

RAPPORT

Lakning av kväve i bergmassor från tunnlar

MÅCKA TINGSRÄTT
Ändelning 3

INKOM: 2022-06-27
MÅLNR: M 7062-14
AKTBIL: 283



Trafikverket

Postadress: Adress, Post nr Ort

E-post: trafikverket@trafikverket.se

Telefon: 0771-921 921

Dokumenttitel: Lakning av kväve i bergmassor från tunnlar

Författare: Mats Olsson, Urban Åkeson och Bengt Niklasson

Dokumentdatum: 2019-10-08

Version: 1.0

Kontaktperson: Urban Åkeson

Publikationsnummer: 2019:174

ISBN 978-91-7725-524-6

Sammanfattning

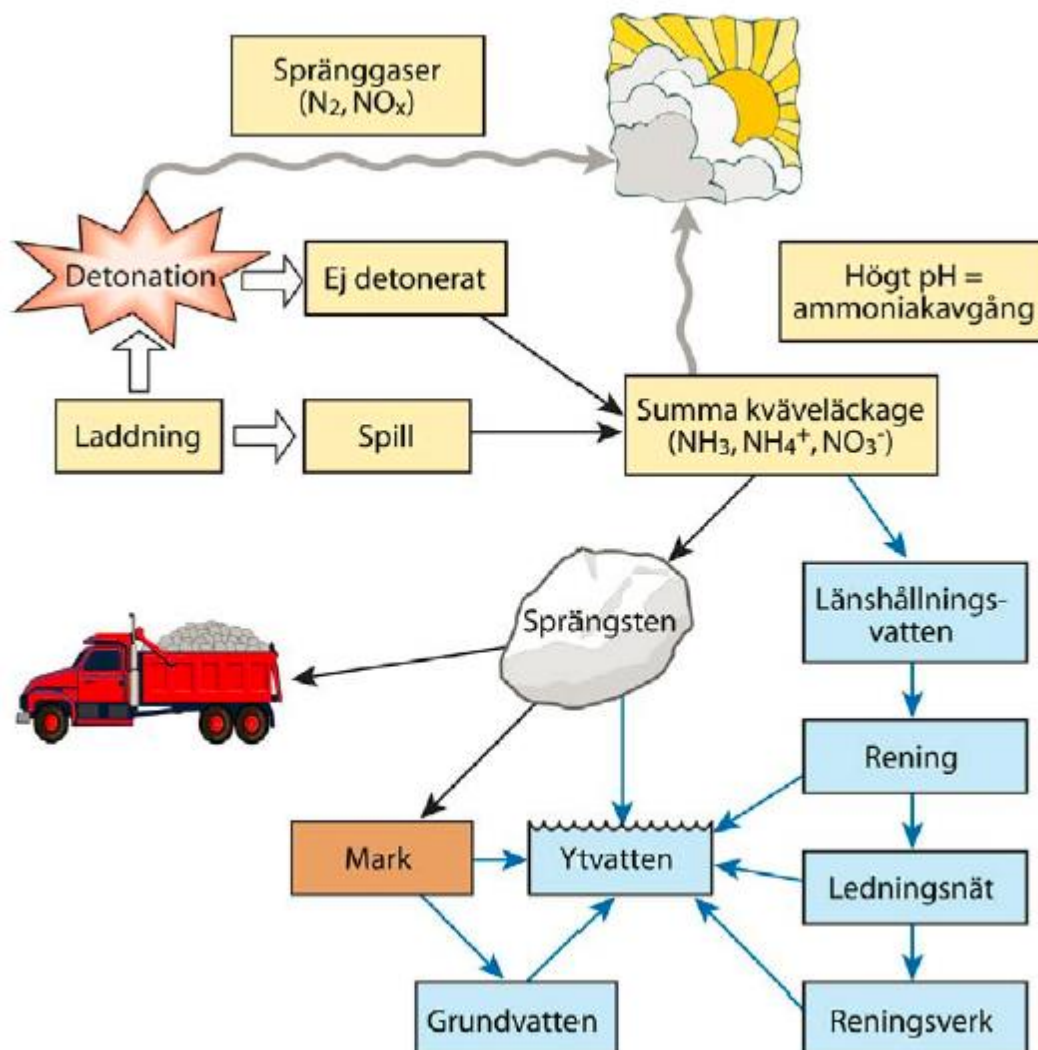
Denna rapport ingår i forskningsprojektet "Tunneldrivning med grövre borrhål för en bättre kontur och minskade kvävehalter". En del i det projektet var att förändra sprängtekniken så att andelen odetonerat sprängmedel minskar. I denna rapport redovisas lakningsförsök av tunnelberg från förbifart Stockholm. Försöken genomfördes vid Jehanders täkt Löten som är en av mottagarna av tunnelberg. Lakningen gjordes på 0/150 mm sortering och vid varje försök lakades 30 ton berg placerade i tre 10 m³ containrar. Totalt gjordes fyra försök. Resultaten visar en stor spridning vilket beror på att det mesta av kvävet sitter i finandelen. Försöken visade att 1,8-23 % av kvävet från sprängmedlet fanns i sprängstensmassorna och provet med det högsta värdet hade extremt mycket finmaterial i sig. För att räkna ut den totala mängden kväve inklusive det som följer med länshållningsvattnet, användes data från ett flertal tunnelprojekt som inte recirkulerat länshållningsvattnet. Utifrån dessa data så ligger andelen sprängmedel som inte detonerar på ca 3-26 %. Det finns många sätt att minska kvävehalterna och framförallt handlar det om att hantera sprängmedlet så man inte spiller så mycket vid laddning och att ladda på rätt sätt. Att spränga konturhålen med patronerat sprängmedel istället för strängemulsion skulle också minska andelen kväve och dessutom ge finare tunnelkontur.

Innehåll

1. BAKGRUND OCH SYFTE	5
2. GENOMFÖRANDE	8
2.1 De undersökta bergmassorna	8
2.2 Geologin på Lovö	9
2.3 Tunnelldrivning.....	9
2.4 Metodbeskrivning.....	9
3. RESULTAT	14
4. DISKUSSION	19
5. SLUTSATSER	21
6. REFERENSER.....	22
7. BILAGOR.....	23
Bilaga 1. Uppföljningsprotokoll	24
Bilaga 2. Kvävekurvor	25
Bilaga 3. Total kväve per ton berg	29

1. Bakgrund och Syfte

Hantering av kväve i länshållningsvattnet i samband med sprängning är ett känt problem som måste hanteras i varje tunnelprojekt. Vid sprängning i tunnel används nästan uteslutande pumpbart emulsionsprängämne, medans vid infrastrukturprojekt ovanjord är patronerat sprängmedel (dynamit) mest förekommande. Emulsionsprängämnen består av små droppar av ammoniumnitratlösning som är omgivna av en blandning av olja och vax och har en kvävehalt på ca 25 %. Emulsionsprängämnen har en handkrämsliknande konsistens vilket betyder att de har mycket goda packningsegenskaper. Emulsioner är vidare mycket säkra sprängämnen och vattenresistenta. Om allt går perfekt vid en tunnelsprängning så bör allt sprängämne detonera och allt kväve blir kvävgas (Figur 1), tyvärr är så inte fallet och halten odetonerat sprängmedel kan ibland ligga uppemot 20 %.



Figur 1. Principskiss möjliga läckagevägar för kväve (från Tilly mfl. 2006).

Varför detonerar då inte allt sprängmedel?

Vid tunneldrivning borrar man horisontella hål som sedan laddas. Längst in placeras en sprängkapsel som tänds upp med en mindre mängd starkare sprängämne varefter hålet fylls med emulsionssprängämne. Med den förenklade laddningstekniken som pumpemulsion medför överladdas ofta hålen, exempelvis laddas öppningshålen för mycket och betydligt mer än de framarbetade tumregler som Langefors och Kihlström tog fram (Langefors & Kihlström, 1978). Den yttersta hålraden (konturhålen) i en tunnelsalva laddas med s.k strängemulsion, dvs en tunnare sträng med emulsion används där. Tyvärr så medför en tunnare laddsträng en ökad risk för att laddsträngen kan gå av. Om det skulle bli avbrott på emulsionssträngen kan detonationen i hålet avbrytas. Resultatet blir att delar av berget står kvar och man ser borrhålen genom berget, detta kallas ofta för glasögon (Figur 2). Glasögon uppstår främst i anfang och tak och ofta i början av en salva och där är det inte ovanligt att det står kvar 50-60 cm odetonerat sprängämne. Laddare uppskattar att omskjutningar måste göras i 70 % av samtliga salvor (Olsson & Niklasson, 2012). Omskjutningar reducerar framdriften och innebär höjda kostnader.



Figur 2. Odetonerad emulsion i ett så kallat glasöga (laddningskoncentration 1,2 kg/m).

En annan orsak är att man inte avladdar hålen. Det innebär att man fyller hålen hela vägen ut fast det räcker med att man slutar ladda ca 0,5 m innan borrhålets slut. Detta sprängmedel är helt onödigt och kan leda till mer kväve om hålet inte detonerar.

En sista orsak är sprängmedelsspill och slarv (Figur 3). Överblivet sprängmedel ska alltid omhändertas och köras iväg för destruktion, tyvärr förekommer det att man tömmer överblivet emulsion framme vid stuff (tunnelfronten) innan man spränger av salvan.



Figur 3. Emulsionspill i samband med laddning.

I alla tunnelprojekt som har en miljödöm så utförs kontroller på länshållningsvattnet. Beroende på hur domen ser ut så hanterar man vattnet på olika sätt. I Norra Länken exempelvis så släpptes vattnet direkt till spillvattenledningarna efter sedimentation, detta sker även på vissa etapper på Förbifart Stockholm. I Västlänken och Hamnbanan i Göteborg måste vattnet recirkulera flera gånger för att få upp kvävehalten, på grund av att spillvattennätet i Göteborg inte klarar stora vattenmängder. När det inte finns spillvattenledningar att släppa länshållningsvattnet till får det renas efter bästa förmåga och släppas till recipient eller alternativt köras med tankbil till reningsverk. På grund av dessa olika sätt att hantera länshållningsvattnet visar alla data väldigt stor spridning av kvävehalten från olika projekt, se Tabell 1. Om man ska beräkna verklig mängd kväve som går ut i länshållningsvattnet i samband med ansökan om vattenverksamhet bör man fokusera på att använda data från projekt där man släppt det orenat till spillvattennätet utan recirkulation. I pågående och avslutade tunnelprojekt i Stockholm har kvävehalten som gått direkt till spillvattenledningar legat på ca 60-150 mg/l i medeltal.

Tabell 1. Sammanställning av uppmätta kvävehalter från länshållningsvatten

Objekt	Sprängämne	Totalkväve (mg/l)	Totalkväve (g/ton berg)
Bottniabanan	Emulsion	50-300	
LKAB	”	36	
Garpenberg	”	6	
Södra Länken	”		16,4
Sunbyberg	AnFo	400	72
Norra Länken	Emulsion	60	

Om man tittar på den totala mängden kväve som bildas från tunneldrivning finns dock det mesta kvar som odetonerat sprängmedel i bergmassorna. Kalkyler har visat att det kan vara så mycket som 75 % av totala kvävet från odetonerat sprängmedel som sitter på bergmassorna. Ett examensarbete hos LKAB i Kiruna (Forsberg & Åkerlund, 1999) visade att 15-19 % av de laddade sprängämnesmängderna följde med råmalmen upp till dagen. Detta innebar att denna laddningsmängd inte hade detonerat.

Det har gjorts väldigt få lakförsök på bergmassor och det har då varit på de finare fraktionerna i labbmiljö.

Sjölund, 1997 gjorde fullskaleförsök med 10 ton bergmaterial i varje provning. Dessa material var från tunneldrivning i Sundbyberg samt sprängsten från bergtäkt. Bergmaterialproven hälldes i containrar och lakades sedan med olika vattenmängder. Prov togs därefter från lakvattnet och analyserades på kväveinnehåll. Resultatet visade mycket höga kvävehalter från tunnelberget som efter 2000 l vatten hade en kvävehalt på ca 400 mg/l (sprängämnet vid tunneldrivningen var AnFo). Sjölund visade vidare att då lakttesterna avbröts var utlakningen för tunnelberget 72 g kväve per ton material. För ovanjordsberget var motsvarande siffra 1,2 g/ton. Resultatet visar att tunnelsprängning ger betydligt högre kvävehalter än ovanjordssprängt berg. Vidare visar Sjölunds rapport att för tunnelberget hade 18 % av den specifika laddningen kväve urlakats då testet avbröts. För det ovanjordssprängda berget var motsvarande siffra 1 %.

Syftet med detta projekt var att skaffa mer data över hur stora mängder kväve som kan återfinnas i bergmassorna samt att försöka göra nya beräkningar för den totala mängd kväve som kommer från odetonerade sprängmedel. Lakförsöken genomfördes på bergmassorna från Förbifart Stockholms tunnelbyggnationer på Lovön, entreprenaderna FSE 302 Norra Lovö och FSE 308 södra Lovö. Försöken genomfördes enligt den metodik som Sjölund utarbetade i sina försök, men med betydligt fler antal prover. Då man använder sig av recirkulering av länshållningsvattnet på Lovön, har istället data från andra tunnelprojekt där länshållningsvattnet gått direkt till Stockholms spillvattenledningssystem använts.

2. Genomförande

2.1 De undersökta bergmassorna.

De undersökta bergmassorna levererades med sjötransport från Förbifart Stockholms tunnelbyggnationer på Lovön, entreprenaderna FSE 302 Norra Lovö och FSE 308 södra Lovö. Båda entreprenaderna drevs av LSAB, en italiensk entreprenör. Massorna krossas av tunnelentreprenören till 0–150 och läggs på ett mellanlager mellan krossanläggningen och hamnen. Uppehållstiden i mellanlagret är ca 3–7 dygn. Därefter lastas det, med hjälp av transportband ombord på fartyg för att därefter transporteras till mottagningshamnen vid Löten. Totalt kommer ca 5 miljoner ton bergmassor att transporteras till Löten på detta sätt. Vid hamnen i Löten lossas bergmassorna med däcksmonterad grävmaskin. Bergmassorna läggs därefter upp i ett mellanlager i väntan på vidare hantering. De bergmassor som har lakats i dessa försök har tagits från detta mellanlager.

2.2 Geologin på Lovö

Den dominerande bergarten i området är en grå medel- till grovkornig gnejs av ett sedimentärt ursprung. Mindre partier av granit samt grönstengångar och gångar eller diffusa ansamlingar av pegmatit förekommer i gnejsen. Sprickmineral domineras av klorit och kalcit. Området är i huvudsak medel- till storblockigt med sprickfrekvens på 1-3 sprickor/m. Bergkvalitetskartan visar på klass 1 och 2. Bergkvalitetskartan visar berggrundens tekniska egenskaper ur ballast- och anläggnings synpunkt. Berget delas in i tre olika kvalitetsklasser, 1) god, 2) mindre god och 3) dålig kvalitet.

2.3 Tunneldrivning

De undersökta bergmassorna kommer från tunnelsalvor som sprängts veckorna innan lakningsförsöken inleddes. Det går inte att spåra bergmassorna från enskilda salvor och på så sätt reda ut den exakta mängden sprängämne som har använts. I stället har samtliga salvor som sprängts på Lovön, både på arbetsplatserna norra och södra Lovön sammanställts under de 4 veckor som föregick försöken. Ett medelvärde på specifik laddning (kg/m^3), alltså den mängd sprängämne som har använts för att spränga loss en kubikmeter fast berg räknats fram. Detta har sedan utgjort jämförelsevärde för den kvävehalt som lakats ur bergmassorna i försöken. Källa för tabellen nedan har varit Trafikverkets uppföljningsdata som bygger på de salvrappporter och loggar som entreprenören sammanställer.

I Tabell 2 visas data för salvorna som varit underlag för specifik laddning. Den specifika laddningen för de olika områdena har liten spridning med ett medelvärde på $2,2 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Tabell 2. Data för salvor

Entreprenad	Tunnel	Period 2018	Antal salvor st	Area m^2	Spec laddn kg/m^3
FS 302	Huvudtunnel	v 39-42	11	120	2,18
FS 308	Huvudtunnel	v 39-42	12	129	2,14
FS 308	Ramptunnel	v 39-42	27	90	2,3
			50		Medel 2,2

Salvlängderna var 4,5 – 5,2 m. Sprängämnet var pumpbart emulsionsprängämne. Till ramptunnlarna användes ca 900 – 1000 kg sprängämne och till huvudtunnlarna 1100 – 1200 kg.

2.4 Metodbeskrivning

I Sverige anges nederbördsmängden vanligen i millimeter. Om det exempelvis regnar 1 mm innebär det att regnvattnet bildar ett 1 mm tjockt skikt på en horisontell yta om inget vatten avdunstar eller rinner undan. Detta betyder att 1 mm regn motsvarar 1 liter per kvadratmeter.

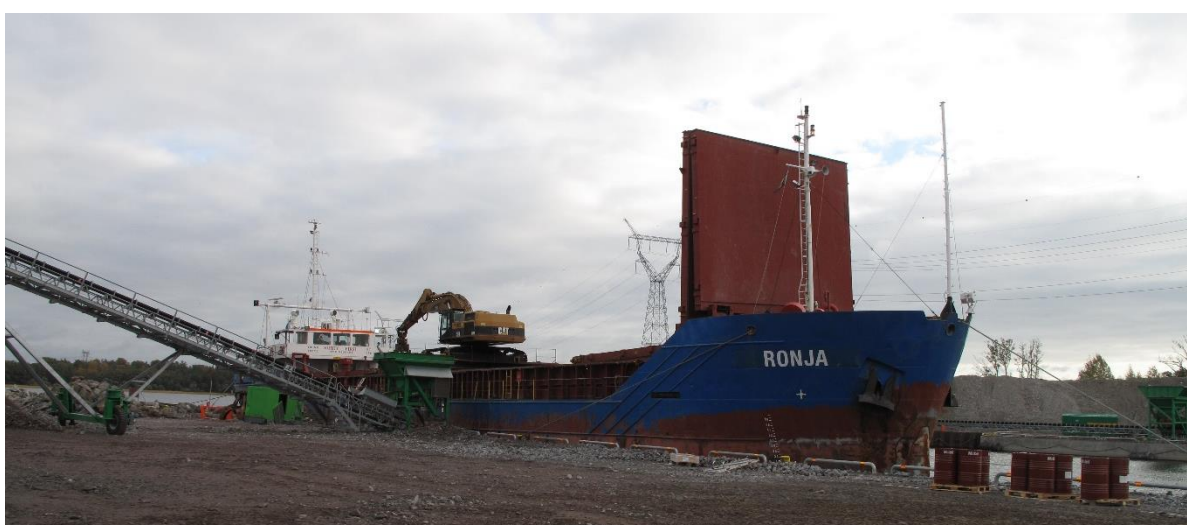
Årsnederbörden i Stockholm brukar i snitt vara ca 550 mm. Ovanytan på de containrarna som användes vid försöken var $4,6 \text{ m}^2$. Vid försöken spolades totalt 2000 lit vatten över denna yta vilket skulle motsvara 435 mm nederbörd, dvs motsvarande ca 80 % av årsnederbörden i Stockholm.

För att undersöka kvävehalten i berg bestämdes därför att den s.k. containermetoden skulle användas (Sjölund, 1997).

Berget som undersöktes kom med båtar från tunneldrivningen på Lovön, se Figur 4. Berget lastas av båtarna, se Figur 5, och transporteras via band till stora högar.



Figur 4. Tunneldrivning Lovön



Figur 5. Avlastning av berg från båt till transportband

Tre 10 m³ container hyrdes och ställdes upp på en liten berghög på kajområdet, se Figur 6. Innan försöken inleddes hade containrarna rengjorts och försetts med tappkranar, se Figur 7–9.

En hjullastare med skopvåg hämtade tre skopor berg per omgång och lade ut detta i tre högar framför containrarna, se Figur 10–11. Bergmängden per skopa var ca 10 ton. Lastmaskinföraren försökte ta berg från olika ställen i Jehanders berghögar för att försöka utjämna den ev. skillnaden i styckefall.

Lastmaskinen kunde inte lasta berget direkt i containrarna pga. för kort räckvidd. Därför lastades berget upp i containrarna med en annan maskin, se Figur 9–10.

Framför containrarna placerades 200 liters tunnor för uppsamling av lakvattnet, se Figur 14. Vattnet, som togs från Mälaren, pumpades till en mobil vattentank, se Figur 17. Från tanken pumpades vatten i omgångar till containern. Vattenmängden kontrollerades med en flödesmätare, se Figur 16.

Varje container lakades i 4 omgångar med 200 liter, 400 liter, 600 liter och 800 liter vilket betyder att det totalt lakades med 2000 liter vatten per container. Figur 14 visar vattenbegjutning och laktunnor. Efter att i varje omgång ha påfört rätt mängd vatten och rätt fördelat över bergytan väntade vi 15 minuter innan tappkranen i containern öppnades. Lakvattnet rann ner i tunnans, se Figur 18, och då flödet upphörde togs

prov på lakvattnet i 150 ml provflaskor, se Figur 19-20. Provflaskorna var märkta och skickades via Bring från Västberga till SYNLAB i Linköping för analys. Det togs även prov på ingående vatten.

Efter varje omgång lyftes containrarna ner och tömdes, se Figur 21, varefter de åter noggrant tvättades rena och ställdes upp igen. Tunnorna med lakvatten tömdes och rengjordes.



Figur 6. Containrarna



Figur 7. Högtryckstvättning



Figur 8. Iordningställning av container



Figur 9. Tappkran



Figur 10. Lastning av berg



Figur 11. Berghög innan lastning till container



Figur 12. Lastning till container



Figur 13. Lastning i container



Figur 14. Tunnor för uppsamling av lakvatten



Figur 15. Vattentank



Figur 16. Flödesmätare



Figur 17. Lakning



Figur 18. Påfyllning av lakvatten



Figur 19. Provtagning



Figur 20. Fyllning av provflaskor



Figur 21. Tömning av container

3. Resultat

Försöken bestod av fyra omgångar med tre containrar berg i varje omgång. Ett särskilt uppföljningsprotokoll togs fram. I protokollet antecknades bl.a. datum, tonnage, påförda vattenmängder, provnummer, styckefall och väderförhållanden, se Bilaga 1. I Tabell 3 visas några utvalda specifikationer för de olika omgångarna.

Tabell 3. Vikt och styckefall för testomgångarna

Omgång	Vikt (ton)			Styckefall
	1	2	3	
1	10,1	10,1	10,2	Normalt
2	10,4	10,3	10,3	Fint
3	10,6	10,1	10,1	Normalt
4	10,3	10,3	10,2	Normalt

Bergmängden i containrarna var drygt 10 ton. I omgång 2 var styckefallet mycket fint medan det var grövre och ganska likvärdigt i de övriga omgångarna. Figur 22 visar ingående berghög till omgång 4 och Figur 23 visar den betydligt finare fraktionen till omgång 2. Detta berg, omgång 2, togs från kajplatsen närmast vår försöksplats medan berget i omgång 1,3 och 4 togs från den stora berghögen som matas från transportband från den andra kajen.



Figur 22. Berghög i omgång 4



Figur 23. Berghög från omgång 2

Omgång 2 var besvärlig att laka ut. Efter påfyllning av 200 liter kunde inte något vatten tappas ut ur någon av de tre containrarna. Från de andra omgångarna kunde vi i princip laka ut samma vattenmängd som vi hade tillfört. I omgång 2 sögs vattnet upp i finandelen och tappningshålen sattes igen och fick rensas vid några tillfällen. Vid lakning av container 3 avbröts lakningen av 400 l då det rann mycket dåligt från tappningskranen. Tappningskranen stängdes men då den åter öppnades nästa dag kunde ytterligare drygt 100 liter tappas ut.

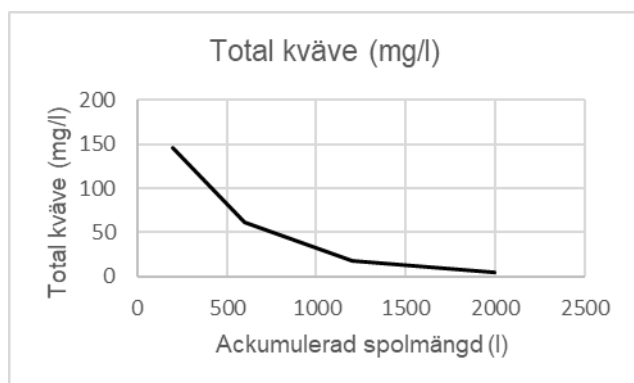
En sammanställning av resultaten från totalkväve undersökningen visas i Tabell 4. Hela analysresultatet visas i Bilaga 2. Då vatten fortfarande rann ut från container 2 under omgång 2 togs ett extra prov på detta lakvatten. Provet hade då en hög kvävehalt (320 mg/l). I samma omgång kunde som ovan nämnts ett extra lakvattenprov tas efter 400 l påfyllning i container 3. Kvävehalten hade på ca 15 tim. ökat från 260 mg/l till 310 mg/l.

Tabell 4. Uppmätt totalkväve (mg/l) för de olika försöken

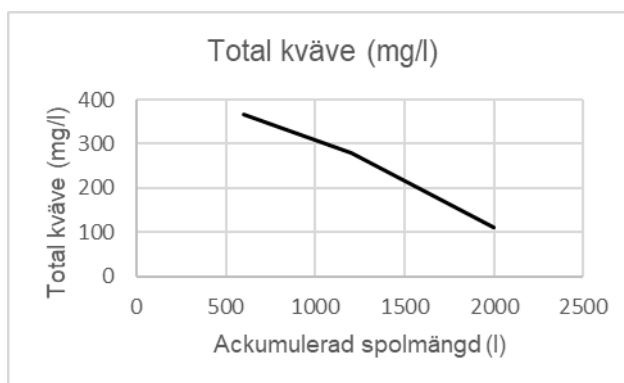
Omgång	1			2			3			4		
	Total kväve (mg/l) Container			Total kväve (mg/l) Container			Total kväve (mg/l) Container			Total kväve (mg/l) Container		
Vattenmängd (l)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
200	220	100	120				74	95	100	100	94	80
400	100	39	48	390	450	260	37	63	63	69	71	51
400						310						
600	29	12	16	250	280	150	16	16	28	25	29	19
800	10	3,8	5,3	94	95	130	6,4	7,5	9,7	8,5	11	8,2
800					320							

Kvävehalten i ingående vatten från Mälaren analyserades till i snitt 0,44 mg/l, alltså en mycket liten del av uppmätt lakvatten. Vid vidare analys togs dessa värden på ingående vatten bort från uppmätta halter på lakvattnet.

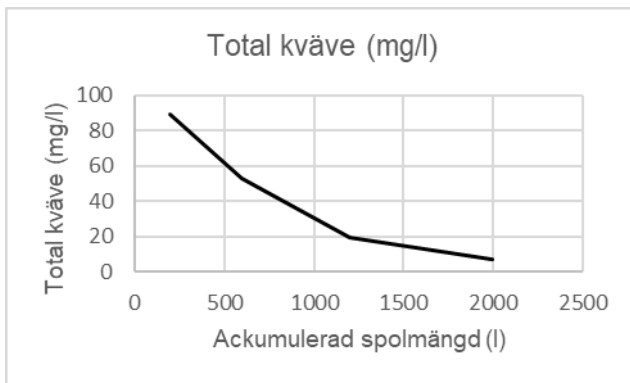
Resultatet av kväveundersökningen representeras i fyra utvalda kurvor (figur 24-27). I kurvorna har totalkvävet plottats mot den ackumulerade spolmängden. Efter att 2000 l vatten påförts är kvävehalten i omgång 2 nära 10 ggr så hög som i omgång 1. Detta beror naturligtvis på en mycket hög finandel i omgång 2. Data och kurvor för samtliga försök hittas i Bilaga 2.



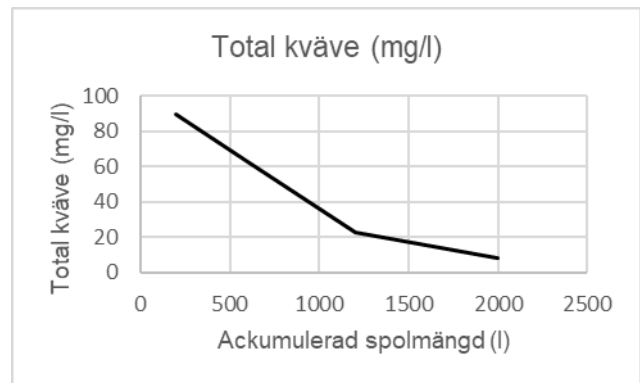
Figur 24. Totalkväve i omgång 1



Figur 25. Totalkväve i omgång 2



Figur 26. Totalkväve i omgång 3



Figur 27. Totalkväve i omgång 4

Totalt så hade 2000 liter vatten påförts i varje omgång då lakningen avslutades. Det var då stor skillnad i kvävehalten i lakvattnet mellan omgångarna från som lägst 4mg/lit upp till ca 320 mg/liter. Det är intressant att undersöka hur mycket kväve i förhållande till den specifika laddningen som lakats ut.

Vid tunneldrivningen i Förbifarten används uteslutande pumpemulsion. I BeFo Rapporten Tunneldrivning med Pumpemulsion, framgår att det vid sprängning i tunnlar och underjordsgruvor för närvarande nästan uteslutande används pumpemulsion (Olsson och Niklasson, 2012). Huvuddelen i pumpemulsion är ammoniumnitrat 60-80 % och resterande delar är vatten, andra salter, olja och emulgatorer. Andelen kväve i pumpemulsion varierar lite hos olika tillverkare men är i genomsnitt ca 27 %.

Beräkningsgången för totalt urlakat kväve framgår av följande:

- Totalt ackumulerad mängd kväve (g): Total kvävemängd (mg/l) x spolmängd/omgång (l)+ Totalt ackumulerad mängd från föregående omgång
- Totalt ackumulerad mängd kväve per ton: Totalt ackumulerad mängd kväve (g)/bergmängden

För omgång 1 och container 1 medför detta (se Bilaga 2 för kvävevärden).

För 200 l: Totalt ackumulerad mängd kväve (g)=219,58 x 200=43916 mg/l =43,916 g/l
Totalt ack mängd kväve/ton=43,916/10,1~4g/ton

För 400 l: Totalt ackumulerad mängd kväve (g)= 99,58 x 400 + 43916 = 83748 mg/l =83,748 g/l
Totalt ack mängd kväve/ton=83,748/10,1~8g/ton

På detta sätt erhålls övriga värden som visas i Tabell 5.

Tabell 5. Medelvärde totalkväve från försöken.

Spolmängd	Ack.spolmängd	Medelvärde totalkväve (g/ton) per omgång			
		1	2	3	4
(l)	(l)				
200	200	2,7		1,7	2
400	600	5	14	3,7	4,7
600	1200	6,3	28,3	5	5,7
800	2000	7	36,3	5,7	6,3

Då försöket i omgång 1 container 1 avbröts hade det alltså lakats ut 11 g kväve per ton berg. Den specifika laddningen vid tunneldrivningen på Lovön är i genomsnitt ca 2,2 kg/m³ vilket motsvarar 820 g/ton. Kvävehalten på 27 % motsvarar 221 g/ton. Andelen av den specifika laddningen som då lakats ut blir 5 % (11/221 g/ton). Detta betyder att 5% av sprängämnet inte har använts (ej detonerat, spill). En sammanställning av urlakad kvävemängd som andel av den specifika laddningen för de olika omgångarna visas i Tabell 6.

Tabell 6. Urlakad kvävemängd i containrarna som andel av den specifika laddningen i % (221 g/ton).

Omgång 1			Omgång 2			Omgång 3			Omgång 4		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
5	1,8	2,7	16,7	30	23	1,8	2,7	3,2	3,2	3,2	2,3

Det är stor skillnad på den urlakade kvävemängden. Omgång 2 sticker ut med höga kvävevärden. Här hade mellan 17 och 30 % av den specifika laddningen kväve lakats ut då försöket avbryts. Det betyder i klartext att en mycket stor mängd av tillförd sprängämnesmängd inte har använts (ej detonerat eller olika former av spill).

De andra omgångarna, med grövre styckefall, hade endast 1/10 del av dessa värden. I omgång 2 container 2 och 3 togs extra prover med lakvatten som redovisats i Tabell 4 och Tabell 6. Här framgick tex att urlakad kvävemängd som andel av den specifika laddningen maximalt var 30 %. Om man bortser från dessa extra prover så reduceras kvävemängden men förblir ändå hög (19 % i stf 30 %). Om lakningen hade fortsatt med ytterligare vattentillförsel hade den totalt ackumulerade kvävehalten blivit ännu högre.

Vi har i projektet inte gjort några mätningar på länshållningsvattnet då detta recirkuleras på denna entreprenad. Vi har istället tagit data från pågående och avslutade tunnelprojekt i Stockholm som gått direkt till spillvattenledningsnätet. Värdena därifrån har legat på 60-150 mg/l i medeltal. Weimann 2014 redovisar i sina beräkningar av hur mycket kväve som kan hamna i processvattnet, att det går åt ca 70-160 m³ vatten/per salva (5,5-6 m salvlängd).

Mängden berg i en salva i denna entreprenad är ca 1620 ton baserat på följande:

Tunneltvärsnitt: 120 m², salvlängd: 5 m och densitet på berget är 2,7 kg/m³.

Om vi antar att det gått åt 70000 l vatten till varje salva och att kvävehalten i processvattnet ligger på ca 60-150 mg/l så blir halten 2,5-6,4 g N/ton berg.

Andelen av den specifika laddningen som inte detonerat blir då: 1,1-2,9 %.

I tabell 7 redovisas totala mängden kväve som andel av den specifika laddningen i %

Tabell 7. Total urlakad kväve (kväve från containrar + kväve från länshållningsvatten) som andel av den specifika laddningen i % (221 g/ton).

Omgång 1			Omgång 2			Omgång 3			Omgång 4		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
6,1- 7,9	2,9- 4,7	3,7- 5,6	17,8- 19,6	31,1- 32,9	24,1- 25,9	2,9- 4,7	3,8- 5,6	4,3- 6,1	4,3- 6,1	4,3- 6,1	3,4- 5,2

4. Diskussion

Försöken med lakning av tunnelberg från Lovön hos Jehanders täkt Löten på Munsö visar på stora skillnader i uppmätt totalkväve mellan de olika försöksomgångarna. Orsaken till de stora skillnaderna är att finandelen binder mer kväve och omgång 2 hade en mycket hög finandel. Visuella observationer som gjordes under försöket då båtarna lastades av tydde på en stor finandel i bergmaterialet. Finandelen silas troligen ner och hamnar mer inne i berghögarna medan det grövre materialet "rullar" iväg längre ner. Berget till våra lakningsförsök som lastades längst ner i den stora berghögen, se Figur 28, fick då automatiskt ett grövre material. Berget till omgång 2 lastades däremot inte från den stora högen utan togs från en båt som kvällen innan lastats av direkt på kajen, se Figur 29. Spridningen i resultatet visar att det är väldigt svårt att ta ett representativt prov när det handlar om så här stora provmängder. Kornstorleksfördelningen i omgång 1, 3 och 4 är andelen finmaterial underrepresenterad och för omgång 2 så är den klart överrepresenterad. Detta återspeglas i stora skillnaden i resultat, där omgång 2 som hade 53 g/ton kväve som mest jämfört med de andra omgångarna som alla hade under 10 g/ton. Detta visar tydligt att det odetonerade sprängmedlet återfinns i finmaterialet.



Figur 27. Den stora berghögen



Figur 28. Lastning av berg direkt från kaj

I en NCC rapport visas resultat av lakförsök att största mängden kväve fanns i finandelen (Nordström och Wiksten 2018). Ett examensarbete hos Jehanders Munsö (Nilsson, 2018), som också analyserade tunnelberg från Lovön visade att totalkvävet, avläst efter tvättsiktning på 4 mm sikt var 64 mg/l, vilket tyder på att det fortfarande kan finnas kväve kvar på de större fraktionerna. Lakförsök på 0/16 mm fraktionen från berget från Lovön har visat på totalkvävehalter på 570 mg/l vilket också styrker att mest kväve finns i finandelen (Nilsson pers. komm.).

Om det är andelen finmaterial som styr kvävehalten i bergmassorna så bör andelen kväve i länshållningsvattnet öka om andelen finmaterial är mindre i det utsprängda berget, förutsatt att den totala andelen odetonerat sprängmedel är densamma. Om man ska försöka räkna ut den totala mängden kväve och därmed andelen odetonerat sprängmedel så bör man lägga ihop maxvärden från lakförsök med minvärdet från länshållningsvattnet.

Baserat på detta så visar våra försök att det är en variation på ca 5-17 % odetonerat sprängmedel i dessa försök. Våra resultat visar också att ett extremvärde skulle kunna ligga på uppemot 33 %. Tidigare har man uppskattat att ca 25 % av kvävet följer med länshållningsvattnet och 75 % stannar i bergmassorna. Resultaten från omgång två visar upp mot sådana halter, baserat på kvävehalt på 150 mg/l i länshållningsvattnet. De andra omgångarna visar dock betydligt lägre halter. Baserat på dessa resultat är det nog lämpligare att räkna med att ca 50 % sitter kvar på bergmassorna.

När Trafikverket beräknar totalkväve i samband med ansökan om vattenverksamhet för tunnelentreprenader används oftast antagandet (från litteraturen) att andelen odetonerat sprängmedel är ca 15 % i medel och att den specifika laddningen ligger på 1-2 kg/m³. När det gäller den specifika laddningen så är detta ett alldeles för lågt antagande. I förbifart Stockholm ligger den specifika laddningen i snitt på 2,2 kg/m² och enligt korrespondens med ett flertal entreprenörer så är laddningskoncentrationen snarare 2-3 kg/m³. Den specifika laddningen är dock areaberoende och stiger med minskad area på tunneln. I en liten tunnel (t.ex. avloppstunnel area < 20 m²) kan därför specifika laddningen bli betydligt högre än 2,2 kg/m³ (Olofsson 2007). Så vilken specifik laddning som ska antas vid kväveberäkningar är mycket mer projektspecifik än vad som används idag. Däremot är antagandet att ca 15 % av sprängmedlet inte detonerar för högt, 10 % är nog mer lämpligt.

De kan tyckas vara en liten justering på dessa antaganden, men om det är stora tunnelprojekt så kan det ha väldigt stor betydelse för hur länshållningsvattnet ska hanteras.

Hur ska vi då kunna minska kvävehalterna? I kapitlet bakgrund redovisas flera orsaker till varför kvävehalterna blir så höga vid tunnelsprängning jämfört med ovanjordssprängning. För att komma till rätta med dessa så ser vi följande relativt enkla åtgärder:

Idag laddas ofta tunnelsalvorna med onödigt hög laddningskoncentration jämfört med den moderna sprängteorin (Langefors & Kihlström, 1978). En lägre laddningskoncentration skulle minska kvävehalten men också andelen finmaterial i sprängsalvan.

Det behövs bättre kontroll hos beställaren att krav på omhändertagande av överblivet sprängmedel följs.

Certifiering av borrhare och laddare. Trafikverket kravställer att bulstättare, injektorare och sprutbetongarbetare ska vara certifierade. Detta bör även gälla borrhare och laddare så dessa lär sig att ladda på rätt sätt.

Ladda konturen med patronerat sprängmedel. Patronerat sprängmedel har mycket högre detonationsgrad än strängemulsion vilket kommer resultera i mindre mängd glasögon där det kan ligga kvar sprängmedel.

5. Slutsatser

Lakförsök på bergmassor har utförts genom containerförsök. 10 ton bergmaterial lakades i varje container och totalt 12 försök utfördes. Resultaten visar tydligt att största delen av kvävet sitter fast i bergmaterialets finandel. Den högsta uppmätta totalkvävmängden var 450 mg/l. Dock är spridningen i resultat stort, vilket visar på svårigheten i att ta ett representativt prov när man hanterar så här stora provmängder.

Resultaten från detta projekt indikerar att det sker en stor överskattning i hur stor andel kväve som inte detonerar vid tunnelsprängning när trafikverket gör sina antaganden i samband med miljödomar. Anledningen är främst att man hänvisar till gammal litteratur där sprängningen utfördes annorlunda. Dock laddas dagens tunnelsalvor för mycket och kan minskas med bibehållet resultat.

Försöken visar att andelen sprängmedel som inte detonerar ligger på ca 5-20 % vilket är lite mindre än vad som tidigare är ansett i litteraturen. Dock är halten som inte detonerar stor och detta kan minskas genom en mer noggrann laddning av salvorna, minskad mängd sprängmedel och en bättre hantering av överblivet sprängmedel. Om konturhålen laddas med patronerat sprängämne istället för strängemulsion skulle andelen odetonerat sprängämne troligen minska och därmed även kvävehalten. Momentan initiering av konturhålen minskar risken för odetonerade hål och medför dessutom mindre sprickbildning i kvarstående berg.

6. Referenser

Olsson M, Niklasson B. Tunnel drivning med Pumpemulsion, BeFo Rapport 115, 2012.

Sjölund G. Kväveläckage från sprängstensmassor. Examensarbete 1997:332 LTU.

Tilly L, Ekvall J, Borg G, Ouchterlony F. Vattenburna kväveutsläpp från sprängning och sprängstensmassor. SveBeFo rapport 72, 2006.

Johansson C, 2002. Kväveläkning från LKAB:s gråbergsdeponier. Examensarbete, 2002:074, Civilingenjörsprogrammet, Luleå Tekniska Universitet.

Nilsson K. Using plants to remediate wastewater produced from the cleaning process of blasted rock materials. Masters Degree. Stockholms Universitet nr 45, 2018.

Olofsson S. Modern bergsprängningsteknik, Ärla 2007.

Svemin. Kväveutsläpp från gruvindustrin, 2012

NCC. Komplettering av anmälan gällande uppställning av krossanläggning inom del av fastigheten Barkarby 2:2 i Järfälla kommun, 2018.

Trafikverket Västlänken. PM utsläpp till vatten/ miljö kvalitetsnormer för vatten, ärendenr 2016/3151, 2016.

Weimann L. Utsläpp från tunnelsprängning till ytvatten. Examensarbete i Miljövetenskap, Institutionen för biologi- och miljövetenskap Göteborgs Universitet, 2014.

Forsberg H, Åkerlund H. Kväve och sprängämnesrester i LKAB:s malm-, gråbergs- och produktflöden. Examensarbete LTU 1999:258, 1999.

Nordström A, Wikstén L. Förvaring av sprängsten i Rotebro. Examensarbete LTU, 2018

7. Bilagor

Bilaga 1. Uppföljningsprotokoll

Omgång
Berg från

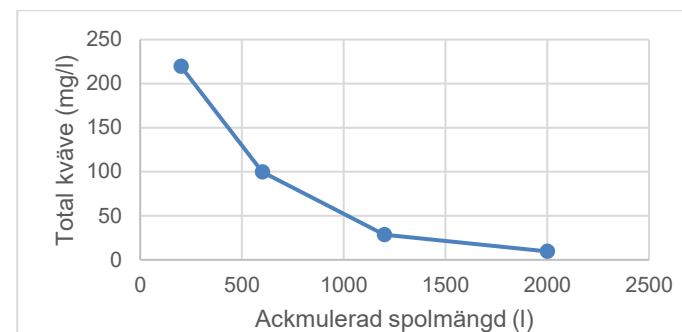
Container					1	2	3	
Datum för berg								
Datum för prov								
Tonnage	(skopvåg)							
					Provnummer			
Vattenmängd				200				
Mätarställning innan påfyllning								
Mätarställning efter påfyllning								
Verklig mängd								
				400				
Mätarställning innan påfyllning								
Mätarställning efter påfyllning								
Verklig mängd								
				600				
Mätarställning innan påfyllning								
Mätarställning efter påfyllning								
Verklig mängd								
				800				
Mätarställning innan påfyllning								
Mätarställning efter påfyllning								
Verklig mängd								
Rent vatten								
Observationer								
	Berg	mkt fint	normalt	grovt				
	Väder							
	Temp.							
	Övrigt							
Tid att fylla berg								
Spoltid								

Bilaga 2. Kvävekurvor

Omgång 1

Container 1

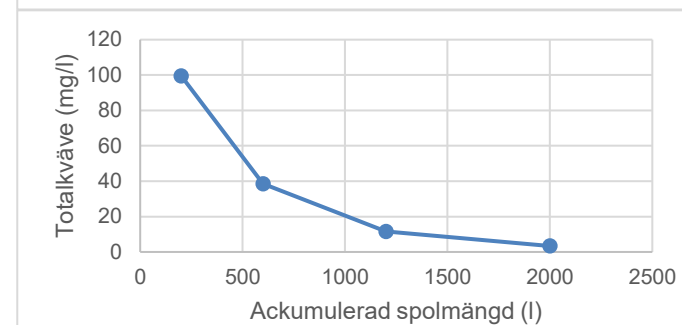
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten		Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200	220			200	219,58
400	600	100			600	99,58
600	1200	29			1200	28,58
800	2000	10			2000	9,58
			0,42			



Omgång 1

Container 2

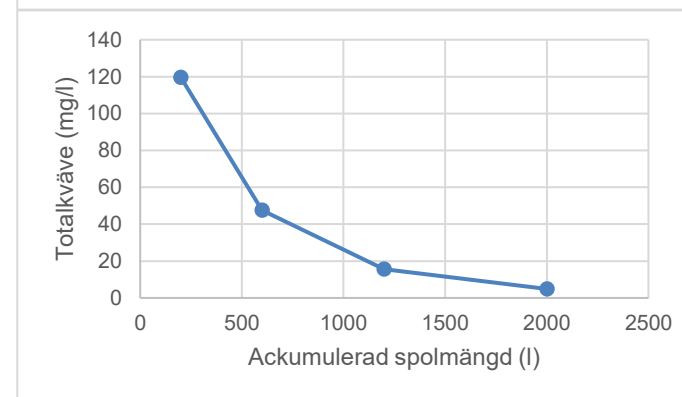
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten		Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200	100			200	99,57
400	600	39			600	38,57
600	1200	12			1200	11,57
800	2000	3,8			2000	3,37
			0,43			



Omgång 1

Container 3

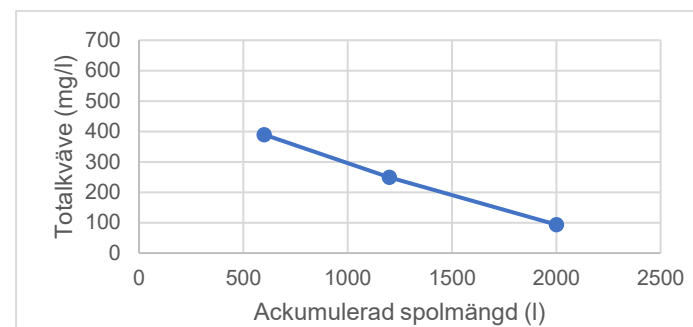
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten		Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200	120			200	119,58
400	600	48			600	47,58
600	1200	16			1200	15,58
800	2000	5,3			2000	4,88
			0,42			



Omgång 2

Container 1

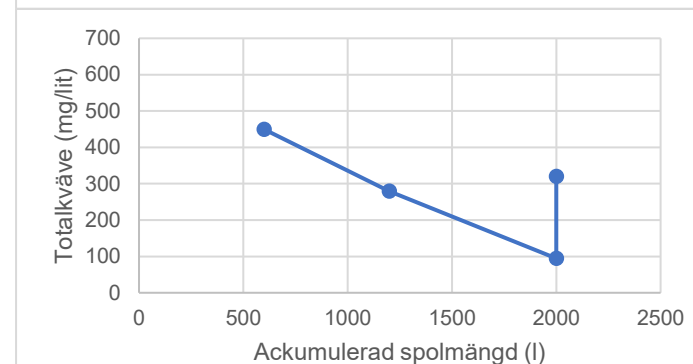
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten	Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200			200	
400	600	390		600	389,52
600	1200	250		1200	249,52
800	2000	94		2000	93,52
			0,48		



Omgång 2

Container 2

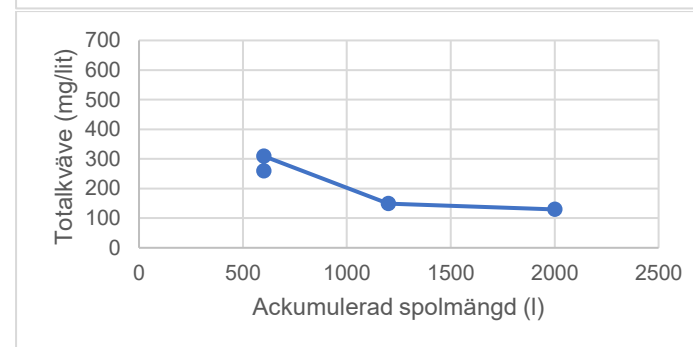
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten	Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200			200	
400	600	450		600	449,52
600	1200	280		1200	279,52
800	2000	95		2000	94,52
800	2000	320		2000	319,52
			0,48		



Omgång 2

Container 3

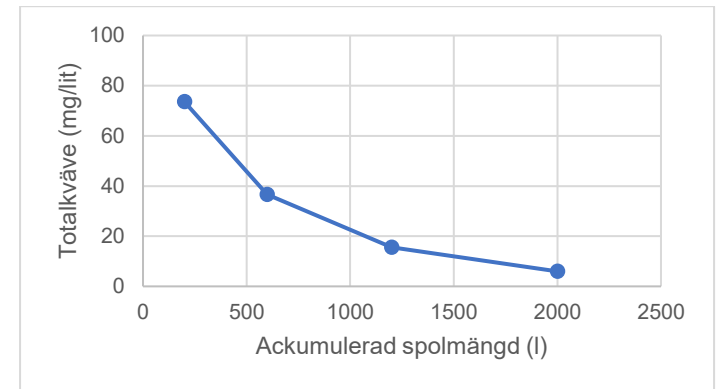
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten	Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200			200	
400	600	260		600	259,58
400	600	310		600	309,58
600	1200	150		1200	149,58
800	2000	130		2000	129,58
			0,42		



Omgång 3

Container 1

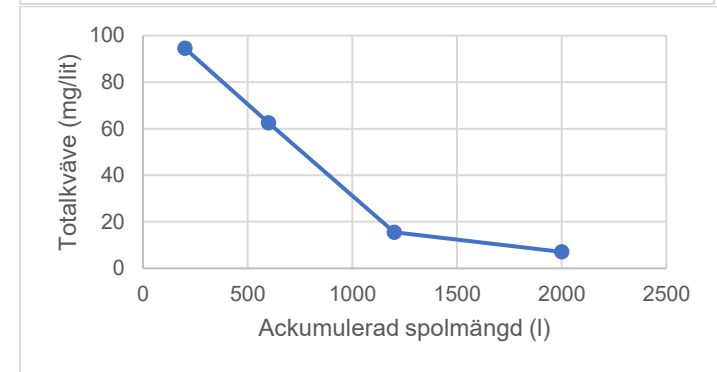
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten	Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200	74		200	73,58
400	600	37		600	36,58
600	1200	16		1200	15,58
800	2000	6,4		2000	5,98
			0,42		



Omgång 3

Container 2

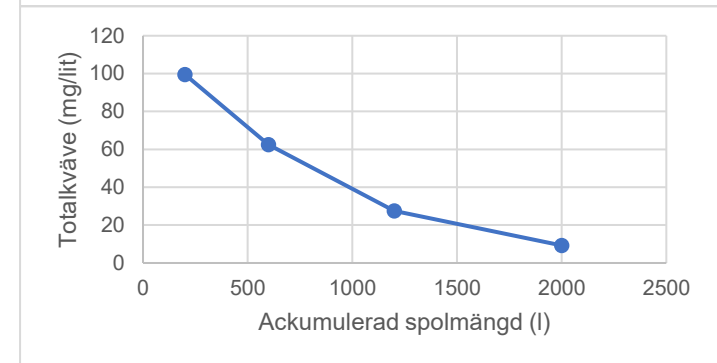
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten	Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200	95		200	94,58
400	600	63		600	62,58
600	1200	16		1200	15,58
800	2000	7,5		2000	7,08
			0,42		



Omgång 3

Container 3

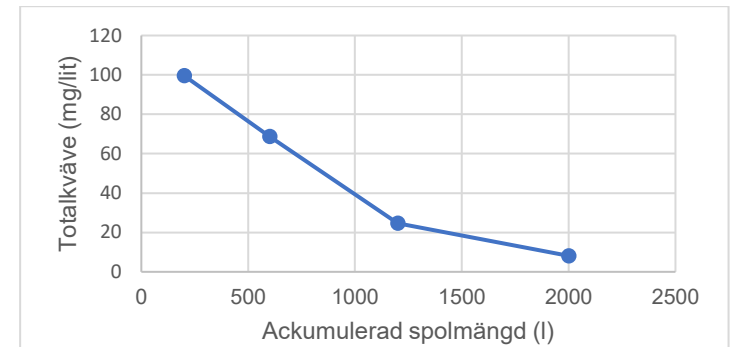
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten	Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200	100		200	99,58
400	600	63		600	62,58
600	1200	28		1200	27,58
800	2000	9,7		2000	9,28
			0,42		



Omgång 4

Container 1

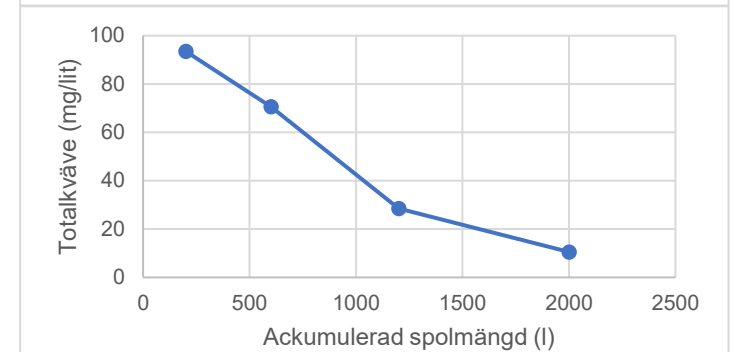
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten		Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200	100			200	99,63
400	600	69			600	68,63
600	1200	25			1200	24,63
800	2000	8,5			2000	8,13
			0,37			



Omgång 4

Container 2

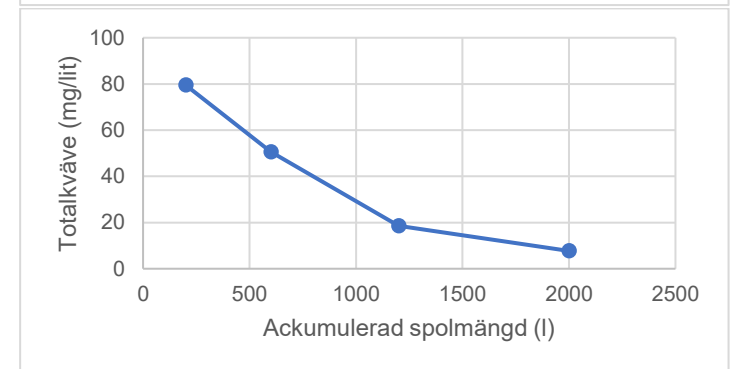
Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten		Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200	94			200	93,54
400	600	71			600	70,54
600	1200	29			1200	28,54
800	2000	11			2000	10,54
			0,46			



Omgång 4

Container 3

Vatten	Ack. Vatten	Total kväve	Rent vatten		Ack.spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)
200	200	80			200	79,51
400	600	51			600	50,51
600	1200	19			1200	18,51
800	2000	8,2			2000	7,71
			0,49			



Bilaga 3. Total kväve per ton berg

Omgång 1 Container 1

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	219,58	43,916	4
400	600	99,58	83,748	8
600	1200	28,58	100,896	10
800	2000	9,58	108,56	11

Omgång 1 Container 2

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	99,57	19,914	2
400	600	38,57	35,342	3
600	1200	11,57	42,284	4
800	2000	3,37	44,98	4

Omgång 1 Container 3

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	119,58	23,916	2
400	600	47,58	42,948	4
600	1200	15,58	52,296	5
800	2000	4,88	56,2	6

Omgång 2 Container 1

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	0	0	0
400	600	389,52	155,808	15
600	1200	249,52	305,52	29
800	2000	93,52	380,336	37

Omgång 2 Container 2

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	0	0	0
400	600	449,52	179,808	17
600	1200	279,52	347,52	34
800	2000	94,52	423,136	41
800	2000	319,52	678,752	66

Omgång 2 Container 3

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	0	0	0
400	600	259,58	103,832	10
400	600	309,58	227,664	22
600	1200	149,58	317,412	31
800	2000	129,58	421,076	41

Omgång 3 Container 1

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	73,58	14,716	1
400	600	36,58	29,348	3
600	1200	15,58	38,696	4
800	2000	5,98	43,48	4

Omgång 3 Container 2

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	94,58	18,916	2
400	600	62,58	43,948	4
600	1200	15,58	53,296	5
800	2000	7,08	58,96	6

Omgång 3 Container 3

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	99,58	19,916	2
400	600	62,58	44,948	4
600	1200	27,58	61,496	6
800	2000	9,28	68,92	7

Omgång 4 Container 1

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	99,63	19,926	2
400	600	68,63	47,378	5
600	1200	24,63	62,156	6
800	2000	8,13	68,66	7

Omgång 4 Container 2

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	93,54	18,708	2
400	600	70,54	46,924	5
600	1200	28,54	64,048	6
800	2000	10,54	72,48	7

Omgång 4 Container 3

Spolmängd (l)	Ack spolmängd (l)	Total kväve (mg/l)	Total ack kväve (g/spolning)	Total ack kväve (g/ton)
200	200	79,51	15,902	2
400	600	50,51	36,106	4
600	1200	18,51	47,212	5
800	2000	7,71	53,38	5

