhöjningen i det finare materialet är, förutom något spår-element, kväve med 3 gånger så hög halt i det finkorniga materialet. Den mest sannolika förklaringen till de höga halterna av kväve i det fina materialet är att kvävet kommer från adsorberat kväve på exponerade ytor vilket innebär högre halt i den fraktion som har störst yta.

### 8.3 Lakförsök

Resultaten från lakförsök presenteras vanligen som utlakad mängd av en viss komponent för att jämförelser enkelt skall kunna göras med den totala mängden av ett ämne som finns i provet. Detta gäller naturligtvis inte pH och elektrisk konduktivitet, eftersom dessa parametrar inte kan relateras till den fasta materialet. Eftersom lakningen utfördes vid ett förhållande mellan laklösning och fast fas på 10 innebär det att de analyserade halterna i laklösningen var tiondedelen av de siffervärden som presenteras i tabell 8-2 nedan. Högsta halten av nitrat var alltså 50 mg/L i TASS2 0–2 mm. Analysprotokoll finns lagrade i Sicada. Nedan visas ett urval av analyserade parametrar.

Spridningen av resultat från lakförsök är i allmänhet betydligt större än för totalanalys (se tabell 8-1). Det lägsta pH-värdet påträffades i TASS2 i fraktionen 0–2 mm. Sannolikt är det anledningen till att de högsta halterna av ammonium påträffades i detta prov. Vid högre pH avgår en del av den bildade ammoniak som gas. Andelen av ämnen som lakar ut är ofta endast en bråkdel av vad som påträffas totalt i den fasta fasen. För koppar t ex är andelen som lakas ut i provet TASS2 endast 0,25 % respektive 0,08 % i de två fraktionerna 0–2 mm respektive 2–10 mm. En betydligt högre andel lakas ut av de mer lösliga anjonerna. För TASS2 är det i storleksordningen 50–75 % av kvävet som lakas ut (839/1100 och 155,6/300 för 0–2 och 2–10 mm fraktionerna, sista raderna i tabellen 8-1 och 8-2). Vid upprepade lakförsök, är det sannolikt att ytterligare mängder kväve, främst i form av ammonium, skulle kunna lakas ut. Det är rimligt att tänka sig att en viss adsorption, t ex jonbytesbunden, av ammonium sker till provets fasta ytor i enlighet med vad Sjölund (1997) föreslog vid sina lakförsök.

**Tabell 8-1. Analyser av totalhalt (mg/kg torrsubstans) samt glödgningsförlust (%) utförda på två olika fraktioner av bergkross av provet TASS2 efter sprängning i TASS-tunnel 2008-12-15.**

	TASS2 0–2 mm	TASS2 2–10 mm
Si	2,71 × 10 <sup>5</sup>	3,02 × 10 <sup>5</sup>
Al	8,41 × 10 <sup>4</sup>	8,15 × 10 <sup>4</sup>
Ca	2,89 × 10 <sup>4</sup>	2,39 × 10 <sup>4</sup>
Fe	3,27 × 10 <sup>4</sup>	2,86 × 10 <sup>4</sup>
K	3,28 × 10 <sup>4</sup>	3,11 × 10 <sup>4</sup>
Mg	1,21 × 10 <sup>4</sup>	9,41 × 10 <sup>3</sup>
Mn	5,96 × 10 <sup>2</sup>	4,93 × 10 <sup>2</sup>
Na	2,82 × 10 <sup>4</sup>	2,86 × 10 <sup>4</sup>
P	1,35 × 10 <sup>3</sup>	1,10 × 10 <sup>3</sup>
Ti	4,30 × 10 <sup>3</sup>	3,20 × 10 <sup>3</sup>
<b>Glödgningsförlust (%)</b>	<b>1,9</b>	<b>1,3</b>
As	0,594	0,509
Ba	1710	1520
Be	2,59	2,56
Cd	0,136	<0,01
Co	11,2	8,64
Cr	43,8	32
Cu	61,4	32,2
Hg	<0,04	<0,04
Mo	8,58	12,4
Nb	13	10,9
Ni	20,9	16
Pb	13,1	10,5
S	360	208
Sc	9,76	7,32
Sn	1,5	0,978
Sr	1 020	937
V	73,5	56,7
W	<60	<60
Y	24,3	20,4
Zn	80,4	53
Zr	264	200
N	1100	300

**Tabell 8-2. Analyser av utlakad mängd per kg torrsubstans (TS) av olika ämnen analyserade på två olika fraktioner (0–2 mm samt 2–10 mm) av tre prover (TASS1, TASS2, TASS3) av bergkross efter sprängning i TASS-tunneln 2008-12-15 (omräknat från ett förhållande mellan laklösning och fast fas på 10).**

		TASS 1 0–2	TASS 1 2–10	TASS 2 0–2	TASS 2 2–10	TASS 3 0–2	TASS 3 2–10
pH		10,9	10,9	9	9,6	10,4	10,7
El. kond	mS/m	41,4	24,1	57,1	13,1	50,7	22,3
Cu	mg/kg TS	0,035	0,024	0,156	0,027	0,14	0,029
DOC	mg/kg TS	36	<10	48	10	54	14
Cl	mg/kg TS	140	14	91	17	130	25
SO <sub>4</sub>	mg/kg TS	180	37	76	16	160	39
HCO <sub>3</sub>	mg/kg TS	790	830	660	390	720	720
NO <sub>3</sub> -N	mg/kg TS	120	11	500	93	380	66
NH <sub>4</sub> -N	mg/kg TS	6,1	1,7	310	58	90	30
NO <sub>2</sub> -N	mg/kg TS	30	2	29	4,6	30	4,6
Tot-N*	mg/kg TS	156,1	14,7	839	155,6	500	100,6

\* summerat från NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N och NO<sub>2</sub>-N.

## 8.4 Inträngande vatten

De vatten som kommer ut till tunneln kan indelas i olika grupper beroende på källan. Uppdelningen är gjord med avseende på sprickor (utsipprande vatten från tunnelns vägg som fått droppa i ett öppet provkärl), sulan (vatten som tagits från botten av tunneln) och vatten från borrhål (borrning under prepareringen inför laddning och sprängning).

Ett stort antal konstituenten förutom kväveformer har också analyserats (databasutdraget Sicada 11-033). Värdena för pH är förhållandevis stabila med ett max-värde av 7,97 och ett minimivärde på 7,45. Den elektriska ledningsförmågan och kloridhalterna varierar mer (t ex så varierar kloridhalten mellan 2760 och 6480 mg/L). I filen "activity\_comments" (Sicada 011-33) anges emellertid att inpressat kranvatten från rengöring av tunneln kan finnas kvar i skärmborrhål, vilket skulle kunna förklara de tidvis litet lägre kloridhalterna.

I det följande diskuteras i första hand innehåll i vattnet av olika kväveformer (nitrat, nitrit och ammonium).

### 8.4.1 Borrhålsvatten

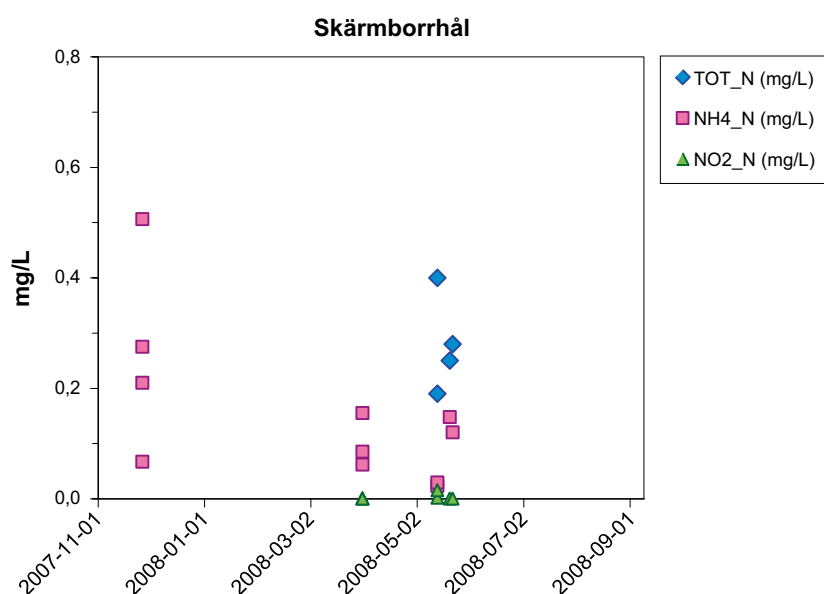
I figur 8-1 nedan presenteras resultaten av kväveinnehåll vid borrning av skärmborrhål. Halterna av N för provtillfället i mars 2008 är en summering av halterna  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  samt  $\text{NH}_4$  medan halterna i maj 2008 är bestämda genom separata analyser.

Två prover tagna i samma borrhål med två minuters mellanrum hade halter av  $\text{NH}_4\text{-N}$  på 0,37 mg/L respektive 0,49 mg/L. Halterna av  $\text{NO}_2\text{-N}$  och  $\text{NO}_3\text{-N}$  var låga och mindre än 1  $\mu\text{g/L}$ .

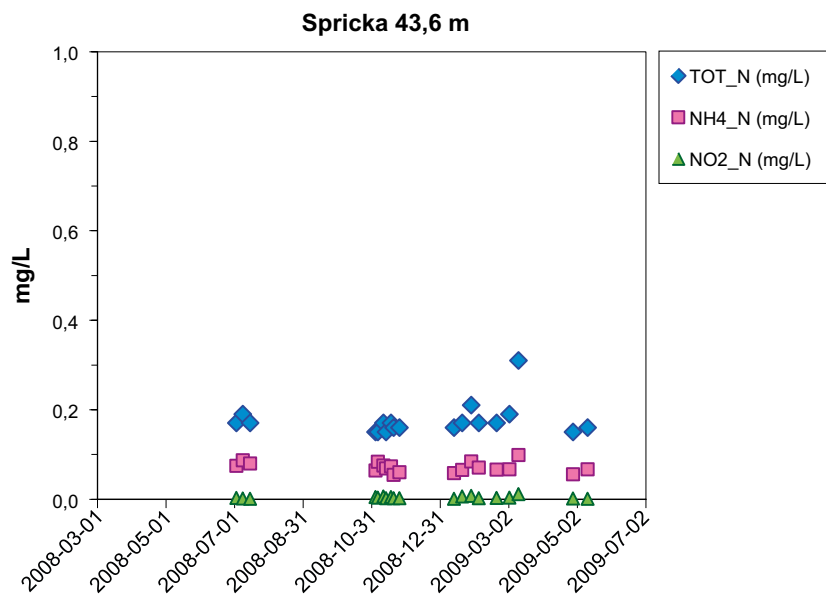
### 8.4.2 Sprickvatten

Analys av sprickvatten har utförts på flera sprickor; 18,8 m, 20,3 m, 35,1 m, 43,6 m, 43,9 m samt 53,7 m. De sprickor som har längst tidsserier är de vid punkterna 43,6 m samt vid 43,9 m. Kloridhalterna i dessa punkter är stabila (maximum och minimivärde för 43,6 m är 5540 respektive 5380 mg/L samt för punkten 43,9 m 5520 respektive 5290 mg/L), vilket indikerar en ringa påverkan av inpressat kranvatten. Halterna av kväve har analyserats med separata analyser för alla kvävespecier ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  samt totalt N). Nedan i figur 8-2 och figur 8-3 presenteras resultat för  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ , samt totalkväve (N) för de två provpunkterna.

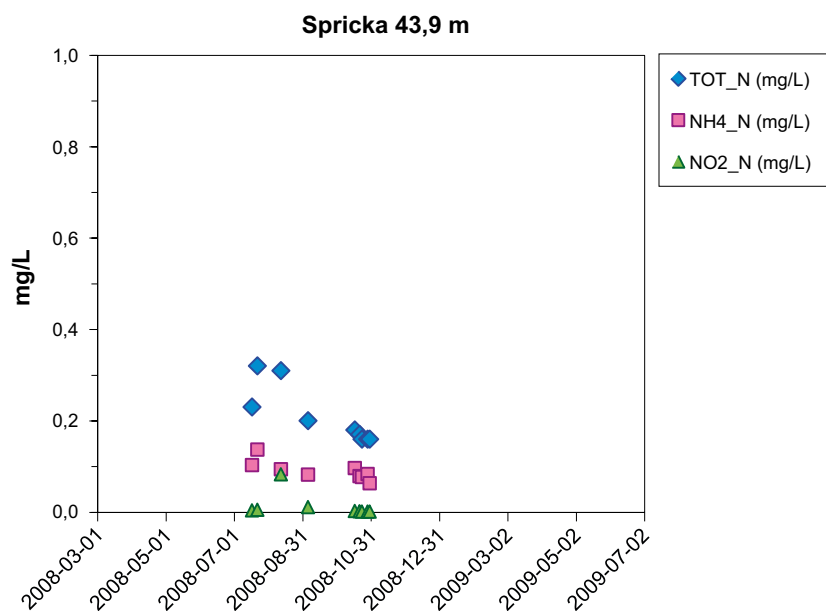
Alla resultat från alla analyserade sprickor i TASS-tunneln visas sammanslagna nedan i figur 8-4.



**Figur 8-1.** Halter av kväveformer i skärmborrhål inför sprängningarna i TASS-tunneln utförda i november 2007, mars 2008, och maj 2008.



Figur 8-2. Halter av kväveformer i spricka vid punkten 43,6 m i TASS-tunneln.

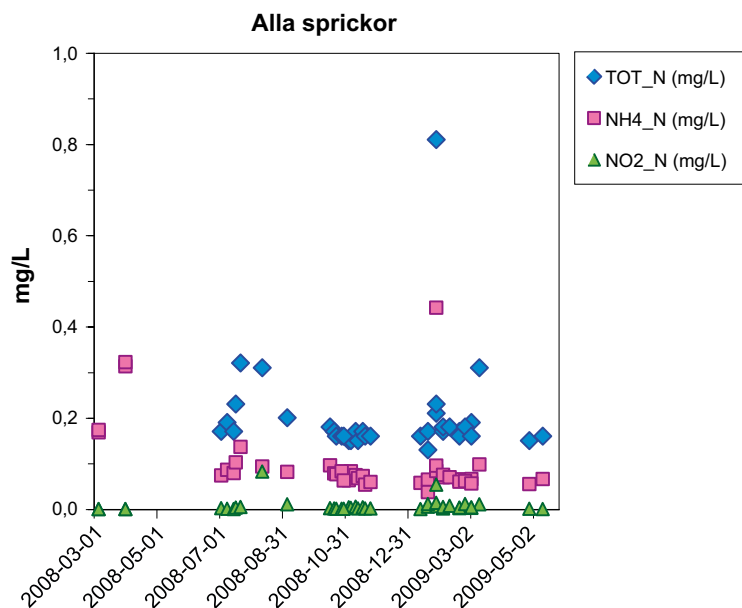


Figur 8-3. Halter av kväveformer i spricka vid punkten 43,9 m i TASS-tunneln.

### Osäkerheter sprickvatten

Halterna av kväve från de analyserade sprickorna visar samstämmiga resultat och är i samma storleksordning med vad som förväntas förekomma i bergbrunnar enligt databas från SGU (<http://www.sgu.se/sgu/sv/samhalle/grundvatten/grundvattenkemi.html>) (Aastrup et al. 1995). I denna anges medianvärde för nitrat i bergbrunnar (n = 14008) till 1 mg/L. Uttryckt i totalkväve/L ger detta en halt av 0,22 mg/L. Av data framgår att halterna i den aktuella fallstudien är i denna nivå eller något högre och att halterna av kväve är i det närmaste konstanta för sprickvattnet. Enstaka höga värden kan bero på att sprängningar ägt rum och att sprickvattnet samlades upp genom snitt i bergväggen så att hela läckaget från 1 m tunnelbredd samlades in. Sprängningar ägde rum juni 2008, september 2008 och i december 2008.





Figur 8-4. Halter av kväveformer i alla sprickor (18,8; 20,3; 43,6 och 43,9) i TASS-tunneln.

Halterna av kväve i det sprickvatten som analyserats kan påverkas av dieseltrafik vilket skulle öka halterna medan vattnet rinner längs bergväggen ned till kärlet. Provtagningspunkterna är emellertid valda så att transporttiden på tunnelväggarna skall minimeras. Ett möjligt för lågt värde skulle kunna orsakas av att kväveinnehållande gaser avgår vid kontakt med atmosfären. Avgång av ammoniak är möjlig, men åtminstone vid de pH-värden som uppmätts i de uppsamlade kärnen dominerar det vattenlösliga ammoniumet över den gasformiga ammoniaken. Av lakförsöken framgår också att nitrat förekommer i högre halter än ammonium.

### 8.4.3 Sulvatten

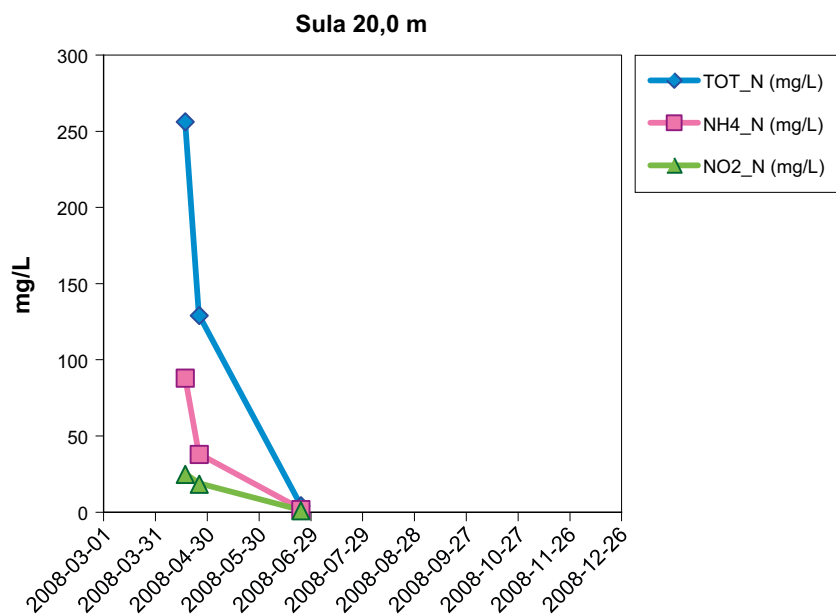
I det vatten som provtagits från sulorna har varierande förhållanden rått. I tabell 8-3 nedan visas en översikt över omständigheter kring provtagningen.

Tabell 8-3. Halter av totalkväve i de prover som tagits från sulan i TASS-tunneln.

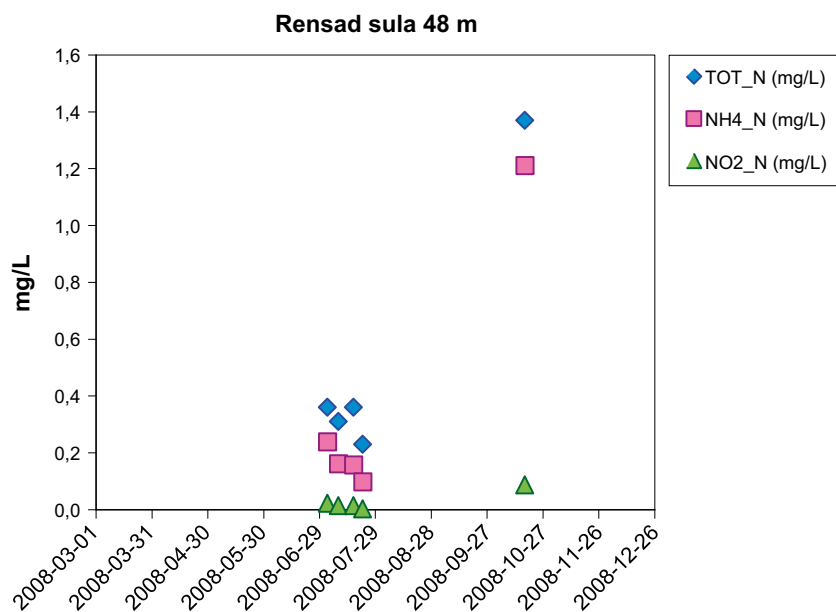
Datum	Prov-punkt	Prov-nummer	Total-N (mg/l)	Kommentar
2008-04-17	20	14511	256,00	Daily log, makadam, mycket sediment
2008-04-25	20	14512	129,00	Daily log, makadam, mycket sediment
2008-05-14	27	14522	45,60	Daily log Vattenpöl sula (50 m <sup>3</sup> vatten 0425–0519)
2008-05-19	27	14523		Daily log Vattenpöl sula (50 m <sup>3</sup> vatten 0425–0519)
2008-05-19	27	14524		Daily log Vattenpöl sula (50 m <sup>3</sup> vatten 0425–0519)
2008-05-19	27	14525		Daily log Vattenpöl sula (50 m <sup>3</sup> vatten 0425–0519)
2008-05-28	27	14537	1,64	Daily log Vattenpöl sula, pågående injektering, vitfärgat vatten med SilicaSol
2008-06-10	23	14542	391,00	Daily log Endast timmar efter sprängn, ca 1 m <sup>3</sup> spolvatten
2008-06-17	22	14544	388,00	Daily log Endast timmar efter sprängning, inget spolvatten
2008-06-23	20	14545	4,05	Daily log Ca 32 m <sup>3</sup> spolning in på området
2008-07-03	48	14554	0,36	Activity comments Sulan rensad dagen innan
2008-07-09	48	14557	0,31	Daily log Rensad sula
2008-07-17	48	14560	0,36	Daily log Rensad sula
2008-07-22	48	14562	0,23	Daily log Rensad sula
2008-10-17	48	14647	1,37	Activity comments Renspolad sula

Som framgår av tabellen har sulan ibland varit direkt påverkad av sprängning medan i andra fall vatten har spolats in i tunneln, för att binda damm. I vissa fall har sulan varit helt rensad och spolvatten har dammsugits bort. Nedan visas haltutvecklingen i punkt 20 (figur 8-5) som påverkats av stora mängder spolvatten och punkt 48 (figur 8-6) vars resultat motsvarar en rensad sula. Vid sista mätningen i punkt 48 har också sulan rensats men det har skett efter en ny omgång sprängning och data från denna punkt är därför inte direkt jämförbara med tidigare serie. Andra parametrar som klorid och sulfat visar också förhöjda halter vid detta provtillfälle.

Som framgår av figurerna 8-5 och 8-6 är halterna från sulan i en helt annan storleksordning än halterna i sprickvattnet. Medan halterna i sprickvattnet startar på en nivå på ca 0,4 mg/L och sedan avtar långsamt, startar halterna i sulan på i storleksordningen 100 mg/L och avtar från detta värde snabbt ner till halter på något eller några mg/L.



Figur 8-5. Halter av kväveformer i sulan (20 m) i TASS-tunneln. (Observera skalan)



Figur 8-6. Halter av kväveformer i den rensade sulan (48 m) i TASS-tunneln. (Observera skalan)

## 9 Kvarvarande halter av kväve i berg från sprängd tunnel, TASS, Äspölaboratoriet

### 9.1 Bakgrund

Syftet med denna redogörelse är att uppskatta mängden kväve i form av oxider och ammonium som kan kvarstanna i berget efter sprängning och därmed bedöma vilka halter som kan uppstå i ett slutförvar. Denna uppskattning kan därmed utgöra ett underlag för vidare bedömning av risken för spänningskorrosion av koppar. Som en första ansats har konservativa antaganden gjorts (se avsnitt 9.2 Förutsättningar/antaganden).

### 9.2 Förutsättningar/antaganden

Slutförvaret kommer, innan förslutning, att byggas med tunnlar som är rensade på sprängkross och tvättade (spolning/tryckspolning med vatten).

De källor till kväve som därefter kommer att finnas i berget beror av sprängningsarbeten och eventuell naturlig förekomst. Kvarvarande kväve i berget innan förslutning kan relateras till adsorberat kväve på sprickor i sprängskadezonen samt adsorberat kväve på de mindre fraktioner av sprängmassor som eventuellt blir kvar i sulan, tunnelgolvet, efter rensning och spolning av sulan.

Adsorptionen av kväve och kväveinnehåll per ytenhet (alla kvävespecier) antas vara lika stor på de bergmassor som sprängs ut och på de ytor som finns i befintliga sprickor och sprängningsinducerade sprickor i kvarvarande berg. Dvs, adsorptionen av kvävespecier har antagits vara lika stor på alla ytor oavsett storlek på fraktionen av de sprängda bergmassorna och kan relateras till den s.k. specifika ytan hos materialet. Den specifika ytan består av extern yta, geometriskt avgränsad av mineralkorn samt en intern yta som beror av porositeten hos bergarten. I en publikation av André et al. (2009) visades att den specifika ytan för små partiklar erhållna genom krossning var betydligt högre än den specifika ytan analyserad i intakta borrhävar. Deras slutsatser var att krossningen resulterar i en störd zon som ökar den (interna) specifika ytan. I föreliggande rapport har detta mindre betydelse eftersom den tillgängliga ytan har uppskattats med hjälp av referensmaterial och konservativa antaganden om ytans storlek.

Den specifika ytan av det utsprängda bergmaterialet från Äspötunneln (prov taget 2008 från TASS-tunneln) som har genomgått lakförsök och totalhaltbestämning, bör emellertid kunna uppskattas genom jämförelser med kornstorleksanalyser och specifik yta i andra undersökningar på krossat berg (Lagerblad 2005).

Den specifika ytan för sprängsprickor har uppskattats med hjälp av undersökning och modellering av sprängskadesprickor (Olsson et al. 2009) och uppgår enligt en konservativ uppskattning till 128 m<sup>2</sup> på en tunnelsektion om 6 m med en genomskärningsyta av 20 m<sup>2</sup> (Olsson och Markström 2010).

### 9.3 Tillvägagångssätt och Resultat

Referenser för ytor hos olika krossade bergmaterial har tagits fram, sammanställt av Lagerblad (2005). Det material från sammanställningen som använts som referens för Äspömaterialet har en liten andel i finfraktionen, och är det material som har minst yta av de undersökta materialen, K16 enligt Lagerblad (2005), eftersom detta ger det högsta värde på kväveutlakning per ytenhet, se nedan. I beräkningarna har detta jämförts med bergkross från Äspötunneln. För finfraktioner (< 0,25 mm) har referensmaterialets uppmätta värden med BET-metoden använts. För fraktioner > 0,25 mm motsvarande den kornstorleksfördelning som erhöles i Äspökrosset (0–2 mm respektive 2–10 mm) gjordes en beräkning av ytan på referensmaterialet baserat på kornens geometri med antagande om sfäriska partiklar. Referensmaterialet har på detta sätt erhållit ett uppskattat (lågt) värde hos ytan. För de aktuella kornstorlekarna i det siktade Äspömaterialet har antagits att de har samma specifika yta som referensmaterialet.

Genom att relatera det kväve som lakats från Äspö bergkrossmaterial, till den specifika ytan beräknat enligt ovanstående fås ett (högt) värde på kväveutlakning per ytenhet. Denna mängd kväve kommer sedan att ”fördelas” eller lösas i det grundvatten som efter förslutningen fyller upp tunnelns samt återfyllnadens hålrum eller porvolym. Den yta i tunneln som är tillgänglig för utlakning består av sprickor, naturliga eller inducerade av sprängning. Bergväggen i sig samt sulan kommer att tvättas enligt förutsättningarna vilket innebär att tak och väggar etc kommer att ha mindre kvävemängder. De erhållna (maximala) kvävehalterna bortser från tunneltvättning och baserar sig istället på den högre ytarean som ett konservativt antagande.

För att få ett mått på halter av kväveföreningar, som maximalt kan finnas kvar i slutförvaret, är detta en första uppskattning av koncentrationen kväve (samt fördelning av specier) för ett tunnelsegment på 6 m.

Nedan sammanfattas arbetsgången:

- Sprängmaterial från Äspötunneln siktades i fraktionerna 0–2 mm och 2–10 mm.
- Utlakningen av kväve från dessa fraktioner analyserades.

För att ta fram ytan på det material som lakades gjordes enligt nedan:

- Den specifika ytan för fraktionen < 0,25 mm togs fram.
- Äspömaterialet antogs ha samma specifika yta (BET) som ett referensmaterial med liten yta (K16).
- Den andel av Äspömaterialet som tillhörde fraktionen 0–0,25 mm togs fram med ledning hjälp av samma referensmaterial (K16) som har en låg andel finmaterial.
- Ytan större än 0,25 mm (0,25–2 mm) bedömdes vara fördelad på samma sätt som referensmaterialet och räknades fram med antagande om sfäriska partiklar.
- Bestämning av totala ytan i Äspömaterialet i fraktionen 0–2 mm summerades.
- Totala ytan i fraktionen 2–10 mm bedömdes vara proportionell mot totala ytan i fraktionen 0–2 mm.

Två alternativa metoder har använts för att bestämma maximala kvävehalterna:

**Alt.1** Genom att relatera den uppmätta utlakade mängden av kväveföreningar från Äspömaterialet till denna (lilla yta) fås en hög utlakning per ytenhet i det slutliga förvaret, vilket leder till uppskattade maximala kvävehalter.

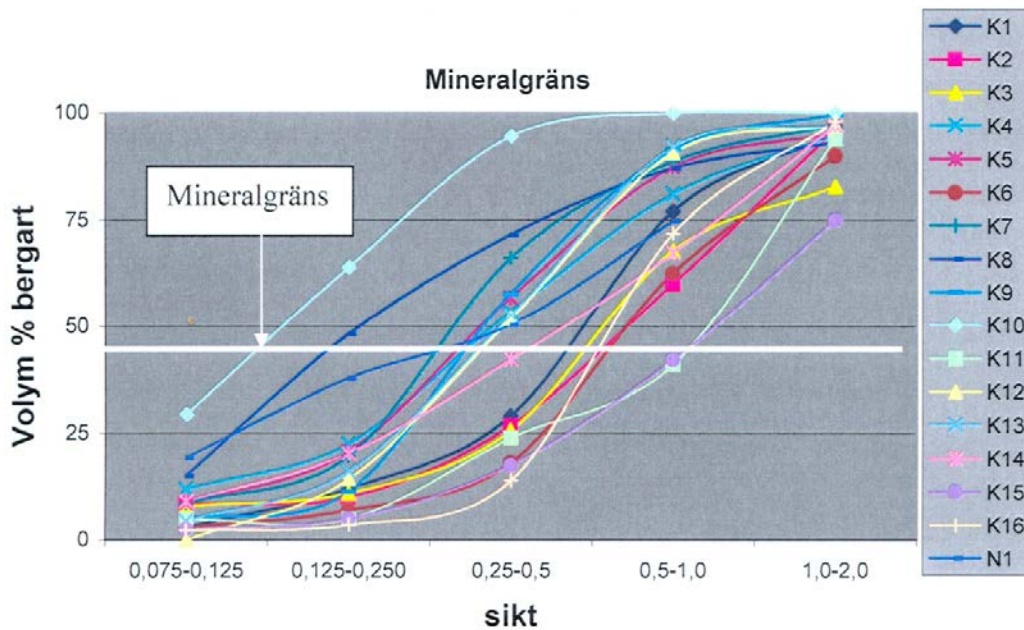
**Alt.2** Genom att mäta uppkomna halter i vattenförande sprickor och bedöma utvecklingen av halter över tiden.

### 9.3.1 Specifik yta

Den specifika ytan hos materialet har bedömts med ledning av de undersökningar av bergkross som sammanställts av Lagerblad (2005), se figur 9-1.

En petrografisk analys gjordes av Lagerblad (2005) på krossprodukter från magmatiska bergarter. Totalt undersöktes 17 olika krossprodukter. De material som genomgick mätningar av specifik yta presenteras i tabell 9-1. Materialen representerar finballast från granitiska täkter och betecknas som granit, granodiorit samt kvartssyenit. Mätningar av specifik yta på material mindre än 0,25 mm gjordes med BET-metoden (Brunauer Emmet Teller) som innebär adsorption av N<sub>2</sub>-gas. Tills helt nyligen har inte metoden att bestämma yta kunnat utföras på större fraktioner (se emellertid André et al. 2009). Av tabell 9-1 framgår att den uppmätta ytan av finmaterialet varierar mellan 74 och 4140 m<sup>2</sup>/kg. Vi har utgått från det material som har minst yta, K16 med 74 m<sup>2</sup>/kg (se tabell 9-1), och använt detta som jämförelsematerial vad avser lakbar yta för sprängkross för TASS-tunneln.

Siktcurvor för större fraktioner av de material som presenteras i tabell 9-1 har också tagits fram, se figur 9-1.



Figur 9-1. Kornstorleksfördelning för material presenterade i tabell 9-1 (efter Lagerblad 2005).

Tabell 9-1. Urval av resultat vid petrografisk undersökning samt analys av specifik yta med BET-metoden för material mindre än 0,25 mm, se Lagerblad (2005).

Beteckning	Namn	Textur	Specifik yta (m <sup>2</sup> /kg)
K1	Granit	grov	976/895
K2	Granit	grov	2800/1315
K3	Kvartssyenit	grov	840
K4	Granit	medel	2490/2515
K5	Kvartssyenit	medel	520/706
K6	Granodiorit	grov	610
K7	Granodiorit	medel	1150
K8	Kvartssyenit	fin/medel	4140
K9	Granit	medel	890
K12	Granodiorit	grov	870
K13	Granit	medel	920
K14	Granodiorit	grov	1030
K15	Granit	grov	780
K16	Granit	grov	74
K18	Granit	medel	960

Även för bedömning av fördelningen av material mellan olika kornstorleksfraktioner har använts material K16. Av figur 9-1 framgår att endast en mindre del av volymen av bergkross utgörs av den fraktion som är mindre än 0,25 mm. Andelen av fraktionen mindre än 0,25 mm i K16 har uppskattats till 3,75 %. Det betyder att bidraget till total yta från denna fraktion är 3,75 % av 74 m<sup>2</sup>/kg eller 2,775 m<sup>2</sup>/kg. För övriga kornstorlekar mellan 0,25 och 2 mm har beräknade ytor adderats till detta värde genom antagande om att partiklarna är sfäriska och antagande om att medelvärdet av diametern bestämmer ytan, se tabell 9-2a.

**Tabell 9-2a. Bestämning av yta för olika kornstorleksfraktioner genom antagande om att partiklarna är sfäriska.**

	Diam cm	Yta/korn cm <sup>2</sup>	Vol/korn cm <sup>3</sup>	Densitet g/cm <sup>3</sup>	Massa/korn g	Antal/kg	Specifik yta m <sup>2</sup> /kg
0,25–0,5 mm	0,0375	0,00442	2,76E-05	2,724	7,52E-05	1,330E+07	5,874
0,5–1 mm	0,075	0,01767	0,000221	2,724	0,000602	1,662E+06	2,937
1–2 mm	0,15	0,07069	0,001767	2,724	0,00481	2,077E+05	1,468

**Tabell 9-2b. Bestämning av totalyta. Bestämning av andelar i olika fraktioner baseras på material K16 (0–2 mm) enligt Lagerblad (2005).**

Ack andel (%)	Andel	Kornstorlek mm	Specifik yta m <sup>2</sup> /kg	Total yta för kornfraktionen m <sup>2</sup> /kg
3,75 %	0,0375	<0,25	74	2,775
14 %	0,1025	0,25 till 0,5	5,874	0,602
73,20 %	0,592	0,5 till 1	2,937	1,739
100 %	0,27	1 till 2	1,468	0,397
		<b>Totalyta</b>		<b>5,512</b>

Vid bedömning av storleksfördelning för de fraktioner som lakats av det sprängda berget från TASS-tunneln har vi antagit att resultaten av Lagerblads undersökning för detta material (K16) är jämförbara med sprängkross i TASS-tunneln.

Beräkningar av specifik yta för den mindre fraktionen från TASS-tunneln (0–2 mm) redovisas i detalj i tabell 9-2b. I tabellen finns redovisat viktsandelar för de olika fraktionerna. För sprängmassorna antas de vara samma som för det valda jämförelsematerialet K16. Som nämndes tidigare har detta material en relativt låg andel i finfraktionen vilket därmed gör att den totala ytan för sprängmassorna blir en uppskattning i underkant.

För den större fraktionen från TASS-tunneln (2–10 mm) antas ytan förändras proportionellt mot den förändrade medeldiametern i provet (se t ex Troedsson och Nykvist 1973). Det betyder att medeldiametern ökar från medeldiametern 1 mm i fraktionen 0–2 mm till medeldiametern 6 mm i fraktionen 2–10 mm och resulterar i en minskad yta med samma faktor, nämligen en sjätte del av den totala ytan för fraktionen 0–2 mm (5,512 m<sup>2</sup>/kg enligt tabell 9-2b) dvs 0,919 m<sup>2</sup>/kg. Vi bedömer att detta är ett rimligt värde och att ytan inte är avsevärt mindre i 2–10 fraktionen än i 0–2 fraktionen eftersom siktningen utförts som torrsiktning och en hel del finmaterial då stannar kvar i den större fraktionen.

Ett antagande om en liten yta medför att den utlakade mängden per ytenhet i de kvarvarande sprickorna blir stor. Vid beräkning av specifik yta har antagits att materialets densitet är 2 724 kg/dm<sup>3</sup>, vilket är ett medelvärde för data för Äspö HRL (Sundberg 2003). Den specifika ytan av de analyserade proverna beräknat enligt ovan blir för fraktionen 0–2 mm 5,51 m<sup>2</sup>/kg (tabell 9-2b) och specifika ytan för fraktionen 2–10 mm därmed 0,92 m<sup>2</sup>/kg, och dessa värden har införts i tabell 9-3.

### 9.3.2 Lakningar

Lakningar utfördes enligt metodiken beskriven i avsnitt 3.2.4 vid sprängning i tunnelavsnittet 77,14 till 80,73. Resultat presenteras i tabell 9-4, se också tabellerna 8-1 och 8-2. Observera att eftersom totalhalterna är högre än lakbara halter används totalhaltsvärdena för att få ett konservativt antagande.

En summering av utlakade halter för alla prov i fraktionen 0–2 mm jämfört med summerade utlakade halter för alla prov i fraktionen 2–10 mm, enligt tabell 9-4, ger en utlakning på 1495 mg/kg (156,1 + 839 + 500) respektive 270,9 mg/kg (14,7 + 155,6 + 100,6). Detta innebär en faktor 5,5 i skillnad mellan de utlakade mängderna vilket stöder antagandet om att ytorna är omvänt proportionella mot medeldiametrarna.

**Tabell 9-3. Uppskattad maximal utlakning baserade på analyser av sprängmassor i TASS-tunneln Äspö. Notera att Tot N (mg/kg) kommer från tabell 8-1, och ytan från tabell 9-2b samt en sjätte del för fraktionen 2-10 mm (se text).**

	Tot N mg/kg	Yta m <sup>2</sup> /kg	Tot N mg/m <sup>2</sup>	Maximal utlakning mg/m <sup>2</sup>	Tillgänglig yta	Utlakning mg
TASS 0–2	1100	5,512	199,6	199,6	268	53 482
TASS 2–10	300	0,919	326,6	326,6	268	87 516

**Tabell 9-4. Resultat av kväveanalyser utförda på krossmaterial vid sprängning i TASS-tunneln i tunnelavsnitt 77,14 till 80,73 m. [mg/kg TS]. Se också tabellerna 8-1 och 8-2.**

	TASS1 0–2 mm	TASS1 2–10 mm	TASS2 0–2 mm	TASS2 2–10 mm	TASS3 0–2 mm	TASS3 2–10 mm
Summa NH <sub>4</sub> -N + NO <sub>2</sub> -N + NO <sub>3</sub> -N (lakning)	156,1	14,7	839	155,6	500	100,6
Tot-N (SIS-CEN/TS 15104:2006, SIS-CEN/TS 15407:2007)			1100	300		

## 9.4 Alt 1 Bedömning av maximal kvävetillförsel

### 9.4.1 Kvävetillförsel från sprickytor

Beräkningarna utgår ifrån den beräknade och uppskattade ytan för de båda storleksfraktionerna av sprängmassor. Sprickytan, interna sprickor, har uppskattats vara 128 m<sup>2</sup> enligt Olsson och Markström (2010) och är beräknad på en sträcka av 6 meter. Förutom sprickytan tillkommer tunnelns begränsningsyta som uppskattas till 4 ytor (tak, sula och väggar) med längden 6 m och bredden relaterad till genomskärningsarean dvs  $\sqrt{20}$  m. Den totala tillgängliga ytan för utlakning baserar sig på summan av den interna sprickytan (128 m<sup>2</sup>) samt tak, sula och väggar (140 m<sup>2</sup>; inklusive antagen ”skrovlighet”), dvs 268 m<sup>2</sup>. Denna yta bör emellertid inte vara tillgänglig för all utlakning eftersom det förutsattes att tunnelytorna tvättades. Det innebär att den återstående ytan tillgänglig för utlakning är, eller bör vara samma yta som utgörs av interna sprickor dvs 128 m<sup>2</sup>. Den möjliga utlakningen av kväve antas således basera sig på ett konservativt antagande (dvs en mindre yta skulle därmed ge en lägre kvävehalt som möjligen kvarstannar i berget).

För beräkning av den haltökning som kan uppkomma i vattnet antas att inget av det kväve som ursprungligen finns i bergmassan mobiliseras och transporteras bort från tunneln innan den har fyllts med fyllnadsmaterial och vatten. Det vill säga, allt kväve fördelas på det vatten som fyller tunneln efter återfyllnad och förslutning. Tunnelvolymen baseras på samma sträcka som sprickytan. Porositeten antas vara 35 % i den slutliga tunneln, vilket bedöms vara ett relativt lågt värde med tanke på att fyllnadsmaterial oftast har en lös packningsgrad. Detta innebär att den möjliga lakningen av kväve från ytor skall fördelas på 42 m<sup>3</sup> vatten. Möjligen kan porositeten vara högre i den bentonit som omger kapseln, men eftersom större delen av tunneln kommer att fyllas med andra typer av material så kommer de senare materialen att vara avgörande för medelporositeten.

Sprängningsarbeten kan maximalt bidra med en ökning av 2,08 mg/L kväve mätt som totalkväve i vattnet (se tabell 9-5).

**Tabell 9-5. Beräkning av maximal kvävetillförsel i TASS-tunneln i Äspö. För antagande se text samt Olsson och Markström (2010).**

	Möjlig lakning av N i tunnel (mg)	Volym vatten i tunnel- avsnitt (m <sup>3</sup> )	Halt i porvattnet (mg/L)
TASS2, 0–2 mm	53 482	42	1,27
TASS2, 2–10 mm	87 516	42	2,08

## 9.4.2 Kvävetillförsel från gas i sprickor

Med antagande om innesluten gas i sprickorna och med samma uppskattning av sprickyta som tidigare kan en volym gas uppkommen till följd av sprängning tänkas förekomma i berget.

- Medelvidden för sprickorna antas vara 0,1 mm. Detta är troligen en uppskattning i överkant särskilt för spränginducerade sprickor (Christiansson R 2009, personligt meddelande: i e-post 2009-12-07 anges som konservativt mått 0,03–0,05 mm) Sprickvolymen blir därmed  $12\,800 \times 0,001 \text{ dm}^3$ , eller 12,8 L.
- Volymen nitrösa gaser samt ammonium antas vara sammanlagt 0,1–2,1 % enligt Högström och Olin (1990). Volymen blir, med antagande om 2,1 %, därmed 0,27 L vid normalt atmosfärstryck.
- Molvolym för gas 22 L/mol vid atmosfärstryck ger 0,012 mol gas.
- Antag att endast tyngre gaser motsvarande  $\text{NO}_2$  bildas med molvikt 46 g/mol.
- Med en mängd av 0,012 mol och antagandet att endast tyngre gaser bildas medför att tillförseln av kväve maximalt blir 0,56 g.

Med samma antagande som tidigare fås att denna mängd skall fördelas på 42 m<sup>3</sup> vatten vilket innebär ett tillskott av 0,013 mg/L.

## 9.4.3 Bedömning av osäkerheter

Den största osäkerheten finns i bedömningen av specifika ytan av krossmaterialet. I jämförelsen med bergkross ovan, har valts det material som har lägst yta i finfraktionen. Av tabeller 9-1 till 9-4 framgår att andra realistiska värden skulle kunna innebära att utlakningen kommer från en yta som är en tiopotens högre vilket i motsvarande mån medför en halt i utströmmande vatten som är en tiopotens lägre.

Endast 3,75 % antagits utgöra finfraktionen, vilket är en låg andel, jämfört med annat krossmaterial.

Den mängd som kommer att laka ut har satts lika med totalhalten av kväve vilket enligt tabell 9-4 ovan är en marginell överuppskattning.

Antagandet att allt kväve stannar kvar på bergets sprickytor tills tunneln är helt fylld är en överuppskattning, eftersom tidserier av kväve visar på avtagande halter. Hur stort felet är är svårt att avgöra eftersom det endast är de sprickor som avger vatten vid fri dränering som mäts. Vid en helt fylld tunnel kommer även andra mindre sprickor att ge bidrag till flödet och därmed till halterna av ammonium och nitrat.

För porositet och tunnelvolym bedöms osäkerheterna vara små. Tillgänglig sprickyta bedöms beskrivas i Olsson och Markström (2010). Aperturen i spränginducerade sprickor har uppskattats med ledning av bland annat Christiansson (2009, personligt meddelande).

I räkneexemplet har ingen hänsyn tagits till att endast ammonium och nitrit bidrar till spänningskorrosion. Lakförsöken visar förekomst av ammonium och nitrat i samma storleksordning medan nitrialthalterna oftast har legat lägre särskilt för det finare materialet.

## 9.5 Alt 2 Bedömning av kvävehalter från tidsserier

### 9.5.1 Kvävetillförsel från vatten från sprickor

Beräkningarna utgår ifrån uppmätta halter i sprickor, se avsnitt 8.4. Figur 8-4 visas en diagram av kvävehalter för alla sprickor. Av denna figur framgår att halterna av totalkväve och ammonium är ofta mindre än 0,4 mg/L uttryckt som  $\text{NH}_4\text{-N}$  respektive Tot-N i de vattenförande sprickorna och minskar sedan till cirka 0,2 mg/L.



### **9.5.2 Kväve från icke-vattenförande sprickor**

De halter som uppmätts från sprickorna ovan representerar sprickor som ger vatten. I Olsson och Markström (2010) beskrivs sprickor i olika konfidensgrupper varav de flesta troligen inte ger vatten. När slutförvaret är klart kan dessa sprickor ge vatten. Ett rimligt antagande är att dessa sprickor då kommer att producera halter av kväve i nivå med de initiala halterna av vattenförande sprickor dvs 0,4 mg/L tot-N.

### **9.5.3 Kvävetillförsel från gas i sprickor**

Med den bedömning som gjorts ovan har hela tillskottet från sprickor bedömts och tillskottet av kväve från innesluten gas kommer därför att ingå i uppskattningen.

### **9.5.4 Bedömning av osäkerheter**

Förutom osäkerheten i de initiala halterna bedöms osäkerheten främst finnas i fördelningen av sprickradier i tunneln vara. Om man kan anta att icke vattenförande sprickor är sådana som har mindre radie än de vattenförande sprickorna så kommer deras bidrag att vara av mindre betydelse eftersom flödet är proportionellt mot  $r^4$  och sprickor som är väsentligt finare kommer därför att ge endast ett litet bidrag till de resulterande kvävehalterna i tunneln när slutförvaret fyllts med grundvatten.

## **9.6 Slutsatser**

I slutsatserna nedan har inte hänsyn tagits till bakgrundshalter av totalkväve.

### ***Alternativ 1 Bedömning av maximal kvävetillförsel***

Med givna antaganden, av allt kväve fördelas jämn på det vatten som fyller tunneln efter återfyllnad och förslutning, kommer halten av kväve (ammonium, nitrit och nitrat) att öka med maximalt 2,1 mg N/L. I denna uppskattning ingår kväve från vatten inneslutet i sprickor samt gas i sprickvolymerna uppkomna från sprängning. Bedömningen baseras på konservativa antaganden främst avseende specifik yta för det material som analyserats.

### ***Alternativ 2 Uppskattning av halter baserat på tidsserier***

Halterna av kväve (ammonium, nitrat och nitrit) bedöms uppgå till cirka 0,4 mg/L, den naturliga variabiliteten av kvävehalter i sprickor kan leda till högre halter i andra delar av Äspötunneln.

## 10 Slutsatser

- Den viktigaste beståndsdel i de flesta sprängmedel är kväve i olika former. Den helt dominerande delen av det kväve som finns i sprängmedel bildar kvävgas  $N_2$  som är en inert gas.
- Andra former av kväve som kan bildas är kväveoxider och ammoniak i gasfasen, samt ammonium, nitrit och nitrat i vattenfasen. Dessa former av kväve kan ha betydelse ur korrosions- eller miljösynpunkt.
- Stora mängder av kväve kan finnas kvar i sprängmassorna efter sprängning, dels från den bildade spränggasen men också från odetonerat sprängämne eller spill. Genom rätt handhavande kan mängden odetonerad kväve och spill nedbringas.
- Valet av sprängmedel har troligen mindre betydelse för mängden kvarvarande kväve. Undersökningar visar emellertid att emulsionssprängämne ofta ger mindre läckage av kväve än andra sprängmedel.
- Enstaka analyser utförda av kvävet speciering visar att nitrat och ammonium är de dominerande formerna av kväve i vatten.
- Höga halter av kväve kan uppkomma i länshållningsvatten vid sprängningsarbeten. Bedömningen är att mellan 1 och 10 % av kväveinnehållet i sprängmedlet hamnar i dräneringsvattnet. Halterna i vatten kan öka med ca 2 tiopotenser jämfört med halterna i naturligt berggrundvatten (100 respektive 1 mg/L).
- Minskningen av kvävehalter i länshållningsvatten eller från sprängningsarbeten, är, om vatten finns tillgängligt, att döma av litteraturstudien och fallstudien en snabb process (se figur 6-1). Förekomst av fickor i berget eller delar med låg vattenomsättning kan medföra att kväve stannar kvar i berget. Uppgifter saknas om hur lång tid som kväve kan finnas kvar i berg eller sprängmassor under sådana förhållanden.
- Motstridiga uppgifter finns om hur stor mängden av gas är som stannar kvar i berget. Räkneexempel tyder på att denna mängd kan vara varierande och bero på sprickigheten i berget. Av allt att döma har platsspecifika förhållanden (sprickighet etc) en stor betydelse för mängden gas som kvarstannar i berget.
- Avgång av gas bedöms leda till att *en del av* kväveinnehållet i gasen löser sig eller reagerar med vattnet och blir därmed tillgängligt för uttransport via vatten. Endast korttidsexperiment finns emellertid som visar hur stor andel av gasens kväveinnehåll som kan reagera/lösa sig och sedan transporteras via vatten.
- Studier av kvävehalter från olika källor i TASS tunneln har gjorts. Resultaten visar att halterna av kväve i det vatten som analyserades i lakvattnet var mellan en och två storleksordningar högre än halterna i det vatten som kom från sprickor. Vid sprängning finns föga vatten i tunneln. Vattnet tillförs först efter utvädring av gaser. Detta indikerar att de uppkomna halterna i länshållningsvattnet i första hand beror på kväve från utlakning av sprängmassor, och i mindre utsträckning från uttransport av spränggaser lösta i vatten.

De analyser avseende kväve i sprängmassor som hittats i litteraturen, har utförts genom extraktion med vatten. I fallstudien har jämförande analyser utförts mellan totalhalter av kväve och lakbara mängder i ett prov. Resultaten visar att en stor andel av de kväveföreningar som finns i berget eller som uppkommer till följd av sprängning är lösligt, särskilt jämfört med andra förekommande ämnen, sannolikt uppgående till 50–75 %. Även resterande kväve kan vara lösligt i vatten. Den uppskattning av löslighet av kväve från sprängmassor som beskrivits i Ekblad (1995) (25 till 50 %) kan därför vara underskattade i förhållande till TASS-tunneln.

## 11 Rekommendationer

Kväve på sprickytor förefaller att vara den dominerande kvävekällan enligt litteraturstudier och lakförsök. Detta innebär att borttransport av material är ett enkelt sätt att minska emissionerna.

En betydande del av kvävet är vattenlösligt. Det är osäkert hur stor denna andel är. Om tvättning är den enda metod som skall användas för att eliminera kväve från sprängmassor bör denna andel kvantifieras.

Mängden kvarvarande gas i berget förefaller vara platsberoende och påverkas av ett flertal faktorer. Uppföljning bör göras på varje specifik plats för att bestämma mängden kvarvarande gas i berget.

## Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på [www.skb.se/publikationer](http://www.skb.se/publikationer). Referenser till SKB:s opublicerade dokument finns samlade i slutet av referenslistan. Opublishade dokument lämnas ut vid förfrågan till [dokument@skb.se](mailto:dokument@skb.se).

- Aastrup M, Thunholm B, Johnson J, Bertills U, Berntell A, 1995.** Grundvattnets kemi i Sverige. Rapport 4415, Naturvårdsverket och Sveriges geologiska undersökning.
- André M, Malmström M, Neretnieks I, 2009.** Specific surface area determinations on intact drillcores and evaluation of extrapolation methods for rock matrix surfaces. *Journal of Contaminant Hydrology* 110, 1–8.
- Arihanti E, Bojinov M, Mäkelä K, Laitinen T, Saario T, 2000.** Stress corrosion cracking investigation of copper in groundwater with ammonium ions. Posiva Working Report 2000-46, Posiva Oy, Finland.
- Berg R, Blom L, 2001.** Kartläggning av kväve- och pH-nivåer vid tunneldrivning i Hjältakullen. Examensarbete, 10 poäng. Institutionen för naturvetenskap och miljö, Mitthögskolan, Örnköldsvik.
- Ekblad A, 1995.** Kvävespridning från bergtäkt: en förstudie. Publikation B 418, Geologiska institutionen, Chalmers Tekniska Högskola.
- Forsberg H, Åkerlund H, 1999.** Kväve- och sprängämnesrester i LKAB:s malm-, gråbergs- och produktflöden. Examensarbete 1999:258, Institutionen för samhällsbyggnad, Avdelningen för tillämpad geologi, Luleå tekniska universitet.
- Grinder B, 2003.** Omhändertagande av processvatten från tunnelbyggen. Uppsala universitet.
- Högström K, Olin M, 1990.** Studie av grundvattnets kväveinnehåll i en bergtäkt. Publikation B 352, Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborgs universitet.
- Johansson C, 2002.** Kväveläkning från LKAB:s gråbergsdeponier. Examensarbete, 2002:074, Civilingenjörsprogrammet, Luleå Tekniska Universitet.
- King F, Ahonen L, Taxén C, Vuorinen U, Werme L, 2001.** Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository. SKB TR-01-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerblad B, 2005.** Krossat berg som ballast till betong. MinBaS projekt 2,2, Rapport 2:19, MinBaS AB, Stockholm.
- Mathioulakis E, 2000.** Kväveanalys av sprängstensmassor från NCC Södra Länken, projekt del 2. Stockholm: NCC.
- Naturvårdsverket, 1999.** Bedömningsgrunder för miljö kvalitet. Grundvatten. Rapport 4915, Naturvårdsverket.
- Olsson M, Markström I, Pettersson A, Sträng M, 2009.** Examination of Excavation Damage Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. SKB R-09-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Persson P-A, Holmberg R, Lee J, 1994.** Rock blasting and explosives engineering. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Pitcairn I K, Teagle D A H, Kerrich R, Craw D, Brewer T S, 2005.** The behavior of nitrogen and nitrogen isotopes during metamorphism and mineralization: evidence from the Otago and Alpine Schists, New Zealand. *Earth and Planetary Science Letters* 233, 229–246.
- Rindeskog S, 2009.** Tunnelvatten – Miljöaspekter och åtgärder. Botniabanan AB, Örnköldsvik.
- SIS-CEN/TS 15104:2006.** Fasta biobränslen – Bestämning av total kol-, väte-, och kvävehalt – Instrumentmetoder. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SIS-CEN/TS 15407:2007.** Fasta återvunna bränslen – Metod för bestämning av kol-, väte- och kvävehalt. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- Sjölund G, 1997.** Kväveläckage från sprängstensmassor. Examensarbete 1997:332, Institutionen för samhällsbyggnad, Avdelningen för tillämpad geologi, Luleå tekniska universitet.

**Smellie J, Laaksoharju M, Tullborg E-L, 2002.** Hydrogeochemical site descriptive model – a strategy for the model development during site investigations. SKB R-02-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SS-EN 12457-2.** Karaktärisering av avfall – Laktest – Kontrolltest för utlakning från granulära material och slam – Del 2: Enstegs skaktest vid L/S 10 l/kg för material med partikelstorlek mindre än 4 mm (utan eller med nedkrossning). Stockholm: Swedish Standards Institute.

**Sundberg J, 2003.** Thermal properties at Äspö HRL. Analysis of distribution and scale factors. SKB R-03-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Tilly L, Ekvall J, Borg G, Ouchterlony F, 2005.** Vattenburna kväveutsläpp från sprängning och sprängstensmassor. SveBeFo rapport 72, Stiftelsen Svensk bergteknisk forskning.

**Troedsson T, Nykvist N, 1973.** Marklära och markvård. Stockholm: Almqvist & Wiksell.

**Werneman A, Rundqvist G, Carlén P, 2005.** Hur kan miljöpåverkan från sprängning minskas? Nitro Consult, SBUF projekt 11 408/443.

### ***Opublicerade dokument***

**Olsson M, Markström I, 2010.** Bestämning av specifik yta för sprängsprickor. SKBdoc 1232264 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.