

RAPPORT LNR 3920-98

Avrenning av nitrogen fra tunnelmasse



Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet:

www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 1
4890 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5008 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-NIVA A/S

9015 Tromsø
Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 77 68 05 09

Tittel Avrenning av nitrogen fra tunnelmasse	Løpenr. (for bestilling) 3920-98	Dato 1998.10.01
	Prosjektnr. Undernr. O-98066	Sider Pris 26
Forfatter(e) Bækken, Torleif	Fagområde Vassdrag	Distribusjon Fri
	Geografisk område Buskerud	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Statens vegvesen, Oslo	Oppdragsreferanse
--	-------------------

Sammendrag

For å få bedre kunnskap om hvor mye nitrogen som renner av fra sprengstein fra tunneler, og hvor mye av dette som kan forefinnes som ammoniakk, har Statens vegvesen ønsket å sette igang en utlekkingstest på tunnelmasse. Testen ble utført på representative, uspylte delprøver fra 8 salver. Prøvene hadde en masse omkring 11 tonn. Det ble anvendt emulsjonssprengstoff bestående i hovedsak av NH_4NO_3 . Forbruket var i gjennomsnitt 555 kg/salve. Til fjellsikring ble det anvendt sprøytebetong. Hver prøve ble vasket 5 ganger i 10m^3 containere. Vannprøver ble analysert for NH_4 , NO_3 , pH og konduktivitet. 65 % av nitrogenet ble vasket ut ved 1. vask og ga gjennomsnittlige konsentrasjoner av NH_4 og NO_3 på 46 mgN/L og 58 mgN/L. Etter 5. vask var konsentrasjonene henholdsvis 2,5 og 1,2 mgN/L. pH varierte mellom 8,1 og 11,8 med høyest verdi fra salver tatt rett etter bruk av sprøytebetong. Gjennomsnittlig avrenning av total nitrogen var 24,2 gN/tonn og tilsvarte 14,7 % av nitrogenet i benyttet sprengstoff. Ved dumping av tunnelmasser vil konsekvenser for vannkvalitet og biologi avhenge av mengden sprengstoffrester, pH-verdi samt resipienttype og størrelse. Det bør vurderes å sette i verk tiltak som reduserer avrenningen av nitrogen fra tunnelanlegg. Tiltaksmetoder og virkningen av tiltak på nitrogenavrenning fra tunneler er lite/ikke utprøvd. Mulige innfallsvinkler er: bedre arbeidsrutiner for å redusere søl av sprengstoff ved håndtering og lading, og spyling av røysa før utkjøring med oppsamling og rensetiltak på tunnelvannet.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. Tunnelmasse	1. Tunnel blasted rocks
2. Avrenning	2. Runoff
3. Nitrogen	3. Nitrogen
4. Ammoniakk	4. Ammonia

Torleif Bækken
Prosjektleder

ISBN 82-577-3509-4


for Dag Berge
Forskningsjef

Avrenning av nitrogen fra tunnelmasser

Forord

Prosjektet har kommet i gang etter forespørsel fra Statens vegvesen og Dyno industrier som ønsket å sette igang en storskala utlekkingstest på tunnelmasse. Testen ble utført i samarbeid med Hordaland vegkontor i forbindelse med tunnelarbeidene i Elgskauåsen, Røyken kommune i Buskerud. Vi takker Hordaland vegkontor for all hjelp og velvilje, og spesielt Arvid Thorvik for tilrettelegging av praktiske forhold i forbindelse med testen.

Jan Vestre har vært Dynos representant i prosjektet. Ingvild Storås har vært prosjektleder ved Statens vegvesen. Begge har deltatt aktivt i prosjektet både under den praktiske utførelsen av testen og under utarbeidelsen av rapporten.

Oslo, 31.08. 1998

Torleif Bækken

Innhold

Sammendrag	5
Summary	7
1. Innledning	8
2. Metode og materiale	8
2.1 Sted, geologi	8
2.2 Steinuttak	8
2.3 Forsøksoppsett	9
2.4 Sprengstoff	14
2.5 Sprøytebetong	14
2.6 Prøvetaking og analyser	14
3. Resultater	15
3.1 Utlekkingsforløp, konsentrasjoner	15
3.1.1 Nitrogen	15
3.1.2 pH-verdier	18
3.1.3 Konduktivitet	18
3.2 Mengder	19
4. Diskusjon	20
5. Konklusjon	22
6. Referanser	23
7. Vedlegg	24

Sammendrag

- Tunnelmasse vil i varierende grad inneholde sprengstoffrester som skyldes søl fra ladning og fra udetonerte ladninger. Sprengstoff som anvendes i dag består hovedsaklig av ammoniumnitrat (NH_4NO_3). En del av sprengstoffrestene vil bli med sprengsteinen til deponering, mens den resterende delen vil renne av med tunnelvannet.
- For sikring av tak og vegger i tunneler anvendes ofte sprøytebetong. Sementen og akselleratoren ("vannglass"/natriumsilikat) i sprøytebetongen medfører at den er sterkt alkalisk. Under påføringen vil det alltid bli noe søl (prelletap). Tunnelmasse som inneholder søl av sprøytebetong vil ha en høy pH-verdi, og andelen ammoniakk av total ammonium kan bli stor.
- For å få bedre kunnskap om hvor mye nitrogen som renner av fra sprengstein fra tunneler, og hvor mye av dette som kan forefinnes som ammoniakk, har Statens vegvesen engasjert NIVA til å utføre en utlekkingsstest på tunnelmasse. Testen er et storskala feltforsøk med sprengstein fra tunneldrivingen ved Elgskauåsen i Røyken kommune. Det er i denne tunnelen anvendt sprøytebetong til fjellsikring.
- Testen ble utført på representative prøver fra uspylte tunnelmasser. Prøvene ble tatt fra 8 salver etter den såkalte "Kvarteringsmetoden". Den innebærer at hver fjerde enhet (lass, lasteskuffe e.l.) tas ut for videre bearbeiding. Siste fjerdedel utgjorde 1/64 av totalmassen. Total utsprengt tunnelmasse ble beregnet for hver salve. Massen varierte fra ca 560 til 1090 tonn.
- Ved sprengningen ble det anvendt emulsjonssprengstoff med kjemisk hovedbestanddel ammoniumnitrat (NH_4NO_3). Forbruket av sprengstoff i hver salve var gjennomsnittlig 555 kg med variasjoner mellom 310 og 668 kg. Sprøytebetongen består i hovedsak av sand, sement, silika, fiber og aksellerator ("vannglass"/natriumsilikat) samt vann. Betongforbruket varierte fra 12 til 18 m^3 for hver sprøyting.
- Hver prøve hadde en masse omkring 11 tonn. Den ble i hovedsak vasket fem ganger i 10 m^3 containere. Testvannet etter hver vasking ble overført til en vanncontainer. Herfra ble det tatt vannprøver for analyse av nitrater (NO_3), ammonium (NH_4), pH og konduktivitet. Ammoniakkandelen (NH_3) ble beregnet fra ammoniuminnhold, pH og temperatur.
- Mer enn halvparten av nitrogenet var vasket ut ved første vask for alle prøvene. Gjennomsnittlig ble 65% av ammoniumnitrogenet ($\text{NH}_4\text{-N}$) vasket ut ved første vask. Etter to vasker var mer enn 80% av nitrogenet vasket ut for de fleste salvene.
- Konsentrasjon av nitrogenforbindelser i testvannet var høyest etter første vask. I gjennomsnitt for alle salvene var konsentrasjonene etter første vask for $\text{NH}_4\text{-N}$ og $\text{NO}_3\text{-N}$ henholdsvis 46 mgN/L og 58 mgN/L, men de hadde sunket til henholdsvis 2,5 mgN/L og 1,2 mgN/L etter siste vask. Det ble registrert tildels meget høye pH-verdier i testvannet. Verdiene holdt seg høye også etter gjentatte vaskinger og varierte fra 8,1 til 11,8. Konsentrasjonene av $\text{NH}_3\text{-N}$ var meget høye i prøvene med høyest pH-verdier og høyt ammoniuminnhold. De høyeste pH-verdiene ble funnet i salvene som ble sprengt nærmest sprøytebetongen.
- I gjennomsnitt for alle salvene var avrenningen av ammonium (NH_4) 11,5 gN/tonn. Avrenningen av nitrater (NO_3) var gjennomsnittlig 12,7 gN/tonn. Avrenning av total nitrogen fra tunnelmassene var gjennomsnittlig 24,2 gN/tonn. Det tilsvarte i 14,7 % av nitrogeninnholdet i benyttet sprengstoff. Andelen sprengstoff som renner av varierte mellom 8,5 % og 23,5 %. Resultatene samsvarte

godt med resultater fra tilsvarende undersøkelser i utlandet. En undersøkelse fra Sverige viste en avrenning av nitrogen fra tunnelmasser som tilsvarte 18 % av nitrogen i benyttet sprengstoff.

- Hvor raskt nitrogenet kommer ut i vannmassene under naturlige forhold vil være avhengig av hvor mye tunnelmassene "vaskes" i det de dumpes i resipienten, hvor kompakt deponiet blir og om det er vanngjennomstrømming i massene. Etter at nitrogenforbindelsene er kommet ut i de frie vannmassene i resipienten vil de fortynnes. I elver tilføres stadig nytt vann som tynner ut nitrogenavrenningen fra deponiet. I mer rolige vannforekomster vil vannet i mindre grad skiftes ut. Konsekvenser for vannkvalitet og biologi i resipientene er derfor avhengig både av størrelse og type av resipient.
- Det er meget få undersøkelser der en kjenner avrenningspotensialet for nitrogen i tunnelmassen og samtidig har resultatene for konsentrasjonene i resipienten etter dumping. I Drammenselva ved Mjøndalen ble lagret tunnelmasse brukt som fylling våren 1998. Massen inneholdt trolig omkring 1/3 av nitrogenet funnet i tunnelmassen i Elgskauåsen. Konsentrasjonene i elva under en periode med dumping var forholdsvis lave og tilskuddet av ammonium fra fyllingen hadde liten betydning for vannkvaliteten i en stor elv som Drammenselva. En må regne med større virkninger i små resipienter.
- Dersom et gjennomsnittslas på 10 m³ med tunnelmasse fra foreliggende undersøkelse dumpes i vann og alt nitrogenet løses umiddelbart, vil det kreve en vannmengde på 500-1000 m³ per lass for å holde en konsentrasjon tilsvarende tilstandsklasse IV ("dårlig tilstand") (600 -1200 µgN/L) for nitrogen i henhold til SFTs klassifiseringssystem for vannkvalitet.
- Det bør vurderes å sette i verk tiltak for å redusere avrenningen av nitrogen fra tunnelanlegg. Det gjelder særlig avrenningen av ammonium og ammoniakk. Tiltaksmetoder og virkninger av tiltak på nitrogenavrenning fra tunneler er ennå lite/ikke utprøvd.
- Mulige tiltak:
 1. Søl av sprengstoff under håndtering og lading kan reduseres ved å bedre arbeidsrutiner.
 2. Spyling av røysa med vann før den kjøres ut. Det medfører at en del av sprengstoffrestene vaskes vekk fra røysa, men det vil medføre økt nitrogenavrenning via tunnelvannet. Dette gir mulighet til også å gå inn med tiltak for å redusere nitrogeninnholdet, og særlig nitrogen i form av ammoniakk.
 3. Nøytralisering av tunnelvannet med syre og/eller vasking av røysa i svak syre. Tiltaket omformer ammoniakk til ammoniumioner. Det totale nitrogeninnholdet forblir imidlertid like høyt, og en innfører nye problemstillinger ved syrehåndtering og utslipp.
 4. Ved lagring av tunnelmasse kan nitrogeninnholdet reduseres ved at nitrater og ammonium renner av ved nedbør samt ved avdamping av eventuell ammoniakk. Fordi denne typen naturlig avrenning er avhengig været, og hvor store og kompakte deponiene er, er det vanskelig å forutsi om en får akseptable konsentrasjoner.

Summary

Title: Nitrogen runoff from tunnel blasted rocks

Year:1998

Author:Torleif Bækken

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 82-577-3509-4

1. Innledning

Tunnelmasse vil i varierende grad inneholde sprengstoffrester som skyldes søl fra lading og fra udetonerte ladninger. Sprengstoff som anvendes i dag består hovedsaklig av ammoniumnitrat (NH_4NO_3). Ammoniumnitrat er lett løselig i vann, og vil derfor lett vaskes av sprengstein fra tunneldriving og annen sprengningsvirksomhet. Endel av sprengstoffrestene vil renne av med tunnelvannet, mens den resterende delen vil bli med sprengsteinen til deponering. Hvor mye som kommer via tunnelvann og via sprengsteinen vil blant annet avhenge av om, og hvor mye, steinmassene spyles med vann før utkjøring.

I vannløsning er ammonium (NH_4) i likevekt med ammoniakk (NH_3). Andelen ammoniakk avhenger av pH og temperatur slik at andelen ammoniakk øker både med økende pH og økende temperatur. Ved pH 8 utgjør ammoniakk omkring 1- 2,5% av total ammonium i temperaturområdet 5-15°C. Ved pH 7 utgjør ammoniakk omkring 0,1-0,25% i tilsvarende temperaturområde. Ammoniakk er forholdsvis giftig for vannlevende organismer som f.eks. laksefisk (Alabaster & Lloyd 1982, Knoph 1995,). Ved høy pH i resipienten og stor tilgang på ammoniumioner kan dette være et problem. Av denne grunn har myndighetene i USA gitt vannkvalitetskriterier for ammonium avhengig av både pH og temperatur (U.S.EPA 1985). De samme kriteriene brukes også i Canada (CCREM).

Ammoniumnitrat kan virke gjødselende (eutrofierende) i vann, særlig i marine miljøer der nitrogen ofte er en vekstbegrensende faktor. I ferskvann derimot er nitrogen sjelden en vekstbegrensende faktor. I forbindelse med sikring av tak og vegger i tunneler anvendes ofte sprøytebetong. Sementen i sprøytebetong er i seg selv alkalisk. Den vanligst anvendte akselleratoren ("vannglass"/natriumsilikat) som brukes i sprøytebetongen er sterkt alkalisk. Under påføringen vil det alltid bli noe søl (prelletap). Det innebærer at avrenning fra tunnelmasse som inneholder søl av sprøytebetong vil ha en høy pH-verdi, og andelen ammoniakk av total ammonium kan bli stor.

For å få bedre kunnskap om hvor mye nitrogen som renner av fra sprengstein fra tunneler, og hvor mye av dette som kan forefinnes som ammoniakk, har Statens vegvesen ønsket å sette igang en utlekkingsstest på tunnelmasse. Det ble valgt å kjøre testen som et storskala feltforsøk der det skulle anvendes nysprengt tunnelmasse med representativ sammensetning av steinstørrelser. Det ble valgt å bruke sprengstein fra tunneldrivingen ved Elgskauåsen i Røyken kommune. Det blir i denne tunnelen anvendt sprøytebetong til fjellsikring.

2. Metode og materiale

2.1 Sted, geologi

Testen ble utført med stein fra drivingen av Elgskauåsen tunnel i Røyken kommune i Buskerud. Tunnelen blir en del av veiforbindelsen fra Oslofjordtunnelen og videre vestover. Bergarten i dette området domineres av røykengranitt med innslag av diabas. Utlekking av ioner fra selve bergartene forventes ikke i vesentlig grad å influere på resultatene av testen.

2.2 Steinuttak

Testen ble utført på 8 salver. For å redusere kompleksiteten og kostnadene ved testopplegget, ble den såkalte "Kvarteringsmetoden" anvendt for i best mulig grad å sikre en representativ prøve fra hver salve. Den innebærer at hver fjerde enhet (lass, lasteskuffe e.l) tas ut for videre bearbeiding. Fra denne

massen tas det videre ut fjerdedeler. I foreliggende test var det 3 stk fjerdedelsuttak. Siste fjerdedel utgjør da 1/64 av totalmassen. En slik metode skal teoretisk sett gi en gjennomsnittsprøve for hver salve, men den gir ingen informasjon om variasjoner mellom prøver fra ulike deler av salven.

I foreliggende forsøksopplegg ble hvert fjerde lass kjørt vekk til lagring på egen plass for videre oppdeling (Figur 1- 6). For salve S1 startet dette med det første utkjørte lasset, og deretter hvert fjerde lass til hele røysa var kjørt ut. Etter salve S2 ble det andre lasset tatt ut til videre oppdeling, ved salve S5 første lasset igjen osv. Samlet ble det kjørt ut 25-30 lass for hver normale salvestørrelse. Det ga 7-8 lass til videre oppdeling. Hvert lass ble lagt i en egen haug inntil forrige lass. En hjullaster fordelte disse massene med hver 4. skuffe til eget lager, mens de øvrige ble kjørt vekk. Massene ble denne gangen samlet i én haug med topp-påfylling. Det sikret at siste prøveuttaket, ca 1,5 skuffe tatt med hjullasteren, ble sammensatt av alle delprøvene i haugen. Denne prøven ble dumpet i en testkontainer.

2.3 Forsøksoppsett

Til testen ble det brukt containere med størrelse 10 m³. Det var behov for to typer; selve testkontaineren for steinmassen (Kontainer, stein) og en kontainer til å samle opp testvannet i (Kontainer, vann). Det ble anvendt 4 sett av containere (stein + vann) nummerert fra 1-4 (Tabell 1).

Testkontainerene ble påsveisert en rørstuss med stoppekran nede i forkant for uttak av testvannet. Ved hjelp av en hjullaster ble testkontaineren fylt opp til den laveste kanten med en antatt representativ prøve sprengstein (etter "Kvarteringsmetoden", se 2.2) (Figur 1 og Figur 4). Det var før påfyllingen av steinmassene fylt en del vann i testkontaineren, anslagsvis ¼ av totalvolumet. Overflaten av steinmassen ble deretter spylt og kontaineren fylt med vann slik at hele steinprøven ble dekket.

Vannet anvendt i testen ble tappet fra ledningsnettet til Røyken kommunes vannverk (Sætrevannet). Vannet var svakt surt og hadde forøvrig normal ionesammensetning (Tabell 1).

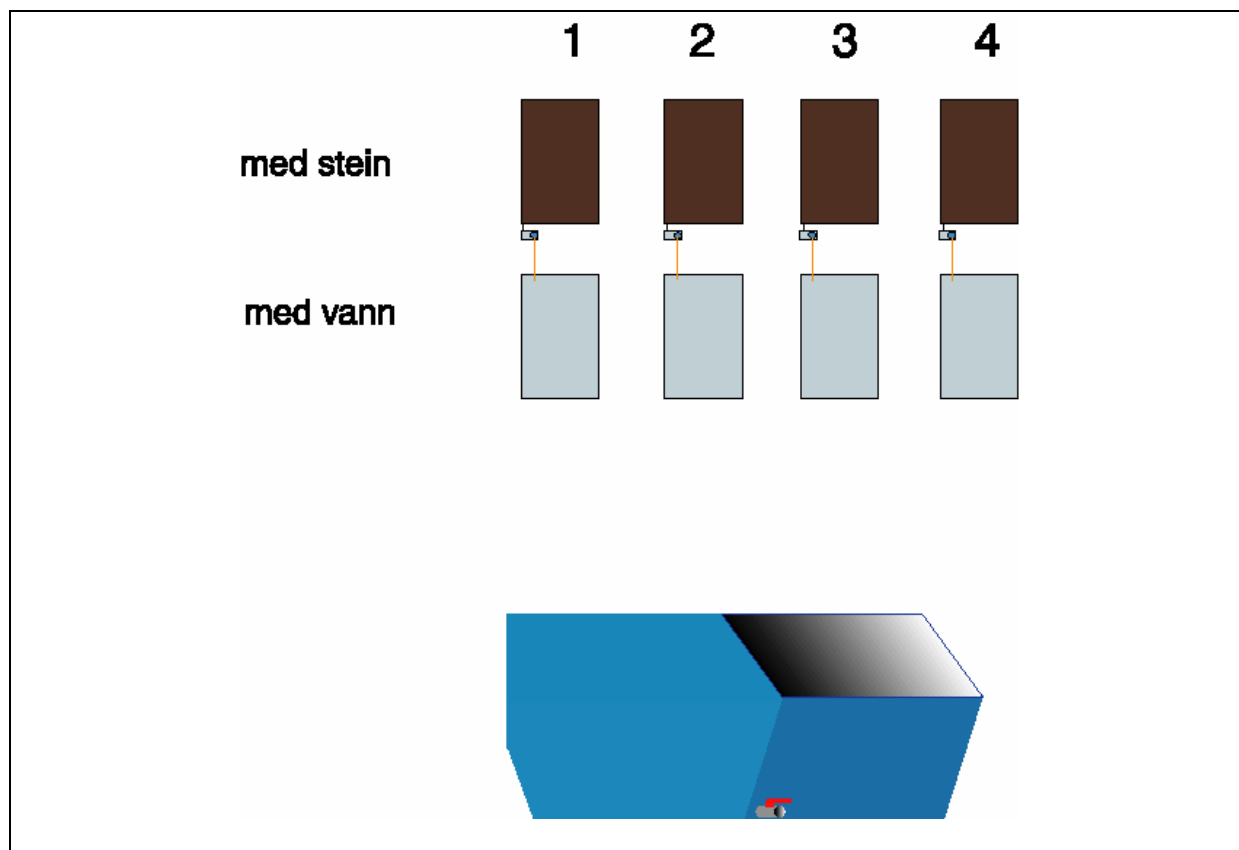
Full påfylling av vann i testkontaineren tok omkring 0,5 timer. Avtapping av testvannet startet som regel umiddelbart etter påfyllingen var avsluttet. Avtappingstiden varierte fra omkring 1,5 til 2,5 timer. Variasjonen i tid skyldtes mer eller mindre tilstopping av utløpsrøret. Den totale kontakttiden mellom vann og sprengstein er estimert til 2,5 timer der ikke annet er målt.

Det ble totalt gjort forsøk med 8 salver (S1-S8). Hver salve ble vasket fem ganger (V1-V5), unntatt salve S1 som ble vasket 6 ganger. Steinmassen fra S1 lå 6 døgn i 6. vaskevann. I hovedsak ble utvaskingen utført umiddelbart etter hverandre. Noen unntak ble gjort fra dette mønsteret:

- når vaskingen ble midlertidig avsluttet før siste vask (V2-V4) (på grunn av behov for hvile sein natt) ble steinmassen ikke påført nytt vann før om morgenen,
- når arbeidet ble midlertidig avsluttet rett før siste vask (V5), ble steinmassen stående i siste vaskevann til avtapping om morgenen.

Disse forholdene er anmerket i vedlegg 1.

Testvannet fra testkontainerne rant direkte ned i en plastkasse. Vannet ble pumpet videre til oppsamlingskontaineren for testvann ved hjelp av en lensepumpe med av/på-bryter i flottør. Alt vannet fra vaskingen ble pumpet over i vannkontaineren. Vannvolumet varierte mellom ca 1,6 m³ og 2 m³, avhengig av "ledig plass" mellom stein og slam i testkontaineren. I de foreliggende beregningene for avrenningsmengder er det for vannvolumet for hver vask i salve 1 (S1) brukt 1,6 m³ og 1,8 m³ i de øvrige salvene. Det innebærer at det samlede volumet av vann brukt for utvaskingen av S1 var 9,6 m³ og for de andre 9,0 m³.



Figur 1. Forsøksoppsett med containere for fylling av tunnelmasse og for testvann. Overføring av vann mellom containerene skjer ved lensepumper og slanger (se tekst).



Figur 2. Hvert 4. lass tunnelmasse dumpes i egne hauger.



Figur 3. Hver 4. skuffe dumpes i egen haug med topp-påfylling. Resten kjøres vekk.



Figur 4. 1 1/2 skuffe tunnelmasse dumpes i hver testkontainer.



Figur 5. En kontainer med tunnelmasse veies.



Figur 6. En vannprøve hentes opp med vannprøvetaker.

Tabell 1. Kjemisk sammensetning i vannprøver fra tre steder på ledningsnettet til Røyken kommunes vannverk tatt 25/8 1997, sammen med verdier i en prøve tatt fra samme ledningsnett ved tunnelanlegget på Elgskauåsen 20/4 1998.

Parameter	Enhet	Elgskauåsen	Jerdal	Hyggen	Båtstø
pH		6,15	6,38	6,09	6,13
Konduktivitet	mS/m	3,19	3,8	3,7	3,6
Turbiditet	FTU		0,41	0,73	0,41
TOC	mgC/L		2,5	2,1	2,2
Alkalitet	µmol/L		96	77	76
Sulfat	mgSO ₄ /L		5,2	5,4	5,2
Klorid	mg/L		2,9	2,9	2,9
Kalsium	mg/L		3,9	3,4	3,5
Magnesium	mg/L		0,25	0,39	0,29
Nitrat	µg/L	80	220	240	230
Ammonium	µg/L	10	10	<10	<10
Jern	µg/L		39	230	33
Mangan	µg/L		<3	44	5

Konsentrasjoner av stoffer i testvannet avhenger av hvor mye vann som anvendes til utvaskingen i forhold til mengden som skal vaskes. I foreliggende test var forholdet mellom tunnelmasse og vann 11 t/1,8 t for hver vask, og 11 t/9 t for hele utvaskingen. Volummessig var forholdet 6,7 m³/1,8 m³ for hver vask, og 6,7 m³/9 m³ for hele utvaskingen (for tetthet fjell 2,6 g/cm³ og volumekspansjon fra fast fjell til røys på 1,6 ganger).

Mengden tunnelmasse som ble sprengt ut ble beregnet for hver salve (Tabell 2). Teoretisk tverrsnitt på tunnelen var 65 m². Vanlig lengde for hver salve var 4,8 m (S2 - S6). Ved normal drift får en ca 10 % i tillegg. For hver av salvene S2-S6 gir det tunnelmasse på ca 890 tonn (ved tetthet tunnelmasse 2,6 g/cm³). Den første salven (S1) var redusert til 3 m tunnellengde. Den totale tunnelmassen ble her beregnet til ca 560 tonn. Ved salvene 7 og 8 (S7 og S8) ble tverrsnittet økt på grunn av utsprengning av nisje. Det er her anslått et tillegg på henholdsvis 20 m³ og 75 m³. For disse ble total tunnelmasse beregnet til 940 tonn for S7 og 1090 tonn for S8.

Vekt av containere med og uten steinmasse ble registrert (Tabell 2).

Tabell 2. Vekt av containere og tunnelmasse anvendt i utvaskingsforsøke samt beregnet totalvekt av tunnelmassen for hver salve.

Forsøkskode	Kontainer serie	Kontainer,stein Vekt m.stein tonn	Kontainer,stein Nettovekt tonn	Tunnelmasse Nettovekt tonn	Tunnelmasse Total/salve tonn
S1	1	11,93	0,67	11,26	557
S2	2	11,90	0,64	11,26	892
S3	1	12,20	0,67	11,53	892
S4	3	11,55	0,80	10,75	892
S5	2	11,50	0,64	10,86	892
S6	1	11,50	0,67	10,83	892
S7	4	11,25	0,58	10,67	944
S8	3	11,72	0,60	11,12	1087

2.4 Sprengstoff

Ved sprengningen ble det anvendt emulsjonssprengstoff. Den kjemiske hovedbestanddelen er ammoniumnitrat (NH_4NO_3). Dette utgjør ca 70 % av sprengstoffet. 10 % er andre nitrater.

Forbruket av sprengstoff i salvene var i gjennomsnitt 555 kg, og med variasjoner mellom 310 og 668 kg (Tabell 3). Det minste forbruket skyldtes redusert salvelengde grunnet vanskelige fjellforhold. Det største forbruket skyldtes utvidet tverrsnitt på tunnelen.

2.5 Sprøytebetong

Sprøytebetong består i hovedsak av sand, sement, silika, fiber og aksellerator ("vannglass"/natrium-silikat) samt vann. Betongforbruket varierte fra 12 til 18 m^3 for hver sprøyting (Tabell 3). Det ble sprøytet etter siste salve om natten, slik at før første salve om morgen var det sprøytebetong inntil stoffen. Etter de påfølgende salver samme dag ble det ikke anvendt sprøytebetong. Det innebærer at avstanden bak til sprøytebetongen økte med 5 m for hver salve ved normal drift. Det er derfor sannsynlig at innholdet av sprøytebetong i tunnelmassen avtok for hver salve utover dagen.

Tabell 3. Forbruk av sprengstoff og sprøytebetong for hver salve i forsøksperioden.

Forsøkskode/-salve	Kontainer serie	Sprengstoff forbruk kg/salve	Betong forbruk $\text{m}^3/\text{sprøyting}$	Avstand betong m	Merknader
S1	1	309,7	12	0	redusert salvelengde ¹⁾
S2	2	546,9	12	0	
S3	1	592,0		5	
S4	3	523,8	16	0	
S5	2	654,9		5	konturhull 100 % ladet
S6	1	566,8		10	
S7	4	583,5	18	0	stort prelletap, start nisje
S8	3	667,8		5	utvidet tverrsnitt, nisje

¹⁾ Grunnet dårlig fjell

2.6 Prøvetaking og analyser

Etter at testvannet var overført til vannkontaineren, ble en prøve hentet ut ved hjelp av en vannprøvetaker (Rutner-henter) med 2 L prøvevolum. Vannprøven ble overført til to prøveflasker på ½ L hver. Den ene prøven ble konserveret med svovelsyre for å sikre innholdet av nitrogenforbindelser (NH_4 og NO_3). Den andre prøveflasken var for måling av pH og konduktivitet. For én av prøvene ble det utført en utvidet analyse som inkluderte andre komponenter som kunne forventes å bidra til høyt ioneinnhold (konduktivitet) i prøvene (i tillegg til $\text{NH}_4 + \text{NO}_3$). Utvalgte tilleggsparametere var kalsium (Ca), kalium (K), natrium (Na), magnesium (Mg), aluminium (Al), jern (Fe), klorid (Cl) og sulfat (SO_4). Prøvene ble analysert ved NIVAs laboratorium etter internasjonalt akkrediterte metoder.

3. Resultater

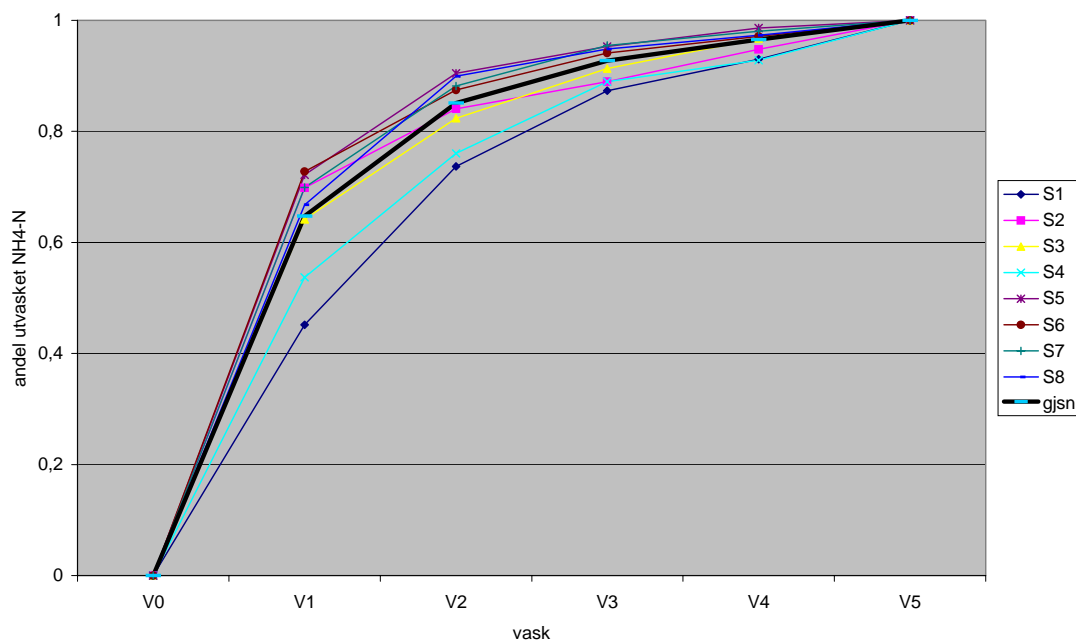
3.1 Utlekkingsforløp, konsentrasjoner

3.1.1 Nitrogen

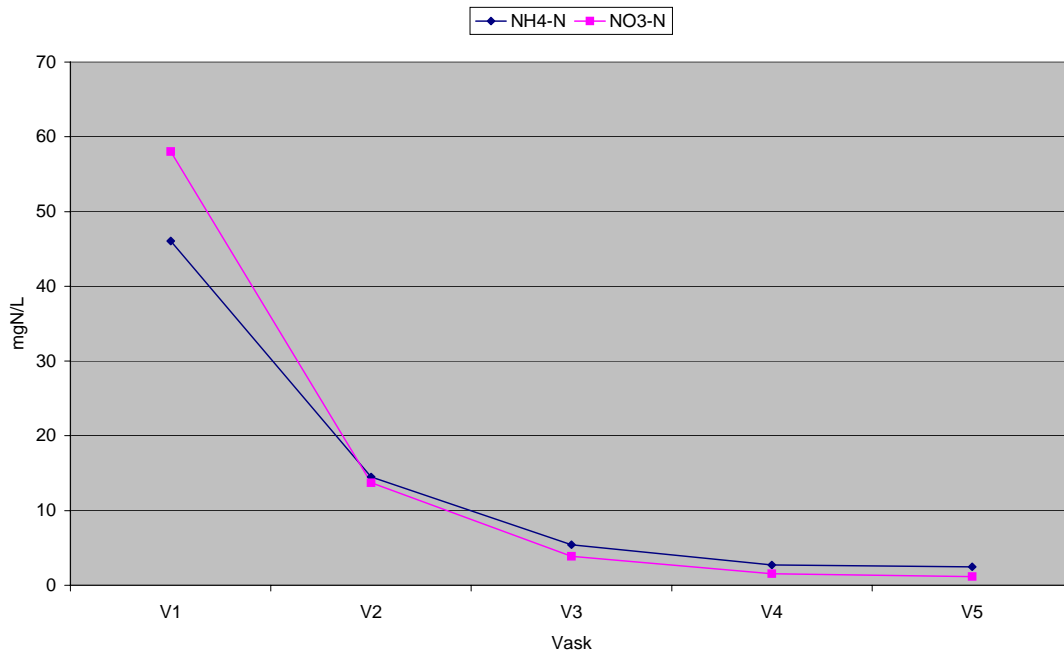
En stor andel av nitrogenet ble vasket ut ved 1. vask. For de 8 salvene ble gjennomsnittlig ca 65 % av ammoniumnitrogenet vasket ut ved første vask, men med variasjoner fra ca 50 % til 75 %. Etter to vasker var mer enn 80 % av nitrogenet vasket ut for de fleste salvene (Figur 7). Nitratene syntes å gå noe raskere ut enn ammonium, men forskjellene her var små (Figur 8).

I foreliggende forsøksoppsett var konsentrasjonen av ammonium og nitrat høy i testvannet fra 1. vask for alle salvene. Den høyeste konsentrasjonen ble registrert i salve S5 med en ammoniumkonsentrasjon på nærmere 100 mgN/L. Nitratkonsentrasjonen i samme testvann var omkring 110 mgN/L. For de andre salvene varierte konsentrasjonene av ammonium etter 1. vask fra ca 20 mgN/L for salve S4 til 60 mgN/L for salve S8, og for nitrat fra ca 28 mgN/L til 68 mgN/L for tilsvarende salver (Figur 9 og Figur 10). I gjennomsnitt for alle salvene var konsentrasjonene etter 1. vask for $\text{NH}_4\text{-N}$ og $\text{NO}_3\text{-N}$ henholdsvis 46 mgN/L og 58 mgN/L. Konsentrasjonene av ammonium i testvannet etter siste vask var redusert til mellom 1 og 3 mgN/L. For nitrater lå konsentrasjonene litt lavere med variasjoner mellom ca 0,5 og 2 mgN/L.

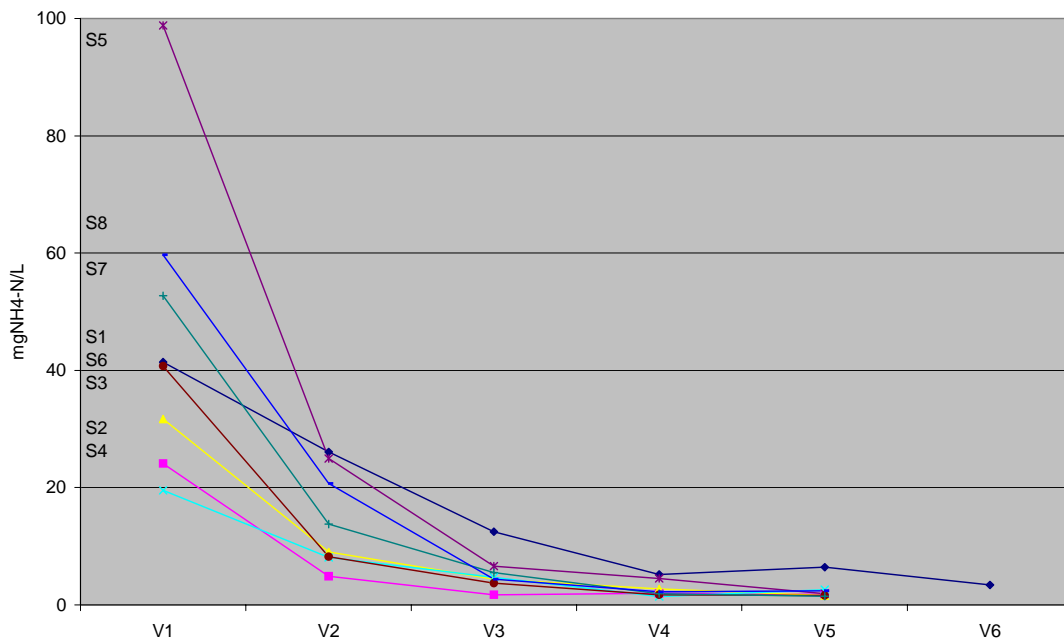
Andelen ammoniakk av totalt ammonium varierer som før nevnt med pH og temperatur. I alle prøvene fra testvann var det klart forhøyede pH-verdier. Ved pH-verdier over 10 og 8 °C i vannet, vil mer enn 60 % av totalt ammonium være i form av ammoniakk, ved pH-verdier over 11 vil mer enn 95 % finnes som ammoniakk. Konsentrasjonen av $\text{NH}_3\text{-N}$ ble derfor meget høy i prøvene med høyest pH-verdi og høyt ammoniuminnhold. Det var spesielt i testvann fra salve S1, S2 og S7 at ammoniakkinholdet var svært høyt, men også de andre prøvene hadde relativt høyt innhold (Figur 11).



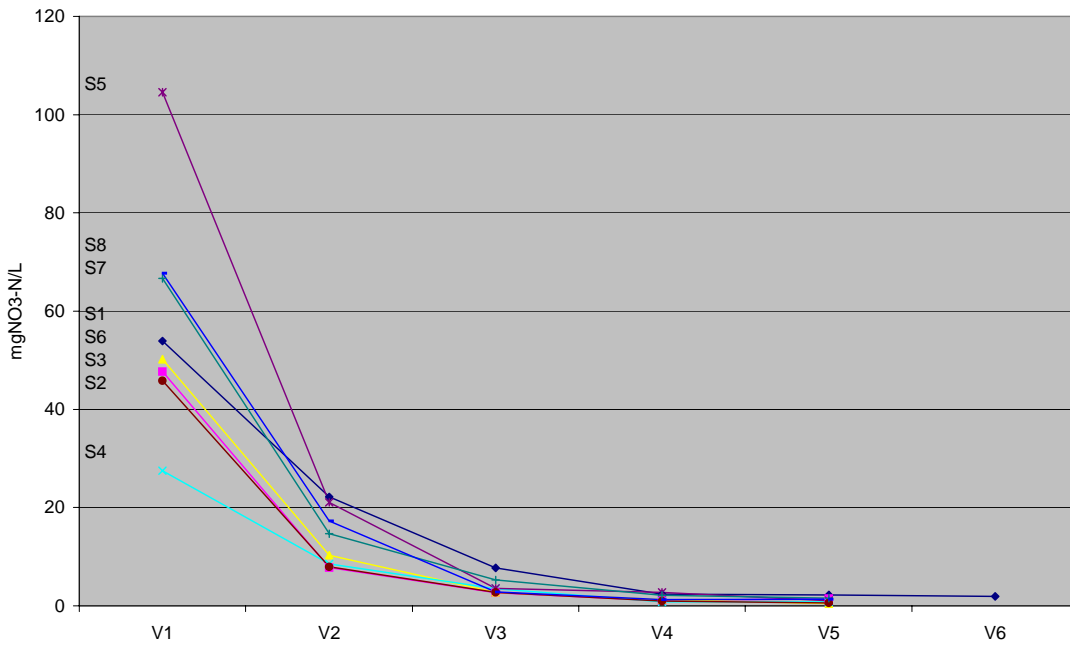
Figur 7. Andelen utvasket ammoniumnitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) etter hver utvasking (V1-V5). Gjennomsnittet er angitt som tykk linje. V0 er situasjonen før utvasking.



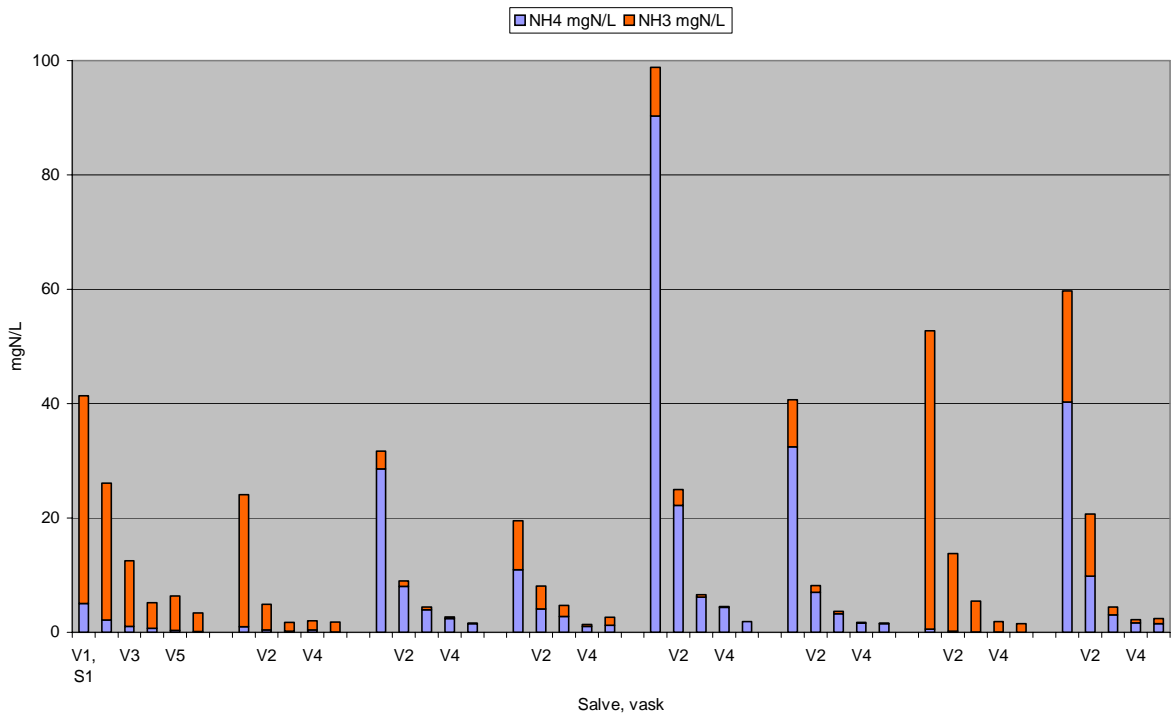
Figur 8. Gjennomsnittskonsentrasjonen av total NH₄-N og NO₃-N i testvannet etter hver vask (V1-V5) for alle salvene (S1-S8).



Figur 9. Utlekkingsforløpet av NH₄-N for ulike salver (S1-S8) og utvaskinger (V1-V6) angitt som konsentrasjonen i utvaskingsvannet.



Figur 10. Utlekkingsforløpet av NO₃-N for ulike salver (S1-S8) og utvaskinger (V1-V6) angitt som konsentrasjonen i utvaskingsvannet.

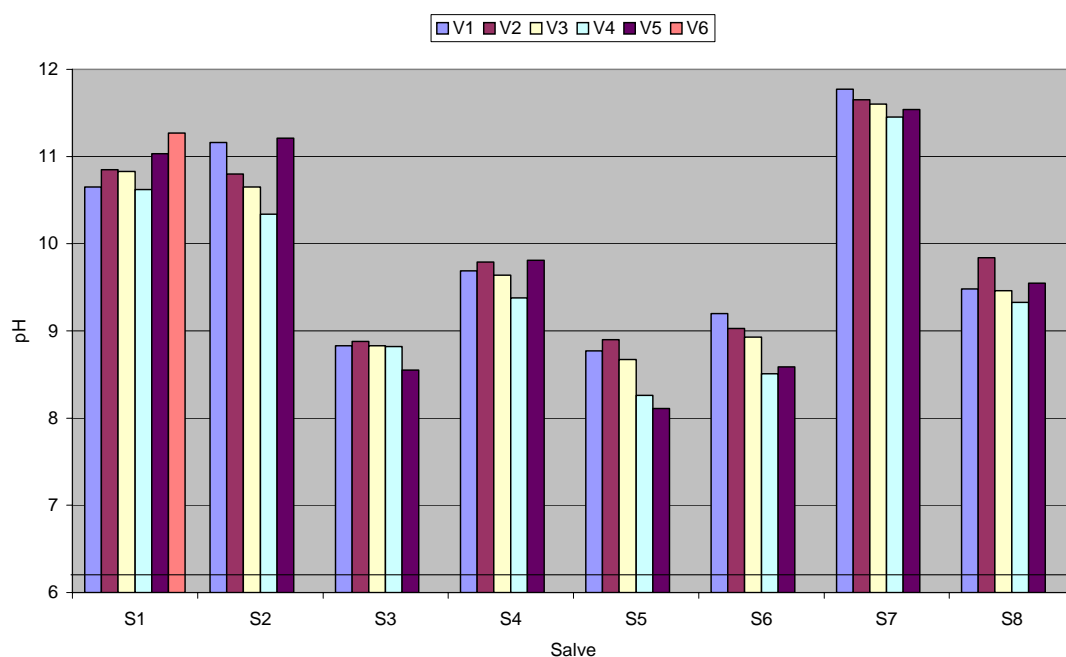


Figur 11. Fordelingen av ammoniumioner (NH₄⁺) og ammoniakk (NH₃) etter hver utvasking fra hver salve. Det er forutsatt en temperatur på 8°C i prøvene.

3.1.2 pH-verdier

Det ble registrert tildels meget høye pH-verdier i testvannet. Verdiene varierte endel mellom salvene. De høyeste verdiene ble registrert for salve S7, der pH lå mellom ca 11,5 og 11,8 for de ulike utvaskingene. De laveste verdiene ble funnet i vann fra salve 5 med verdier mellom ca 8,1 og 8,9. Selv om det var en tendens til avtagende pH-verdier når utvaskingene foregikk umiddelbart etter hverandre, så økte pH igjen når oppholdstiden av tunnelmassen i vannet økte (Figur 12).

De høyeste pH-verdiene ble funnet i de første salvene etter bruk av sprøytebetong (S1, S2, S4, S7). Av disse hadde salve S4 vesentlig lavere pH enn de andre. Dette kan være tilfeldig, men kan også skyldes mindre søl av betong. I forbindelse med salve S7 ble det rapportert stort prelltap (mye søl). Det forklarer trolig den meget høye pH-verdien i testvannet fra denne salven. Sprøytebetongen inneholder sterkt alkaliske stoffer (sement, natriumsilikat). De høye pH-verdiene viser at de fremdeles forefinnes i vannløselig tilstand ved utvaskingen. Stoffene vaskes langt seinere ut av tunnelmassen enn sprengstoffrestene.

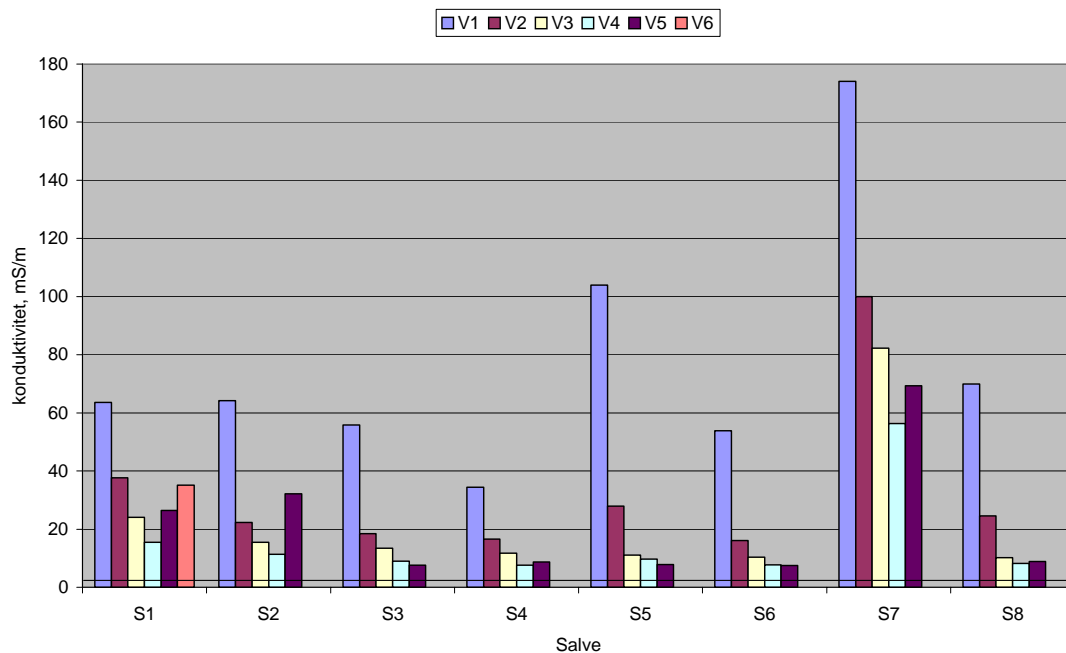


Figur 12. pH-verdier i testvannet for hver utvasking (V1-V6) på alle salvene (S1-S8). pH i referansevannet er angitt som horisontal linje nederst på figuren.

3.1.3 Konduktivitet

Konduktiviteten er et mål for innholdet av ioner. Den var generelt forholdsvis høy og viste en stor grad av samvariasjon med de antatt vanligste ionene; NH_4^+ og NO_3^- . Dette var imidlertid ikke alltid tilfelle. Særlig der pH-verdien var meget høy ($\text{pH} > 10$) (S1, S2, S7) var det trolig et vesentlig bidrag også fra OH^- . Dette kunne blant annet observeres ved at selv om innholdet av ammonium og nitrater hadde gått kraftig ned, så økte konduktiviteten når pH-verdien hadde økt (mer OH^-) (Figur 13).

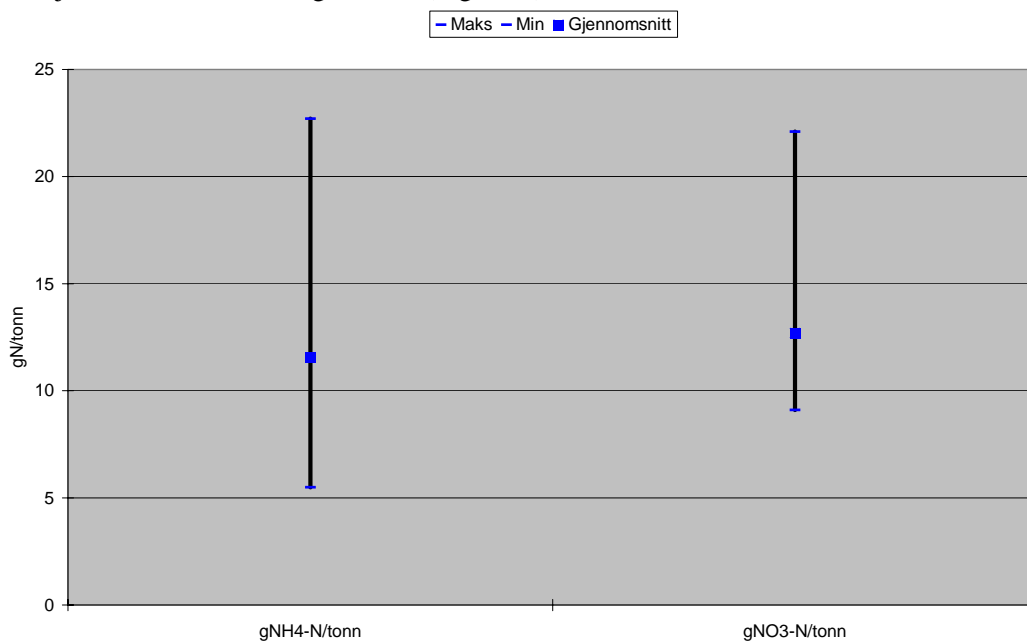
For å få kunnskap om hvilke andre ioner/elementer som kunne finnes i høye konsentrasjoner ble det tatt ut en vannprøve fra vask V1 i salve S7. Det ble her påvist høye verdier av flere elementer. Blant disse var kalsium (Ca), kalium (K), aluminium (Al), natrium (Na) og sulfat (SO_4) (Vedlegg 2).



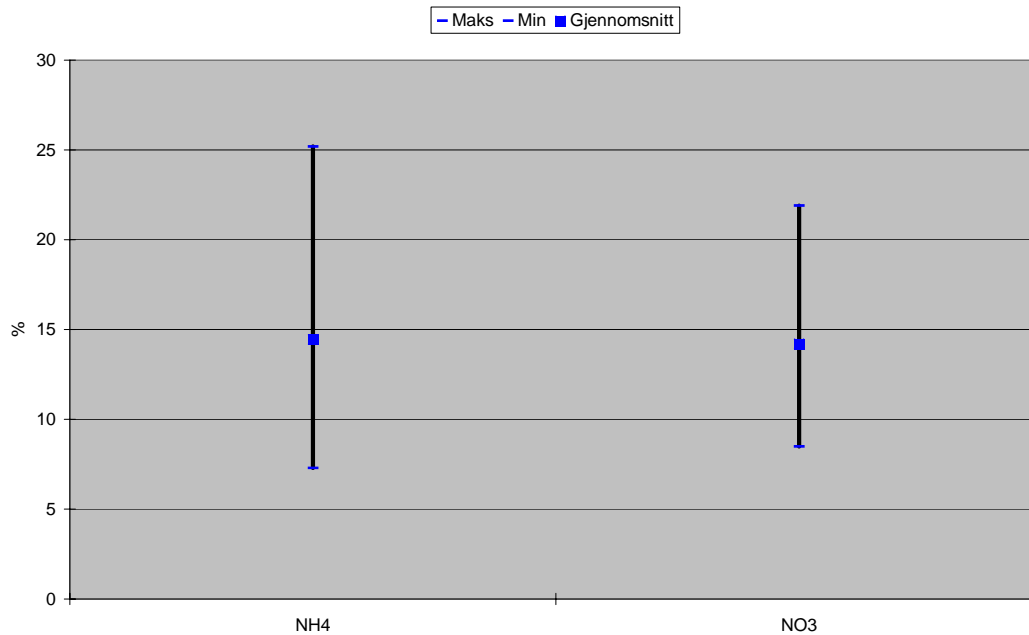
Figur 13. Konduktivitet (mS/m) i testvannet for hver utvasking (V1-V6) på alle salvene (S1-S8). Konduktiviteten i referansevannet er angitt som horisontal linje nederst på figuren.

3.2 Mengder

Den totale avrenningen av ammonium fra hver salve varierte fra 5,5 gN/tonn tunnelmasse til 22,7 gN/tonn. I gjennomsnitt for alle salvene var avrenningen 11,5 gN/tonn. Avrenningen av nitrater varierte fra 6,9 gN/tonn tunnelmasse til 22,1 gN/tonn. Gjennomsnittet var her 12,7 gN/tonn (Figur 14). Gjennomsnittlig var den totale nitrogenavrenningen fra massene derfor 24,2 gN/tonn. Avrenningen av total nitrogen tilsvarte i gjennomsnitt 14,7 % av nitrogeninnholdet i benyttet sprengstoff, men med variasjoner mellom 8,5 % og 23,5 % (Figur 15).



Figur 14. Avrenning av ammoniumnitrogen (NH₄-N) og nitratnitrogen (NO₃-N) fra hvert tonn utkjørt tunnelmasse. Figuren angir gjennomsnittsverdier samt maksimum og minimumverdier.



Figur 15. Prosentvis andel av anvendt sprengstoff som finnes igjen som ammonium (NH₄) og nitrater (NO₃) i avrenningen fra tunnelmasse. Figuren angir gjennomsnittsverdier samt maksimum og minimumverdier.

4. Diskusjon

Resultatene for nitrogenavrenning i foreliggende undersøkelse samsvarte godt med resultater fra tilsvarende undersøkelser i utlandet. En undersøkelse fra Sverige utført på én salve viste en utlekking av nitrogen på 72 gN/tonn (ANFO - sprengstoff) (Sjölund 1997). Dette tilsvarte 18 % av benyttet sprengstoff, og var derved i samme størrelsesorden som resultatene fra Elgskauåsen (8,5-23,5 %). Sjölund refererer andre undersøkelser som viser tilsvarende tall (Forsyth et al 1995, Revey 1996). For å estimere den totale avrenningen av sprengstoffrester fra tunnelanlegg må en i tillegg ta hensyn til avrenning via tunnelvannet.

Testen viste at sprengstoffrester i form av ammoniumnitrat løste seg lett i vann og ble vasket raskt ut av tunnelmassen ved de rådende forsøksbetingelsene. Hvor raskt nitrogenet kommer ut i vannmassene under naturlige forhold vil være avhengig av hvor mye tunnelmassene "vaskes" i det de dumpes i resipienten, hvor kompakt deponiet blir og om det er vanngjennomstrømning i massene. Dersom massene dumpes i mye vann, og det er stor gjennomstrømning i deponiet, vil utvaskingen skje raskt. Er deponiet kompakt, vil utvaskingen ta lengre tid. Etter at nitrogenforbindelsene er kommet ut i de frie vannmassene i resipienten vil de fortynnes. I elver tilføres stadig nytt vann som tynner ut nitrogenavrenningen. I mer rolige vannforekomster vil vannet i mindre grad skiftes ut. Konsentrasjoner og konsekvenser i resipientene er derfor avhengig av størrelse og type resipient.

Det er meget få undersøkelser der en kjenner avrenningspotensialet for nitrogen i tunnelmassen og samtidig har resultatene for virkningen i resipienten etter dumping. I Drammenselva ved Mjøndalen ble lagret tunnelmasse brukt som fylling våren 1998. For tunnelmasse tilsvarende den som ble brukt i denne fyllingen ble det i en laboratorietest funnet en gjennomsnittlig nitrogenmengde på ca 8,8 gN/tonn og en pH-verdi på 8,0 (Bækken 1998a). Målinger i elva under en periode med utfylling viste noe forhøyede verdier av pH og ammonium nær fyllingen. Konsentrasjonene var imidlertid forholdsvis lave og tilskuddet av ammonium fra fyllingen hadde liten betydning for vannkvaliteten i Drammenselva. Ammoniakk-konsentrasjonene var lave og under faregrensen for fisk (Bækken 1998b).

Drammenselva er en relativt stor elv med en gjennomsnittlig vannføring omkring 300 m³/s. En må regne med større virkninger i små resipienter.

Følgende regneeksempel kan gi en indikasjon på hvor mye vann som trengs for å tynne ut nitrogenmengden fra et lastebillass med tunnelmasse til en ønsket nitrogenkonsentrasjon i resipienten: Omgjort til løsvolum blir gjennomsnittlig avrenningen fra et lastebillass på 10 m³ ca 186 g NH₄-N og 206 g NO₃-N. Samlet blir det nærmere 400 g nitrogen per lass. For norske vannkvalitetskriterier ligger grensen mellom meget god og god vannkvalitet på 300 µg/L total nitrogen (TotN, klasse I/II) (SFT 1997). Ved å godta økt tilførsel av totalnitrogen, for en periode med dumping, til tilstandsklasse IV ("dårlig tilstand"), kan konsentrasjonen økes til 600-1200 µgN/L. Dersom vi antar at hele lasset dumpes i vann og at alt nitrogenet løses umiddelbart, vil det kreve en vannmengde på 500-1000 m³ per lass for å holde denne konsentrasjonen (bakgrunn + nye tilførsler).

pH-verdiene holdt seg forholdsvis stabile over testperioden på én uke. Det viser at utlekkingsforløpet for stoffene som gav alkalisk reaksjon (høy pH) var seinere enn for ammoniumnitrat. Trolig vil pH-verdiene bli lavere etter hvert som betongen herdes ferdig.

Det ble i denne testen lagt mye vekt på forhold som medfører ammoniakkholdig avrenning fordi ammoniakk er giftig, særlig for laksefisk. Tilstanden blir da mer kompleks fordi andelen av ammoniakk av den totale ammoniumkonsentrasjonen avhenger av temperatur og pH, og alle disse parameterene avhenger av fortynningsgraden og vannkvaliteten (særlig pH) til resipienten. Den dårligste tilstanden oppstår ved høy ammoniumkonsentrasjon sammen med høy pH-verdi og høy temperatur.

Det bør i større grad iverksettes tiltak som reduserer avrenningen av nitrogen generelt, men særlig avrenningen av ammonium og ammoniakk både fra tunnelmasser og tunnelvann. Enkelte metoder som kan bidra til dette er nevnt nedenfor. Det må imidlertid understrekes at tiltaksmetoder og virkninger av tiltak på nitrogenavrenning fra tunneler ennå er lite/ikke utprøvd.

Mulige tiltak:

1. Søl av sprengstoff under håndtering og lading kan reduseres ved å bedre arbeidsrutiner. Sprengstoffrester som skyldes udetonerte ladninger er det trolig vanskeligere å gjøre tiltak mot.
2. Spyling av røysa med vann før den kjøres ut. Med god spyling vil trolig en stor del av sprengstoffrestene vaskes vekk fra røysa. Det vil medføre økt nitrogenavrenning via tunnelvannet. Tunnelvannet har en imidlertid stor sett kontroll over. Det samles oftest til rensing av partikler i sedimentasjonbassenger og i andre mekaniske renseprosesser. Dette gir mulighet til også å gå inn med tiltak for å redusere nitrogeninnholdet, og særlig nitrogen i form av ammoniakk. Innholdet av ammoniakk avhenger av pH-verdien. Dersom det er en høy andel ammoniakk, kan det tenkes at en kraftig innblåsing av luft i tunnelvannet kan fjerne mye av denne. Det vil i tillegg redusere den totale nitrogenavrenningen. Noe reduksjon kan trolig oppnås ved å anvende betong med alkaliefri aksellerator. Det reduserer mengden av alkaliske forbindelser, men kanskje viktigere, det gir raskere herding og mindre prelletap, og derved lavere pH-verdi.
3. Nøytralisering av tunnelvannet med syre og/eller vasking av røysa i svak syre kan redusere innholdet av ammoniakk. Tiltaket omformer ammoniakk til ammoniumioner. Det totale nitrogeninnholdet forblir imidlertid like høyt, og en innfører nye problemstillinger ved syrehåndtering og utslipp.
4. Ved lagring av tunnelmasse kan nitrogeninnholdet reduseres ved at nitrater og ammonium renner av ved nedbør samt ved avdampning av eventuell ammoniakk. Fordi denne typen naturlig avrenning er av-

hengig av været, og hvor store og kompakte deponiene er, er det vanskelig å forutsi om en kan få akseptable konsentrasjoner. Avrenningen fra disse deponiene kan skape problemer i andre resipienter.

5. Konklusjon

- Testen ble utført med uspylte tunnelmasser.
- Gjennomsnittlig 14,7 % av nitrogenet fra anvendt sprengstoff ble funnet igjen i utkjørte tunnelmasser.
- Nitrogenet, i form av ammonium og nitrat, ble forholdsvis lett vasket ut.
- Bruk av sprøytebetong medførte tidvis meget høye pH-verdier i vannprøvene. Det medførte at andelen ammoniakk ble meget høy i de samme prøvene.
- Konsekvenser for vannkvalitet og biologi ved deponering av tunnelmasse vil avhenge av:
 - mengde av sprengstoffrester
 - pH-verdi og temperatur
 - resipienttype og størrelse
 - deponeringsmetode
- Spyling av tunnelmasse før utkjøring vil redusere avrenningen fra deponert masse, men øke avrenningen via tunnelvannet.
- Tiltak for å ta hånd om nitrogenavrenningen fra tunneler, særlig med tanke på ammoniakk, bør videreutvikles.

6. Referanser

- Alabaster, J.S. & Lloyd, R. 1982: Water quality criteria for freshwater fish. Butterworths, London.
- Bækken, T & Lien, L. 1997: Drammenselva. Miljøvurderinger i forbindelse med utfylling av strandsone ved Mjøndalen - NIVA Rapport 3687-97.
- Bækken, T. 1998a: Utlekking av nitrogen fra lagret tunnelmasse i Kobbervikdalen.- NIVA-Rapport 3786-98.
- Bækken, T. 1998b: Drammenselva. Overvåkning av vannkvaliteten ved Mjøndalen i forbindelse med utfylling av tunnelmasser- NIVA-Rapport 3900-98.
- Forsyth, B., Cameron, A. & Miller, S. 1995: Explosives and water quality. Sudbury '95. - Mining and the environment. Sudbury Canada 1995.
- Knoph, M.B. 1995: Toxicity of Ammonia to Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) - Dr.scient oppgave. Univ. Bergen.
- Revey, G.F. 1996: Practical methods to control explosives losses and reduce ammonia and nitrate levels in mine water. - Mining engineering v48 n7 1996:61-64.
- Sjölund, G. 1997: Kväveläckage från sprengstensmassor. – Examensarbete, Luleå tekniska universitet, 1997:332 CIV.
- U.S. EPA 1985: Ambient water quality criteria for ammonia. -1984. EPA 440/5-85-001, Office of Water Regulation and Standards Criteria and Standards Division, United States Environmental Protection Agency, Washington DC.

7. Vedlegg

Vedlegg 1. Konsentrasjoner av NH₄-N, NO₃-N, pH og konduktivitet i hvert utvaskingsvann (V1-V6) for alle salver (S1-S8). Prosent andel ammoniakk (NH₃) av totalt ammonium er angitt for 8° C ved angjeldende pH-verdi.

Serie	Vask	Dato	Tidspk.	Merk	NH ₄ mgN/L	NH ₃ %	NO ₃ mgN/L	pH	Kond mS/m
Ref.		20.04.98			0,01	0,02	0,08	6,15	3,19
S1	V1	20.04.98	18:00	Sprøytebetong, 12t	41,4	87,72	53,9	10,65	63,6
	V2	20.04.98	20:30		26,1	91,89	22,2	10,85	37,7
	V3	20.04.98	22:30		12,5	91,54	7,73	10,83	24,1
	V4	21.04.98	00:45		5,2	86,96	2,35	10,62	15,5
	V5	21.04.98	12:40		6,4	94,49	2,21	11,03	26,4
	V6	27.04.98	11:00		Stått en uke i vann	3,4	96,75	1,93	11,27
S2	V1	27.04.98	18:00	Sprøytebetong, 12t	24,1	95,85	47,7	11,16	64,2
	V2	27.04.98	19:30		4,9	90,99	7,79	10,8	22,3
	V3	27.04.98	21:15		1,7	87,72	2,64	10,65	15,5
	V4	27.04.98	22:45		2	77,78	1,03	10,34	11,3
	V5	28.04.98	09:00		Stått i vann over natten	1,8	96,29	1,45	11,21
S3	V1	27.04.98	23:30	Stått tørr over natten	31,7	9,76	50,2	8,83	55,8
	V2	28.04.98	09:00		9	10,82	10,3	8,88	18,4
	V3	28.04.98	12:00		4,4	9,76	2,74	8,83	13,5
	V4	28.04.98	13:30		2,7	9,56	1,27	8,82	8,98
	V5	28.04.98	15:15		1,6	5,37	0,41	8,55	7,64
S4	V1	28.04.98	12:45	Sprøytebetong, 16t	19,5	43,93	27,5	9,69	34,4
	V2	28.04.98	16:15		8,1	49,66	8,51	9,79	16,6
	V3	28.04.98	19:00		4,7	41,12	3,48	9,64	11,7
	V4	28.04.98	21:30		1,4	27,73	0,815	9,38	7,61
	V5	28.04.98	08:30		Stått i vann over natten	2,6	50,81	0,84	9,81
S5	V1	28.04.98	19:00	Stått tørr over natten	98,8	8,61	104,6	8,77	104
	V2	28.04.98	22:00		25	11,27	21,10	8,9	27,9
	V3	29.04.98	00:20		6,6	6,96	3,54	8,67	11,1
	V4	29.04.98	10:00		4,5	2,83	2,76	8,26	9,72
	V5	29.04.98	12:45		1,9	2,02	1,05	8,11	7,88
S6	V1	28.04.98	00:00	Stått tørr over natten	40,7	20,23	45,8	9,2	53,9
	V2	29.04.98	09:00		8,2	14,63	7,94	9,03	16,1
	V3	29.04.98	11:45		3,7	11,98	2,73	8,93	10,3
	V4	29.04.98	14:15		1,7	4,92	0,99	8,51	7,77
	V5	29.04.98	17:30		1,6	5,86	0,63	8,59	7,52
S7	V1	29.04.98	13:15	Sprøytebetong, 18t	52,7	98,95	66,7	11,77	174
	V2	29.04.98	15:30		13,8	98,62	14,7	11,65	100
	V3	29.04.98	17:30		5,5	98,45	5,3	11,6	82,3
	V4	29.04.98	19:30		1,9	97,83	2,12	11,45	56,4
	V5	29.04.98	21:00		1,5	98,23	1,59	11,54	69,3
S8	V1	29.04.98	22:00	Stått i vann	59,7	32,57	67,7	9,48	69,9
	V2	30.04.98	00:15		20,7	52,53	17,3	9,84	24,5
	V3	30.04.98	02:00		4,4	31,57	2,8	9,46	10,2
	V4	30.04.98	03:45		2,2	25,49	1,26	9,33	8,18
	V5	30.04.98	09:00		2,4	36,21	1,31	9,55	8,86

Vedlegg 2. Tilleggsparametere analysert for testvann fra Salve 7 vask 1.

		TOC	Al	Ca	K	Mg	Na	Cl	SO4	Fe
		mgC/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
S7 Vask 1	980429	5,8	1,75	195	20,6	0,96	65,1	6,0	51,0	3,79

Vedlegg 3. Sprengstoff-forbruk per tonn fjell angitt som sprengstoff og som NH₄-N og NO₃-N, total avrenning av NH₄- N og NO₃- N per tonn utkjørt tunnelmasse samt andelen sprengstoff målt som NH₄- N, NO₃- N og total N gjennfunnet i testvannet.

Salve	Sprengstoff forbruk	NH ₄ -N i spreng- stoffet	NO ₃ -N i spreng- stoffet	Avrenning NH ₄ -N tunnel- masse	Avrenning NO ₃ -N tunnel- masse	NH ₄ -N fra spreng- stoff	NO ₃ -N fra spreng- stoff	N fra spreng- stoff
	kg/tonn	gN/tonn	gN/tonn	gN/tonn	gN/tonn	%	%	%
S1	0,555	68,0	76,3	13,5	12,8	19,8	16,8	18,3
S2	0,613	75,1	84,2	5,5	9,7	7,3	11,5	9,5
S3	0,663	81,3	91,1	7,7	10,1	9,5	11,1	10,4
S4	0,587	71,9	80,6	6,1	6,9	8,5	8,5	8,5
S5	0,734	89,9	100,8	22,7	22,1	25,2	21,9	23,5
S6	0,635	77,8	87,2	9,3	9,7	11,9	11,1	11,5
S7	0,618	75,7	84,9	12,7	15,3	16,8	18,0	17,4
S8	0,614	75,2	84,3	14,5	14,6	19,2	17,3	18,2