

V E39 ROGFAST

GEOKJEMISK VURDERING AV TUNNELMATERIALE ENTREPRISE E2

**Utarbeidet for
Statens vegvesen region vest,
Prosjekt: E39 Rogfast**

**Utarbeidet av
SARB Consulting Norge AS**

**Prosjektleder
SARB Consulting Norge AS**

**Ingar Walder, PhD
Kjeøy 8412 Vestbygd, Norge**

**Oppdragsansvarlig for Statens
Vegvesenet Region vest**

Merete Landsgård

Tredjeparts granskning:

**Dr. Scient. David Ettner
Geode AS, Asker**

SAMMENDRAG

SARB Consulting Norge AS har på oppdrag av E39 Rogfast prosjektet, Statens vegvesenet region vest, utarbeidet en miljøgeokjemisk vurdering av materialet fra Boknafjordtunnelen, materialet som er planlagt brukt til utfyllinger på Kvitsøy (Krossøy og Krogøy), Rogaland, under entreprise E2.

INNLEDNING OG METODEVALG

Boknafjordtunnelen går igjennom granittiske gneiser, fyllitt, grønnstein/grønnskifer og gabbro hvor deler av dette tilhører Vistnes gruppen bergarter og er en del av Karmøy ofiolittkomplekset. Grønnsteinen/grønnskiferen med svartskifer er kjent for å inneholde sulfid-mineraler og det er flere sulfidmineraliseringer assosiert med dette ofiolittkomplekset. Svovelkis er hoved sulfidmineralet (NGU Report 2011.034, Saintot, og Solli, 2011). Svartskifer er av Statens vegvesen estimert til å utgjøre ca 2-5% av de totale massene på ca 2.3 million m³ fast fjell, mens 10-20 % utgjøres av gabbro og fyllitt for den delen av tunnelen som utgjør E2.

De planlagte utfyllingene vil være opptil 3 meter over havflaten, mens fyllingen går ned til 12 meter ved Krossøy og ned til 60 meter ved Krogøy. For å kunne benytte overskuddsmasser fra tunneldriften er det nødvendig å utføre en geokjemisk vurdering av egnetheten ved bruk av massene til utfyllinger som til dels går i havvannet, og vil dels ligge over havflaten.

De foreslåtte metoder for laktesting ifølge Miljødirektoratets Veileder M-411/2015 Testprogram for tildekkingsmasser, heretter benevnt M-411/2015 er oppstrøms kolonnetest (EN14405) og ristetest (EN12457-3). Det anbefales i M-411/2015 at disse testene er modifisert ved at det brukes saltvann istedenfor avionisert vann. Disse testene er regnet som lite egnet for grovt materiale som sprengmasser og er heller ikke anbefalt i en Europeisk veilederen for gruveavfallskarakterisering CEN/TR 16376 (Characterization of waste - Overall guidance document for characterization of wastes from the extractive industries, CEN/TC 292 WG8). Hvis det er sulfider inkludert i bergartene vil de ikke avgi (lekke ut) representativt mengde metaller under korte tester som ristetesten enten det brukes vann til fast stoff forhold (L/S) 1:1 eller 10:1 eller om det kjøres oppstrøms kolonne-testen (EN14405) over lang tid. Oppstrøms kolonnetesten tar ikke i betraktning at sulfidoksidering trenger tilgang på oksygen, og resultater av disse testene vil derfor ikke være representativ for bergartsmateriale plassert nære overflaten. Langtids kinetiske tester i henhold til CEN/TR 16376 (2012) er derfor mer egnet for å evaluere langtids-utlekking fra sulfidholdige bergartsmaterialer.

Det er utarbeidet veileder for langtids kinetiske (reaksjonshastighets) tester, henholdsvis EN 15875 (2010) og CEN/TR 16363 (2012) for å vurdere utlekkingspotensialet fra mineralavfall. Norsk gruveindustri har i tillegg utarbeidet en egen veileder for karakterisering av avfall og deponiområdet i forbindelse med saltvanns deponering av gruveavfall, og denne veilederen beskriver metoder for bruk ved langtidsutlekkings tester ved sjødeponering (Walder, 2014:

Sub-sea tailings deposition evaluation guideline – prSN/TR-9432. Norsk Bergindustri, Report No 2).

Veilederne EN14405, EN12457-3, og CEN/TR 16376/2012 beskriver metodene som kan brukes, men omhandler ikke akseptkriterier eller klassifisering basert på utlekkingskonsentrasjoner eller utlekkingshastigheter. Det er derfor naturlig å koble resultatene av disse testene til de norske klassifiseringsdokumentene, spesielt Miljødirektoratets veileder M-608/2016, Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota M-608 og M-411/2015. Grenseverdiene M-608/2016 er satt for forurensede masser, mens tunellmassene representerer ubehandlede overskuddsmasser, mens grenseverdiene i M-411/2015 er satt med tanke på å dekke over forurensede bunnsedimenter.

Bergartsmassene fra tunelldriften som ikke brukes i veibyggingen representerer overskuddsmasser som kan utnyttes til arealutfylling og er i utgangspunktet mye tilsvarende gråberg fra bergverksindustrien. Gråberg er bergartsmasser som må fjernes for å komme til malmen. Overskuddsmassene fra tunnelldriften er derfor karakterisert på samme måte som gråberg fra gruveindustrien skal karakteriseres med et tillegg at store deler av overskuddsmassene skal etter planen legges i sjøen. Dette tilsier at massene er analysert for total kjemi; mineralogi; mineralkjemi for å vurdere fordeling av sporelementer i mineraler/mineralgrupper; syre-base analyser for å vurdere om bergartene kan naturlig danne syre fra sulfidminerals oksidering og hvor mye av denne syren som naturlig vil på kort tid kunne nøytraliseres; organisk karboninnhold; og langtids utlekkings tester i saltvann; kinetiske tester ved bruk av avionisert ferskvann for plassering over havflaten. Disse testene er anvendt på prøver fra borekjerner for de tre bergartene (grønnstein, grønnskifer og svartskifer) samt for prøver fra en knusningssone. Bergartsprøver er tatt fra 6 forskjellige borekjerner som skjærer eller går i nærheten av den planlagte tunneltraseen.

RESULTATER OG TOLKNINGER

62 borekjernep prøver ble tatt for dette studiet. Disse prøvene ble logget og grovknust til ca 15 mm i diameter for å representere den finere delen av sprengt materiale. Det finknuste materialet med stor overflate relativt til vekt vil ha det største utlekkingspotensialet. Hvor mye av de utsprengte masser som vil utgjøre den finere fraksjonen er ukjent og vil ikke vites før sprengningen har startet. Norconsult AS vurderte i 2017 (Geologi i tunneltraseen og metallinnhold, Rogfast E39 prosjektet. Dokument nr. NO-110-YM) at finknust materialet <20 mm diameter vil utgjøre ca 30% av uttaksmassene. Dette er å regne som konservativt estimat ifølge Mona Bue ved Statens vegvesen region vest. Når tunnelldriften er kommet i gang kan andel finfraksjon (<20 mm) analyseres for kornfordeling av finfraksjon og sammenlignes med kornfordelingsanalysene utført på de grovknuste prøvene.

Etter grovknusingen av borekjernene ble prøvene splittet og en større splitt ble blandet med samme prøver av samme bergartstype for å gi fem blandingsprøver. De større prøvene ble delt i fire, mens de mindre prøvene ble delt i to. Prøver som ble delt i fire ga utgangspunktet for to saltvannslaktester og to kinetiske tester, mens de andre prøvene med noe mindre

materialet ga en saltvannstest og en kinetisk test. De mindre delprøvene ble sendt til SGS laboratoriet, Ontario, Canada for fast stoff analyser, mens prøver for langtids utlekkingseksperimenter ble levert til Kjeøy Research & Education Center, Kjeøy, Norge. De kinetiske testene følger en europeiske veileder for sulfidholdig gruveavfall (CEN/TR 16363, 2012) mens saltvanntestingen følger sjødeponeringsveilederen fra Norsk Bergindustri (Walder, 2014).

Syre-base analysene indikerer at grønnsteinen, som sannsynligvis utgjør hoveddelen av overskuddsmassene, har lavt sulfidinnhold (< 10 t/kt CaCO_3 eq.) (derved et lavt syredannende potensialet) og analysene indikerer at grønnstein har et betydelig høyere syre nøytraliserende potensiale (20-200 t/kt CaCO_3 eq.) enn det syredannende potensialet. Grønnskiferen sammen med svartskiferen er potensielt syredannende hvor det syredannende potensialet er større enn det syrenøytraliserende potensialet i mange av prøvene.

Langtids saltvannsutlekkingsstestingen pågikk i tre måneder, med sirkulerende saltvann levert av VWR Internasjonal (et vann som har lavt metallinnhold). Kolonnene ble først fylt med saltvannet og deretter fylt med bergartsprøver med et vann til bergarts-forholdet på ca 2-3. Bergartsprøvene utgjorde i størrelsesorden 1-3,5 kg. Kolonnene ble prøvetatt 9 ganger over de tre månedene, ofte de første timer og dager, og med mer spredning for de senere prøvene. Alle prøver tatt fra de 9 kolonnene ble sendt til ALS laboratorier, i Oslo for analyser av 21 elementer som inkluderte: arsen, bly, kadmium, kobber, krom, kvikksølv, nikkel og sink.

Krom, bly og kvikksølv var under deteksjonsgrensen, henholdsvis $0,1 \mu\text{g/L}$, $0,3 \mu\text{g/L}$ og $0,002 \mu\text{g/L}$ for så godt som alle vannprøvene, mens kobber hadde flere analyser nære men over deteksjonsgrensen (deteksjonsgrense $0,5 \mu\text{g/L}$). For mange av de andre elementene var det en tydelig utlekking de første timene og dagene med reduserende utlekkingsrate over tid. Etter omtrent 1 måned viser mange elementer liten eller ingen ytterligere utlekking. Sink og kadmium viser et sterkt fall i konsentrasjon etter de første timer og dager. Resultatene tyder på en utlekking som kan deles inn i kortidsutlekking på de første 7 dager, en mellomperiode opptil 1 måned og langtidsperiode hvor utlekkingen går mot null.

Hvis vi tenker oss at 1,795 millioner m^3 fast fjell utgjøres av grønnstein-grønnskifer-svartskifer (total volum av entreprise E2 subtrahert gabbro, granittisk gneis og fylitt: data fra Vegvesenet Region Vest). Basert på at disse bergartene har en egenvekt på rundt 2.800 kg/m^3 (vanlig for basalt er 3.000 kg/m^3 , men omvandling har resultert i et høyere vanninnhold og lavere egenvekt) vil dette gi 5,4 millioner ton masse. Basert på geologiske vurdering antar vi at dette utgjøres av 2,8 mill. ton grønnstein, 2,64 mill. tonn grønnskifer og 0,21 mill. ton svartskifer. Ved bruk av resultatene fra utlekkingsstestene i saltvann, hvor 85% av totalmassene legges i saltvannet; at 30% av massene er finkornete < 20 mm og er de som gir utlekking; kan den årlige utlekkingen beregnes. Korttidsutlekkingen vil for nikkel utgjøre 132 kg/år , mellomperioden vil utgjøre ca 58 kg/år og langtidsutlekkingen vil utgjøre c $3,3 \text{ kg/år}$. Dette tilsvarer en utlekking per døgn på ($0,53 \text{ kg}$). Etter avsluttet utlegging forventes det ikke å være målbart utlekking fra fyllingen. Tabellen nedenfor viser samme beregning

for arsen, kadmium og sink. Kobber, bly og kvikksølv har, basert på disse lekketestene ikke målbar utlekking. Disse beregningene er å betrakte som konservative.

Tidsperiode	Arsen	Kadmium	Nikkel	Sink
kg/7 dager/år (kort)	0,18	1,05	132	15
kg/7 dager-1 mnd/år (mellom)	Ikke målbart	0,27	58	Ikke målbart
kg/ 1 mnd-3 mnd/år (lang)	*0,070	*0,12	3,3	Ikke målbart
Kg totalt 1. år	0,25	1,44	193	15
Kg totalt for 5 år	1,27	7,22	967	76
kg/døgn	0,0007	0,0040	0,53	0,041

Tabell S1. Kalkulert metallutlekket (kg) totalt fra hver av de tre bergartene testet, korttids, langtids, første år og for hele perioden utlegging vil foregå (planlagt a ta fem år) samt daglig utlekking. Etter at deponeringen er avsluttet vil det ikke være signifikant utlekking fra deponiet ifølge utlekkingstestene. Beregningene er basert på 50% legges i saltvann, resten er over havflaten.

De kinetiske testene ble utført ved tilsetning av avionisert vann en gang per uke i kolonner med bergartsprøver tilsvarende saltvannseksperimentene. Vannet ble ukentlig oppsamlet i løpet av 6 timer til 2 dager avhengig av kolonne, og analysert. Temperatur, pH, redokspotensialet, totalt oppløste faste stoffer (TDS) ble målt i prøvene umiddelbart etter at de var tatt. Vannprøvene ble så analysert for alkalinitet, sulfat og klorid ved KREC laboratorier, mens hoved og sporelementanalysene ble utført av ALS laboratoriet i Oslo.

Resultatene fra de kinetiske kolonnene er også blitt brukt til å beregne utlekking på kort og lang sikt. Resultatene viser noe utlekking fra massene for arsen, bly, kadmium, krom og kobber (Tabell S2). Nikkel og sink viser betydelig høyere utlekking enn de andre sporelementene.

UTLEKKING FRA KINETISKE TESTER (FERSKVANN)							
Tidsperiode	Arsen	Bly	Kadmium	Krom	Kobber	Nikkel	Sink
kg/ 7 dager/år (kort)	0,007	0,0021	0,0007	0,0009	0,0048	0,18	0,17
kg/ 51 uker/år (lang)	0,019	0,034	0,034	0,011	0,085	3,17	2,87
Kg totalt 1. år	0,98	0,0024	0,03	0,03	0,09	3,9	3,03
Kg totalt for 5 år	4,9	0,03	0,17	0,15	0,45	19,5	16,2
kg/døgn	0,002	0,00004	0,00009	0,00008	0,00025	0,011	0,008

Tabell S2. Kalkulert metallutlekket (kg) totalt fra de tre bergartene testet som et veiet gjennomsnitt, korttids, langtids for hele perioden av 51 uker ved bruk av gjennomsnittet for uke 10 og 11, første år og for hele perioden utlegging vil foregå (planlagt a ta fem år) samt daglig utlekking. Beregningene er basert på at 15% legges over havflaten.

Arsenutlekkingen er betydelig høyere per kg masser fra de kinetiske testene med avionisert vann for plassering over havflaten sammenlignet med saltvannstesting. Den totale mengde masser som skal plasseres over havflaten er dog betydelig mindre enn det som skal legges i sjøvann. Arsen fra grønskifer utgjør 95% av arsenutlekkingen. Totale mengde nikkel utlekkingen er ca 1/10 lavere for massene plassert over havflaten, mens sink er noe lavere for de kinetiske tester relativt til saltvannstestene. Mer enn 95 % av nikkel og sink kommer dog fra svartskifer i beregningen av langtidsutlekkingen fra de kinetiske testene med ferskvann.

Hvis resultatene fra fast stoff analysene (totalkjemi) sammenlignes med klassifisering av bunnsedimenter og forurenset grunn ifølge Miljødirektoratet veiledere M-608 – 2016 og TA 2553/2009, 2009 viser data at massene vil ligge over normverdien (klasse I) for noen av de potensielt farlige elementene (arsen, kobber, krom og nikkel), men innunder klasse II for alle bortsett fra nikkel. Nikkel er dog ca 40 % bunnet til silikatmineraler og denne andelen av nikkel er derved lite tilgjengelig for utlekking.

Resultatene fra saltvannslaktestene er kalkulert for å kunne sammenlignes med ristetest dvs standard metode og den initial utlekkingen (Tabell S3) med vann til fast stoff forhold på 10. Kalkuleringene er basert på normalisering av resultatene til 1 kg masser i 10 liter vann med 30% finstoff (<20mm). Resultatene er sammenlignet med LS10 grenseverdi for tilstandsklasse III for den initiale utlekkingen (ristetest) og den stabile langtid utlekkingen (oppstrøms kolonnetest) (M-411 - 2015 Miljødirektoratet). Testprogram for tildekkingsmasser, Forurenset sjøbunn, oppdatert pr. august 2017). Resultatene viser at alle tre bergartene er under grenseverdiene for denne tilstandsklassen for både den initiale utlekkingen og for den stabile fasen for et materiale som skal brukes som tildekking av forurensete masser. Det er ikke satt noen spesifikke akseptkriterier for bergartsmateriale som skal brukes for utfylling og det vil derfor på det nåværende tidspunkt være naturlig å se til akseptkriteriene for marine sedimenter og utlekkings kriterier til kystvann.

SALTVANNSUTFYLLING				
ELEMENT	Grønnstein	Grønnskifer	Svartsskifer	L/S10 grense klasse III/II
Arsen As µg/L	0,03 nd	0,033 0,02	0,03 nd	8,5 5
Bly Pb µg/L	nd nd	nd nd	nd nd	14 1,3
Kadmium Cd µg/L	nd 0,003*	0,2 0,05	0,04 0,02	0,45-1,5 0,2
Kobber Cu µg/L	nd nd	nd nd	nd nd	2,6 2,6
Krom Cr µg/L	nd nd	nd nd	nd nd	36 3,6
Kvikksølv Hg µg/L	nd nd	nd nd	nd nd	0,07 0,047
Nikkel Ni µg/L	11 0,3	23 0,45	37 2,7	34 8,6
Sink Zn µg/L	0,7 nd	2,5 nd	1,8 nd	6 3,4

Tabell S3, beregnet utlekking (i mikrogram/kg) fra kortidstesting til stabil langtid utlekking. Beregningene er basert på saltvannskolonnetestene for grovknuste materialet. Siste kolonne gir akseptkriterier for ristetest (initialt utlekking) klasse III og oppstrøms-kolonnetesting (stabilisert utlekking) klasse II etter M-608/2016. *potentielt en effekt av analyseusikkerheter.

KONKLUSJONER

Grønnstein som sannsynligvis utgjør hoveddelen av overskuddsmassene sammen med grønskifer er under kriteriene for overdekkingsmasser i henhold til M-411 - 2015 Miljødirektoratet (Testprogram for tildekkingsmasser, Forurenset sjøbunn, oppdatert pr. august 2017) for alle kritiske elementer inkludert arsen, bly, kadmium, kopper, krom, nikkel og sink. Dette er beregnet fra 3 måneders utlekkingstester av blandingsprøver med bruk av saltvann for et vann til fast stoff (L/S) på 10 for både initial og langtids utlekking.

Nikkel er det elementet som kan skape størst problemer for saltvannsdeponering av overskuddsmassene fra Boknafjordtunnelen i Entreprise E2. Nikkel er over grenseverdier for det som brukes som kriteriet for initial utlekking sammenlignet med bruk av ristetest i henhold til M-411 - 2015 Miljødirektoratet, men for stabilisert utlekking ligger svartskifer under med hensyn på alle elementer inkludert nikkel. Svartskiferen er estimert til å utgjøre kun 2-5% av overskudds massene. Svartskiferen som gir relativt stor oppknusing, har relativt høyt utlekkingspotensiale for nikkel og sink hvis den legges over havflaten hvor det er tilgang på luft og bør derfor håndteres spesielt.

Det er relativt høyt utlekkingspotensiale for arsen fra grønskiferen i oksiderende forhold og grønskifer utgjør 95 % av arsenkilden for samlet utlekking av tunnelmaterialet basert på kinetiske tester med avionisert van. Tilførsel av kalk i grønskiferen hvis det går sur, e.g. skjellsand fra mudring, og eventuelt også bruke mer av grønnstein som siste del av dekke for å redusere lufttilgang for grønskiferen.

INNHALDSFORTEGNELSE

1	INNLEDNING	11
1.1	TIDLIGERE UNDERSØKELSER	12
1.2	HENSIKTEN	13
1.3	METODEVALG FOR UTLEKKINGSTESTING	14
1.4	RAPPORTOPPBYGGING	15
2	BESKRIVELSE AV ANALYSEMETODER	17
2.1	PRØVETAGNING-PREPARERING	17
2.2	KORNSTØRRELSE	18
2.3	TOTAL ELEMENT KONSENTRASJONER	19
2.4	TOTAL ORGANISK KARBON	19
2.5	SYRE-BASE ANALYSER	19
2.6	SEKVENSIELL KJEMISK EKSTRAKSJON	20
2.7	MINERAL ANALYSER	21
2.8	UTLEKKINGSTESTER I SALTVANN	21
2.9	KINETISKE KOLONNETESTER MED AVIONISERT VANN	23
2.10	VANNANALYSER	24
2.10.1	METALLANALYSER I VANN	24
2.10.2	ANION-ANALYSER	25
2.10.3	ALKALINITET	26
3	RESULTATER	27
3.1	FELT/PRØVE-OBSERVASJONER	27
3.1.1	GRØNNSTEIN	27
3.1.2	GRØNNSKIFER	28
3.1.3	SVARTSKIFER	28
3.1.4	KNUSNINGSSONE	29
3.2	KORNSTØRRELSE	29
3.3	TOTALE ELEMENT KONSENTRASJONER	30
3.4	TOTAL ORGANISK OG UORGANISK KARBON (TOC OG TIC)	32
3.5	SYRE-BASE ANALYSER	33
3.6	SEKVENSIELL KJEMISK EKSTRAKSJON	35
3.7	MINERAL ANALYSER	36
3.8	SALTVANNSLAKTESTER	37
3.8.1	GRØNNSTEIN	38
3.8.2	GRØNNSKIFER	39
3.8.3	SVARTSKIFER OG KNUSNINGSSONE	40
3.9	KINETISKE TESTER MED FERSKVANN	41
3.9.1	GRØNNSTEIN	43
3.9.2	GRØNNSKIFER	43
3.9.3	SVARTSKIFER OG KNUSNINGSSONE	44
3.10	MINERALSTABILITETEN / GEOKJEMISK MODELLERING	44
4	RESULTATVURDERING	46
4.1	SALTVANNSUTLEKKING	46
4.2	UTLEKKINGSKILDE	49
4.2.1	SALTVANNSUTLEKKING	49

4.2.2	FERSKVANNSUTLEKKING	51
4.3	KLASSIFISERING I FORHOLD TIL AVFALLSFORSKRIFTEN	51
4.4	UTLEKKINGSNIVÅ I FORHOLD TIL MILJØDIREKTORATETS VEILEDERE, MARINE SEDIMENTER	53
5	KONKLUSJONER	56
5.1	OBSERVASJONER	56
5.2	KLASSIFISERING RELATIVT TIL FORURENSET GRUNN OG BUNNSEDIMENTER	56
5.3	METALLUTLEKKING VED PLASSERING OVER HAVFLATEN	56
5.4	METALLUTLEKKING VED PLASSERING I SJØVANN	57
6	REFERANSER	58

Figurliste

Figur 1.	Geologisk kart	13
Figur 2.	Oppsett for saltvannseksperimenter	21
Figur 3.	Ti saltvannseksperimenter i egen kjøledisk	22
Figur 4.	Oppsett av kinetisk testing med fotografi av kolonner.	23
Figur 5.	Markering av prøvetagningsområder for fire av borehull	27
Figur 6.	Grønnstein med tynne kvarstårer, ca 15 cm lang prøve	28
Figur 7.	Grønnskifer med tynne kvarstårer, ca 15 cm lang prøve	28
Figur 8.	Svartskifer med tynne kvarstårer, ca 15 cm lang prøve	29
Figur 9.	Knusningssone med med klaster og kvarstårer	29
Figur 10.	Kornfordeling	30
Figur 11.	Bergartsanalyser for kvikksølv og arsen for de fire bergarter i tunneltraseen	31
Figur 12.	Bergartsanalyser for kobber og krom for de fire bergarter i tunneltraseen	31
Figur 13.	Bergartsanalyser for nikkell og sink for de fire bergarter i tunneltraseen	31
Figur 14.	Analyser av Total Organisk Karbon	32
Figur 15.	Analyser av Total uorganisk Karbon	33
Figur 16.	Jord-pH analyser for fire bergarter analysert samt samleprøvene.	33
Figur 17.	Syrenøytraliserende (NP) vs. syredannende potensiale (AP)	34
Figur 18.	Vektprosent sulfat-svovel	34
Figur 19.	Kobber fordeling for de blandingsprøvene	35
Figur 20.	Nikkel fordeling for de blandingsprøvene	35
Figur 21.	Sink fordeling for de blandingsprøvene	36
Figur 22.	Svovel og kalsium fordeling for de blandingsprøvene	36
Figur 23.	Fotografier av saltvannskolonnene 1-2 timer etter fylling	36
Figur 24.	Nikkel og kobolt konsentrasjoner for grønnstein i saltvannskolonner	36
Figur 25.	Sink og kadmium konsentrasjoner for grønnstein i saltvannskolonner	39
Figur 26.	Foto av ROG-01 grønnskifer med sulfid oksidering	36
Figur 27.	Ni og kobolt konsentrasjoner i saltvann av grønnskifer	40
Figur 28.	Sink og kadmium konsentrasjoner i saltvann av grønnskifer	40
Figur 29.	Flytende kullpartikler på overflaten i svartskiferkolonnen	40
Figur 30.	Ni og kobolt konsentrasjoner i saltvann av svartskifer og knusningssone.	41
Figur 31.	Sink og kadmium i saltvann av svartskifer og knusningssone	41
Figur 32.	pH i lakvann fra kinetiske tester	42
Figur 33.	TDS i lakvann fra kinetiske tester	43

Figur 34. Alkalinitet i lakvann fra kinetiske tester	43
Figur 35. Arsen og kobber konsentrasjoner fra kinetiske tester for grønnstein.	43
Figur 36. Nikkel og sink konsentrasjoner fra kinetiske tester for grønnstein.	44
Figur 37. Arsen og kobber konsentrasjoner fra kinetiske tester for grønnskifer	43
Figur 38. Nikkel og sink konsentrasjoner fra kinetiske tester for grønnskifer	44
Figur 39. Arsen og kobber konsentrasjoner fra kinetiske tester	44
Figur 40. Nikkel og sink konsentrasjoner	44
Figur 41. Metningsgrad for nikkelfermineraler fra saltvannskolonner	44
Figur 42. Utlakningsrater i for nikkell og kobolt fra saltvannskolonner	45
Figur 43. Utlakningsrater i for cadmium fra saltvannskolonner	
Figur 44. Kalsium vs. strontium fra saltvannskolonnene	50
Figur 45. Nikkel vs. strontium fra saltvannskolonnene	50
Figur 46. Nikkel vs. kobolt fra saltvannskolonnene.	

Tabelliste

Tabell S1. Kalkulert metallutlekket (kg) totalt i saltvann.	5
Tabell S2. Kalkulert metallutlekket (kg) totalt i ferskvann.	5
Tabell S3, beregnet utlekking (i mikrogram/Liter) for klassifisering	6
Tabell 1. Siktstørrelser	18.
Tabell 2. Elementer analysert i fast prøve med deteksjonsgrenser.	19
Tabell 3. Beskrivelse av utlekkingssteg for sekvensielle ekstraksjonsmetoden	20
Tabell 4. Analyserte elementer og deteksjonsgrenser for SKE	21
Tabell 5. Oversikt over prøvenummer bergartstype, saltvannstesting	22
Tabell 6. Oversikt over prøvenummer bergartstype, kinetiske testene.	24
Tabell 7. Analyserte elementer og deteksjonsgrenser for ferskvannsanalyser	25
Tabell 8. Analyserte elementer og deteksjonsgrenser for saltvannsanalyser	25
Tabell 9. Finknust andel	25
Tabell 10. Mineralogiske analyser av samleprøver	37
Tabell 11. Kalkulert metall lekket (kg) totalt fra de tre bergartene	41
Tabell 12. Kalkulert metallutlekket fra ferskvannskolonner	
Tabell 13. Tilstandsklasser for forurenset grunn	52
Tabell 14. Tilstandsklasser for forurenset marine bunnsediment	52
Tabell 15. Totalkonsentrasjon av utvalgte elementer hvor det er satt miljøkrav	53
Tabell 16. Beregnet utlekking fra kortidstesting til stabil langtidsutlekking	54
Tabell 17. Beregnet utlekking fra kortidstesting til stabil langtidsutlekking	55

Vedleggsliste

Vedlegg 1	Prøvetagningsplan
Vedlegg 2	Prøveliste
Vedlegg 3	Bilder-Rogfast kjerne log
Vedlegg 4	Total element analyser, Karbonanalyser, SCE fra SGS
Vedlegg 5	Prøvelogging
Vedlegg 6	ABA analyser fra SGS
Vedlegg 7	SVL vannanalyser
Vedlegg 8	KREC vannanalyser

1 INNLEDNING

SARB Consulting Norge AS har på oppdrag av E39 Rogfast prosjektet, Statens vegvesenets region vest, utarbeidet en miljøgeokjemisk vurdering av tunnelmaterialet som er planlagt brukt til utfyllinger på Kvitsøy (Krossøy og krogøy), Rogaland.

Statens vegvesen region vest er tiltakshaver av tunnel-prosjektet E39 Rogfast og er en viktig brikke i utvikling av E39 Kyststamveg mellom Kristiansand og Trondheim. Prosjektet innebærer kryssing av Boknafjorden og Kvitsøyfjorden nord for Stavanger med undersjøisk tunnel. E39 Rogfast tunnelen er ca 27 km lang to-løps tunnel. Overskuddsmassene fra tunneldriften er planlagt brukt til utfyllinger for å gi arealer for fremtidig bedriftsoppbygging i tre områder, Mekjarvik, Kvitsøy og Årsvågen med innslag koblet til disse tre utfyllingsområdene. Det er i tillegg en ca 4 km lang tunnel fra hovedløpet og opp på Kvitsøy. Tunneldriften fra Kvitsøy, Entreprise E2, utgjør ca 40 % av total tunnel-lengde (tunnel meter 9.000-20.250) hvilket er estimert til å være ca 2.15 mill. m³ fast fjell (informasjon fra Statens vegvesen region vest).

Tunnelene går igjennom granittiske gneiser, fylitt, grønnstein/grønnskifer og gabbro hvor deler av dette tilhører Vistnes gruppen bergarter hvilket er en del av Karmøy ofiolittkomplekset.

Grønnsteinen/grønnskiferen med svartskifer er kjent for å ha sulfid-mineraler og det er flere sulfidmineraliseringer assosiert med dette ofiolittkomplekset. Svovelkis er hoved sulfidmineralet, med kobberkis som det mest interessante med tanke på mineralforekomster (NGU, Saintot, og Solli, 2011).

8-10 kjerneboringer går gjennom eller nære ved den fremtidige tunneltraseen tilknyttet Entreprise E2. Borekjerner fra de dypere delene av boringene dekker vanligvis traseen. Det ble utført fire kjerneboringer i 2016 og en boring i 2011. Disse ble gjennomgått som en del av dette oppdraget for å vurdere muligheten av å ta prøver for langtids laktesting og for å kunne utarbeidet en prøvetagningsplan (Vedlegg 1). Det ble funnet svartskifer i borehullet fra 2011, og det var på basis av dette borehullet første gang beskrevet svartskifer for dette ofiolittkomplekset i forbindelse med denne borekjernen (Saintot, og Solli, 2011). Det er i tillegg også utført noen kjerneboringer i 2003 og 2010 på Sauholmen, Hestholmen og Krågøy.

Kjerner fra de fem førstnevnte boringer ble gjennomgått for å vurdere mineralinnhold, svartskiferinnhold, sulfidinnhold og kalkstein. Svartskifer ble funnet kun i borekjernen fra 2011, men ikke i kjernene fra 2016. Det var et meget lavt sulfidmineralinnhold (aksessorisk innhold), og vanskelig å finne i mange av prøvene som ble sjekket med lupe. Kalkspatganger og kvartssårer var vanlig i alle deler av disse fem borekjernene.

Svartskiferen er meget løs og det er bruddstykker hvor kullinnholdet er høyt. Grønnskiferen

er noe mer kompetent, men faller ifra hverandre langs foliasjonen. Grønnsteine er relativt kompetent hvor lange biter av kjernen er intakt.

Saintot, og Solli (NGU Report 2011.034) har beskrevet geologien i dette området basert på borekjernen fra 2011 og tidligere kartlegging i området. I forlengelse av tunneltrasene sydover, er det betydelige mengder med fyllitt, med høyere innhold av arsen enn normalt for andre bergarter i området. Fyllitten er dog ikke behandlet i denne vurderingen da bergarten vil i liten grad vil påtreffes i E02 (Kvitsøy) entreprisen men vil være en vesentlig del av Entreprise E03 og vil være behandlet i en egen rapport.

1.1 Tidligere undersøkelser

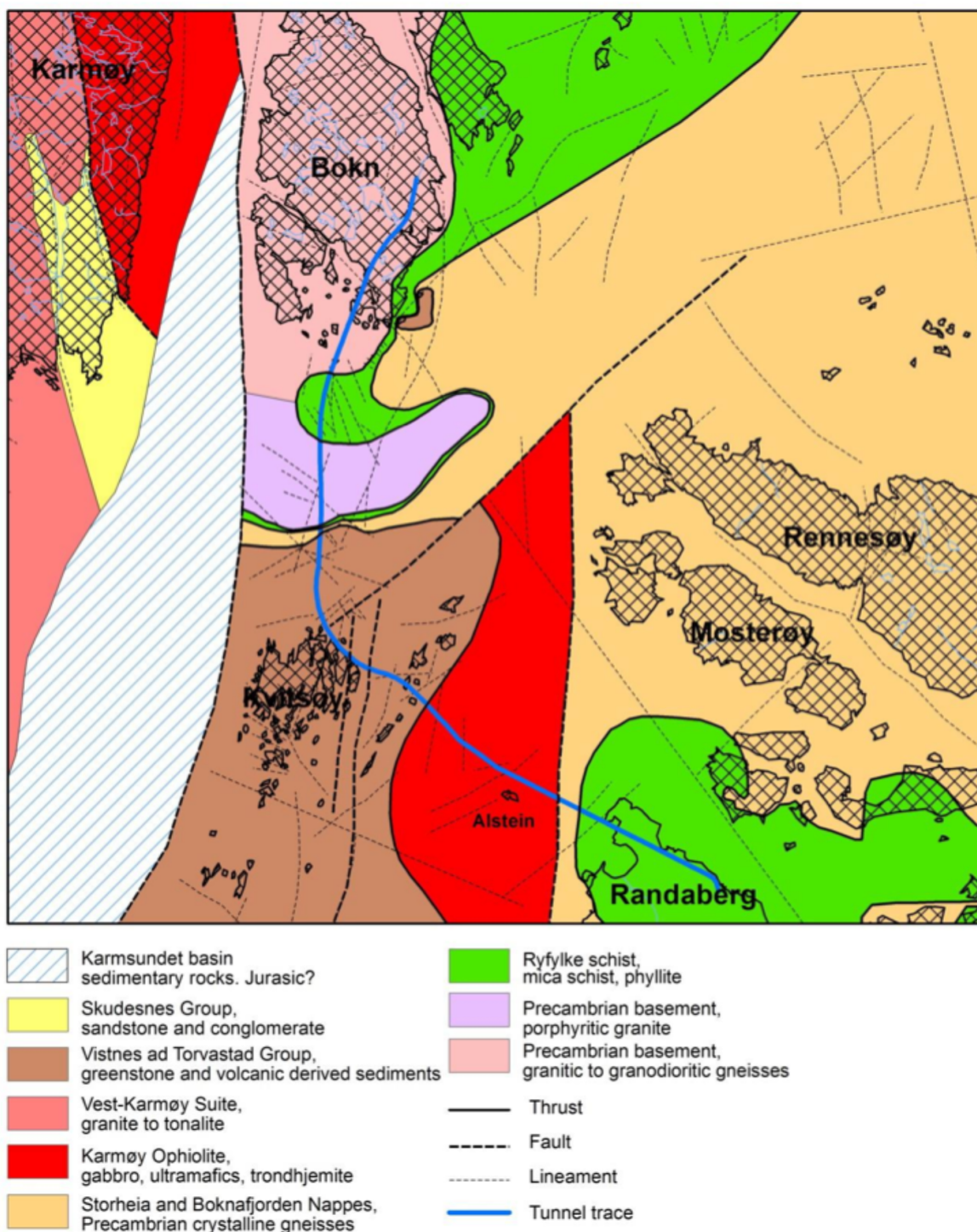
Bergartene som er forventet å påtreffes i tunneltraseen er beskrevet i NGU rapport 2011-034, (Saintot og Solli, 2011) og videre i NGU 2014-054 (Sollie and Nordgulen, 2014). Det er utarbeidet et geologisk kart hvor tunneltrasene hvor E39 Rogfast er markert (Figur 1).

Norconsult utarbeidet i 2017 (*Geologi i tunneltraséen og metallinnhold i bergarten, NO-110-YM, Rogfast – prosjektet*) en første vurdering av miljøgeokjemiske forhold i forbindelse med utfylling av massene på Kvitsøy og denne rapporten er en oppfølging til Norconsults arbeide (*NO-110-YM*). I Norconsults rapport (*NO-110-YM*) ble det tatt prøver fra mange av borekjernene og utført enkle riste tester, totalkjemi analyser og laget en første vurdering av egnethet i henhold til Miljødirektoratets veileder for forurenset grunn og overdekningsveilederen (Miljødirektoratets veileder M-608/2016, Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota M-608 og M-411/2015, M-411 - 2015 Miljødirektoratet. Testprogram for tildekkingsmasser, Forurenset sjøbunn (oppdatert pr. august 2017).

Utfyllingsmassene på Kvitsøy vil hovedsakelig komme fra drivingen av Boknafjord-tunnelen sør-østover mot Randaberg og nordover fra Kvitsøy og tilslagstunnel fra Kvitsøy til hoved tunnel i entreprise E02 (Informasjon Statens Vegvesen region vest). Bergartene utgjøres vesentlig av Karmøy ofiolitten og består av:

- 80 – 90 % av grønnstein, grønskifer/glimmerskifer, svartskifer
- noe gabbro
- noe granitt og kanskje litt fyllitt

Svartskifer er forventet å utgjøre ca 2-5% av tunnelmassene. Utfyllingen av massene fra Entreprise E2 er planlagt ved to områder på Kvitsøy: Krogøy og Krossøy.



Figur 1. Geologisk kart fra NGU 2014-054 hvor tunnel-traséen er med markert med blå strek. Denne rapporten omhandler bergartene nord for Kvitsøy og sydøst fra Kvitsøy i det brune feltet, som utgjøres av Vistnes og Torvastad gruppen som er en del av Karmøy ofiolitten.

1.2 Hensikten

Hensikten med denne geokjemiske vurderingen er som følgende:

- a. Vurdere utlekkingspotensialet fra grønnstein, grønnskifer og svartskifer med tanke på fylling i sjøvann og over havvannflaten hvor fokus er satt på arsen, bly, kadmium, kopper, krom, kvikksølv, nikkel og sink.
- b. Vurdere syre dannende og nøytraliserende potensialet av tunnelmaterialet.

1.3 Metodevalg for Utlekkingstesting

Det er ikke en etablert praksis å gjennomføre geokjemisk karakterisering av utfyllingsmasser i Norge. Det er heller ikke vanlig å utføre geokjemisk karakterisering av bergartsuttak fra tunneler i forbindelse med veibygging. I forbindelse med noen veiprojekter som medførte forurensinger pga dårlig kunnskap om bergartenes geokjemiske egenskaper er det i etterkant utført noe karakterisering (Hagelia og Fjermestad, 2016; Fjermestad m.f., 2017; Pabst m.f., 2015).

Med de store massene som skal tas ut fra Boknafjordtunnelen vil det være naturlig å vurdere disse massene på lik linje med mineralavfall (gråberg og avgang) med hensyn på karakterisering. I henhold til avfallsforskriften Paragraf 17 må det utarbeides en avfallshåndteringsplan for gruveavfall. I forbindelse med masseuttakene fra Boknafjordtunnelen vil en håndteringsplan være å bruke materialet til utfylling. Det er derfor naturlig å se til avfallsforskriften paragraf 17 som omhandler mineralavfall.

Utdrag av avfallsforskriften (FOR 2004-06-01 nr 930), fra Vedlegg II til Paragraf 17, karakterisering:

e) en beskrivelse av de kjemiske og mineralogiske egenskapene ved mineralavfallet, inkludert eventuelle rester av tilsetningsstoffer, og en beskrivelse av forventet utlekkingskjemi, som funksjon av tiden, for hver mineralavfallstype som tar hensyn til planlagt håndtering. Beskrivelsen av utlekkingskjemien skal omfatte:

- 1. en evaluering av utlekkingen av metaller, oxyanioner og salter over tid ved hjelp av en test som beskriver utlekkingens pH- avhengighet, og/eller en kolonnetest og/eller en utlekkingstest som tar hensyn til tidsaspektet eller andre passende testmetoder. Testkravet gjelder ikke for inert avfall.*
- 2. for mineralavfall som inneholder mer enn 0,1 prosent svovel på sulfidform: informasjon om fare for dannelse av surt dremsvann og lekkasje av metaller over tid ved hjelp av statiske eller kinetiske tester.*

Det er utviklet egne standarder for statisk testing for å vurdere bergarters potensiale for å danne syre fra sulfidmineraler og nøytraliserende syre ved karbonatmineraler. Disse testene tar ikke tidsaspektet i betraktning. Hvis syrenøytraliserende potensialet relativt til syredannende potensialet er under 3 skal det utføres langtids kinetiske tester.

Det er utarbeidet europeiske veiledere for vurdering av syredannende potensialet og for langtids kinetiske tester (reaksjonshastighets), henholdsvis EN 15875 (2010) og CEN/TR 16363 (2012) for mineralavfall. Norsk gruveindustri har i tillegg utarbeidet en egen veileder for karakterisering av avfall og deponiområdet i forbindelse med saltvanns deponering av

gruveavfall, denne fjorddeponeringsveilederen beskriver metoder for bruk ved langtidsutlekkings tester (Walder, 2014).

De foreslåtte metoder for laktesting ifølge Miljødirektoratets Veileder M-411/2015 Testprogram for tildekkingsmasser, heretter benevnt M-411/2015 er en oppstrøms kolonnetest (EN14405) og ristetest (EN12457-3). Det anbefales i M-411/2015 at disse testene er modifisert ved at det brukes saltvann istedenfor avionisert vann. Disse testene er dog lite egnet for grovt materiale som sprengmasser og er heller ikke anbefalt i veilederne for gruveavfallskaraktisering, CEN/TR 16376 (2012). Hvis det er sulfider inkludert i bergartene vil de ikke avgi (lekke ut) representativt mengde metaller under korte tester som ristetesten enten det brukes 1:1 eller 10:1 L/S forhold eller om det kjøres en oppstrøms kolonne-test over lang tid. Oppstrøms kolonnetesten tar ikke i betraktning at sulfidoksidering trenger tilgang på oksygen, og resultater av disse testene vil derfor ikke være representativ for overflatenært bergartsmateriale. Langtids kinetiske tester i henhold til CEN/TR 16376 (2012) (som kan vare fra 3-4 måneder til mer enn et år avhengig av bergartene) er derfor mer egnet for evaluering av langtids-utlekkning fra sulfidholdige bergartsmateriale.

Disse veilederne, M-411/2015, EN14405, EN12457-3, og CEN/TR 16376/2012 beskriver metodene som kan brukes, men omhandler ikke akseptkriterier eller klassifisering basert på utlekkingskonsentrasjoner eller utlekkingshastigheter. Det er derfor naturlig å koble resultatene av disse testene til de norske klassifiseringsdokumentene, spesielt Miljødirektoratets veileder M-608/2016, Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota M-608.

1.4 Rapportoppbygging

Kapittel 2 beskriver bakgrunnsinformasjon og hensikten med rapporten. Da det er lite studier utført for i forbindelse med bergartskaraktisering for veitunnel og påfølgende utfyllinger er det også en diskusjon om metodevalg i dette kapitlet.

Kapittel 3 beskriver metodene brukt i dette studie, med en fokus på metoder som ikke er vanlig brukt Norge.

Kapittel 4 beskriver observasjoner av feltarbeidet, logging, og fremlegger resultatene av de forskjellige testene og analysene som er gjennomført ved flere forskjellige laboratorier. Analysedata som ikke spesifikt brukes i denne vurderingen men er en del av analysepakken er inkludert i vedlegg 7.

Kapittel 5 diskuterer og tolker data, setter det i sammenheng med akseptkriterier, utlagningsrater, og klassifisering. Kapitlet inneholder også en diskusjon om bruk av akseptkriterier i forhold til laktester som brukes av gruveindustrien for karakterisering av langtids utlekkning.

Kapittel 6 trekker konklusjoner fra de forskjellige temaer som er beskrevet i resultat kapitlet og diskusjonskapitlet.

2 BESKRIVELSE AV ANALYSEMETODER

Dette kapitlet beskriver de analysemetoder som er brukt i dette studiet. Alle prøvene ble logget og fotografert før de ble knust og splittet for diverse analyser. Analysemetoder som ble brukt i dette studiet bygger opp under behovet for den generelle karakteriseringen av bergartsmaterialet basert på anbefalinger i veilederne M411/2016 og CEN/TR-16376/2012 som skal brukes til utfylling, samt spesifikke metoder for vurdering av utlekking. De generelle karakteriseringsmetodene brukes også til dels for å tolke resultatene av utlekkingstestene. Metodene er som følger:

- Analyser av kornstørrelse-fordeling av knust materiale ved sikting (kapitel 3.2)
- Total sporelementkjemi for vurdering av totalinnhold av potensielt farlige metaller (kapitel 3.3)
- Total uorganisk og organisk karbon ved Leco-metoden (kapitel 3.4)
- Total syreproduserende og syrenøytraliserende potensial for sulfidholdige bergarter (kapitel 3.5)
- Sekvensiell kjemisk ekstraksjon for vurdering element spesiering og elementenes mineraltilhørighet (kapitel 3.6)
- Mineralogi ved bruk av X-Ray Diffraksjon (kapitel 3.7)
- Saltvanns utlekkingstester for plassering av bergartsmateriale under havflaten (kapitel 3.8)
- Ferskvanns kinetiske tester for utlekking av materialet plassert over havflaten (kapitel 3.9)
- Vannanalyser av prøver fra de utlekkingstestene for å måle konsentrasjoner av hoved og sporelementer (kapitel 3.10)

Disse analysemetodene er beskrevet i de påfølgende avsnitt.

2.1 Prøvetagning-preparering

Det ble tatt 62 prøver fra borekjernene for dette prosjektet som går relativt nære eller skjærer gjennom den fremtidige tunnelen (Vedlegg 2). Alle borekjerne-kasser i de intervallene som var antatt nære eller skar gjennom den planlagte tunnelen, ble vurdert for prøveuttak. Det ble tatt 2-3 prøver fra hver kasse, og hver av prøvene var ca 10-30 cm borekjerne. Alle prøvepunkter ble markert i kassene med tre-klosser. Borekjernene ble vurdert for bergartstype (grønnstein, grønnskifer, svartskifer, og fyllitt) før prøveutvelgelse for å sikre en spredning av prøvemateriale. Prøvene ble sendt til Kjeøy Research & Education Center laboratoriet og logget og fotografert (Vedlegg 3).

Hver prøve ble beskrevet basert på mineralogi og strukturer. Utfra dette ble bergartstype definert for hver prøve. Denne beskrivelse ble igjen brukt som utgangspunkt for å lage samleprøver av hver bergartstype.

Etter loggingen ble prøvene knust i en kjefteknuser ved det Fysikalske laboratoriet ved LKAB, Kiruna Sverige. På grunn av skifriheten av bergartene ble åpningen satt til 15 mm istedenfor 20 mm.

De knuste prøvene ble splittet i fire hvorav to splitt ble veiet og fordelt i fem forskjellige blandeprøver. De andre delprøvene ble lagt i to poser, hvorav en prøvepose ble lagt på lager og en prøvepose ble sent for kjemiske analyser.

Følgende borehull ble vurdert hvor de to siste borehull ikke ble prøvetatt.

- Sauholmen BH-02-10, kjerne SB: boringsmeter 750-850 m grønnstein
- Hestholmen BH-01-10B, kjerne: boringsmeter 500-750 grønnstein
- BH03-2011: boringsmeter 291-330, Svartskifer og grønnskifer (grønnstein)
- BH02-2016: boringsmeter 245-260, grønnstein, grønnskifer
- BH03-2016: boringsmeter 250-275, grønnstein (grønnskifer)
- BH04-2016: boringsmeter 250-275, grønnstein
- BH05-2016, boringsmeter 150-170 m fyllitt
- BH01-2016: ikke dypt nok borehull, ender ca 50 meter over planlagt tunnel
- Krogøy Kjerne ikke nær tunnel

Borehull BH04-16 og BH03-16 er satt med kort avstand imellom (ca 50 m).

Kjerneboringene som er tilgjengelig for denne vurderingen er representere den totale mengde bergarter relativt dårlig da de fleste boringer er samlet rundt Kvitsøy delen av tunnelen da dette har vært et utgangspunkt for boring.

2.2 Kornstørrelse

Kornstørrelse fordeling ble utført på en splitt av prøvene som er knust og brukt i kolonnene (saltvann og ferskvann) i Jordlaboratoriet ved New Mexico Tech, Socorro, NM, USA ved bruk av tørrsiktning. Det ble brukt syv sikter (Tabell 1) hvor vekt ble målt for materialet som passerte hver sikt.

SIKT no. US	Diameter åpning µm
3/4	19050
4	4750
10	1999
20	841
40	419
100	150
200	74

Tabell 1. Siktstørrelser brukt for kornfordelingsanalyser; åpning i mikrometer.

2.3 Total element konsentrasjoner

Totalkjemiske analyser er utført på 62 prøver ved bruk av syreopløsning (4 syre oppløsning: salpetersyre, flussyre, perklorisyre og saltsyre), etterfulgt av ICP-OES analyse ved SGS laboratorier i Lakefield, Ontario, Canada. Denne metoden løser de fleste mineraler, men noen meget tungt løselige oksid mineraler vil ha dårlig oppløsning. Noen elementer fordampes i den sterke syren og må analyseres på en annen måte. I denne prøveserien er arsen og kvikksølv utsatt for fordampning. Arsen blir derfor analysert ved hjelp av smelting og X-Ray Fluorescens (XRF), mens kvikksølv analyseres ved bruk av atomabsorpsjon. Deteksjonsgrenser er gitt i tabell 2.

Element	Detek.	Enhet	Element	Detek.	Enhet	Element	Detek.	Enhet
As	0.001	%	Fe	0.01	%	Sc	5	ppm
Hg	0.005	ppm	K	0.1	%	Sn	50	ppm
Al	0.01	%	La	10	ppm	Sr	10	ppm
As	30	ppm	Li	10	ppm	Ti	0.01	%
Ba	10	ppm	Mg	0.01	%	V	10	ppm
Be	5	ppm	Mn	10	ppm	W	50	ppm
Ca	0.1	%	Mo	10	ppm	Y	5	ppm
Cd	10	ppm	Ni	10	ppm	Zn	10	ppm
Co	10	ppm	P	0.01	%	C	0.01	%
Cr	10	ppm	Pb	20	ppm			
Cu	10	ppm	Sb	50	ppm			

Tabell 2. Elementer analysert i fast prøve med deteksjonsgrenser.

2.4 Total Organisk Karbon

21 av prøvene ble tatt ut for organisk karbon analyser (vedlegg 4). Analysene utføres ved oppvarming og forbrenning av karbonholdige mineraler (dannelse av CO₂) og analyse av CO₂ gassen utført av SGS Laboratorier, Lakefield, Ontario, Canada. En LECO forbrenner og analyse system brukes for dette for to splitt prøver (splittet av SGS Laboratorie), hvor en prøve analyseres direkte, mens den andre splitt prøven blir først laket med sterk svovelsyre for å fjerne karbonat mineraler. Total uorganisk karbon er da forskjellen mellom de to analyserte prøvene.

2.5 Syre-Base analyser

Alle bergartsprøvene samt fire samleprøver (totalt 59 prøver) som er brukt i kolonnene ble analysert for syredannende potensialet (AP) og syrenøytraliserende potensial (NP) og følger standard for utvidet Sobek metoden (Lawrence og Wang, 1998). Dette er den mest vanlige metoden brukt i gruveindustrien. Metoden er basert på at lettløselig sulfatmineraler løses opp i saltsyre, så oppløses sulfidmineraler i salpetersyre. Det syredannende potensialet (AP) er basert på sulfidinnhold hvor syredannelse kommer fra svovelkis (pyritt) når denne oksideres. Bergarten analyseres før syretilsetting, etter hver av syretilsettingene ved bruke av tre delprøver, ved forbrenning og analyse av SO₂ gass etter forbrenning. Dette gir total svovel, sulfat-svovel, sulfidsvovel og ikke-reaktiv svovel. Sulfidsvovel pluss ikke-reaktiv svovel multipliseres med 31.25 og gir syredannende potensialet uttrykt ved hvor mye

kalsiumkarbonat som må tilsettes for å nøytralisere den potensielt dannede syren ton CaCO_3 per 1000 ton bergart.

Syrenøytraliserende potensial analyseres ved å tilsette en kjent mengde saltsyre til prøven så la den sitte i 24 timer. Deretter titrere lakvannet med en base for å bestemme hvor mye av syren som ble brukt opp. Forbrukt syre antas å være fra kalkspattopløsning (CaCO_3) og uttrykkes ved ton CaCO_3 per 1000 tonn bergart. På denne måten er både AP og NP uttrykket ved samme enhetssystem.

Hvis bergarten har mer enn tre ganger så mye NP i forhold til AP regnes materialet for å ikke være syredannende. Hvis forholdstallet er mindre 3 skal kinetiske tester utføres i følge gruveavfallsdirektive (EU Mine Waste Directive, 2006) og beskrevet i mer detaljer i veilederen CEN/TR-16363 (2012).

Som en del av disse ABA-analysene utføres det også en jord pH analyse. Jord-pH utføres ved at 50 gram prøve tilsettes 100 ml avionisert vann. Det røres rundt straks etter vann er tilsatt prøven etter 15 minutter og etter 30 minutter. Deretter analyseres pH i vannet. Dette gir en vurdering av om det finnes raskt syredannende mineraler i prøvematerialet.

2.6 Sekvensiell Kjemisk Ekstraksjon

For å kunne vurdere elementtilhørigheten ble sekvensiell kjemisk ekstraksjon (SCE) utført på samleprøvene før utlekkingsstestene. Analysene er utført av SGS Laboratorier, Lakefield Ontario, Canada. Disse testene følger en syv stegs ekstraksjonsmetode etter Dold (2003). En finmalt prøve på ca 2 gram blir utsatt for stegvis sterkere utlekkingsvæske. Disse syv stegene er som følger (Tabell 3):

SEKVENSIELL KJEMISK EKSTRAKSJON		
SEKVENNS	LØSNING	MINERAL OPPLØSNING
Steg 1	Avionisert vann	Vannløselige mineraler, gips, salter
Steg 2	Ammonium acetat	Ab/adsorberte elementer med leirmineraler; kalkspatt
Steg 3	Oxalic syre, romtemperatur	Sekundære jernhydroksider, manganoksider
Steg 4	Oxalic syre, 80 dC	Tungt løselige jernoksider, magnetitt, hematitt etc.
Steg 5	Hydrogen peroksid	Organiske faser; sekundære kobbermineraler
Steg 6	KClO_3 , HNO_3 , HCl	Sulfidmineraler; lettløselige silikatmineral (olivin)
Steg 7	HNO_3 , HF , HClO_4	Restfaser, silikatmineraler

Tabell 3. Beskrivelse av utlekkingssteg for sekvensielle ekstraksjonsmetoden

Fire samleprøver er analysert ved bruk av SCE metoden. SCE analysene er utført av SGS Laboratorier, Lakefield Ontario, Canada, og lakvannet ble analysert ved bruk av ICP-OES. Analyserte elementer og deteksjonsgrenser er gitt i tabell 4.

Element	Detek.	Element	Detek.	Element	Detek.	Element	Detek.
Ag mg/kg	2	Cr mg/kg	1	Na wt.%	0.01	Ti	0.01
Al wt.%	0.01	Cu mg/kg	0.5	Ni mg/kg	1	V mg/kg	2
As mg/kg	3	Fe wt.%	0.01	P wt.%	0.01	W mg/kg	10
Ba mg/kg	1	K wt.%	0.01	Pb mg/kg	2	Y mg/kg	0.5
Be mg/kg	0.5	La mg/kg	0.5	S wt.%	0.01	Zn mg/kg	1
Bi mg/kg	5	Li mg/kg	1	Sb mg/kg	5	Zr mg/kg	0.5
Ca wt.%	0.01	Mg wt.%	0.01	Sc mg/kg	0.5	B mg/kg	10
Cd mg/kg	1	Mn mg/kg	2	Sn mg/kg	10	Hg mg/kg	1
Co mg/kg	1	Mo mg/kg	1	Sr mg/kg	0.5		

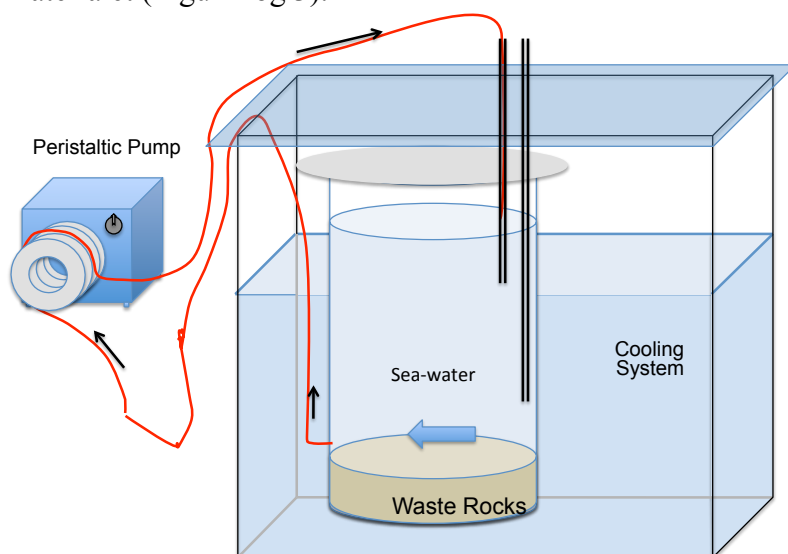
Tabell 4. Analyserte elementer og deteksjonsgrenser for sekvensiell kjemiske ekstraksjonsanalyser.

2.7 Mineral analyser

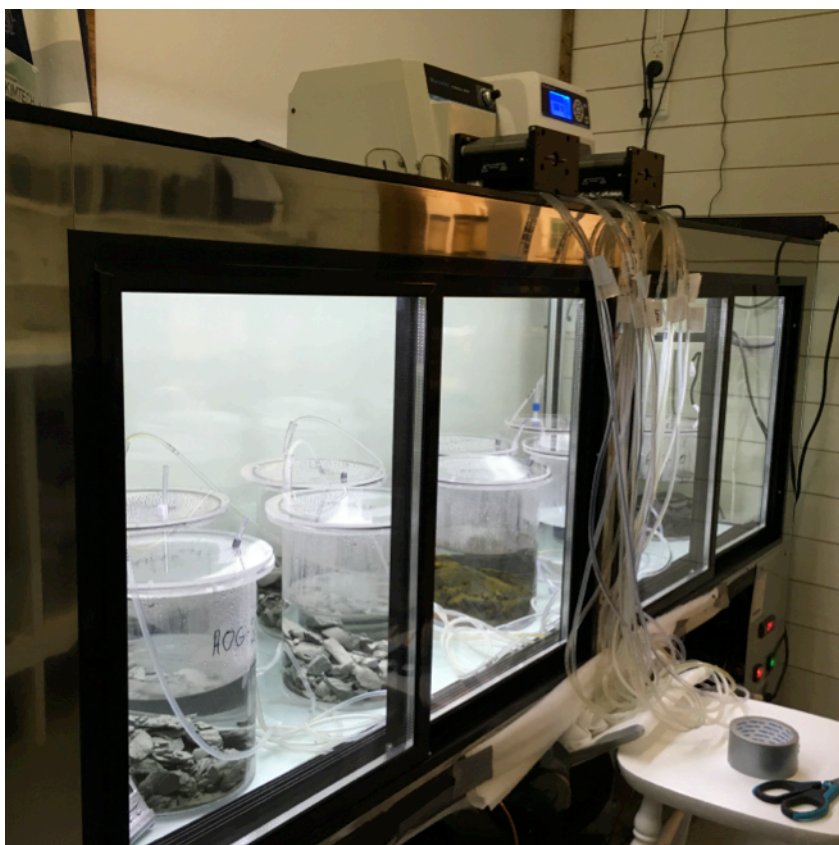
Mineralogien ble bestemt ved XRD ved NM Bureau of Geology and Mineral Resources, New Mexico Tech, Socorro, New Mexico, USA på en liten delprøve ble tatt ut for hver av de syv samleprøvene som ble brukt i kornfordelingsanalysene. Prøvene ble deretter malt i morter før analysene ble utført. Deteksjonsgrensen er på 2-5 wt.%, hvilket tilsier at sulfidmineraler ikke detekteres ved denne metoden.

2.8 Utlekkingstester i Saltvann

Saltvannslaktesting består av kolonner som tilsettes saltvann (produsert av VWR International). Prøver blir tømt inn i saltvannet. Etter ca. 2 timer når det meste av finpartiklene har satt seg, starter resirkulering av saltvannet via en peristaltisk pumpe med en pumpehastighet på 30 ml/min. Dette resulterer i en strøm av saltvann over det knuste materialet (Figur 2 og 3).



Figur 2. Oppsett for saltvannseksperimenter



Figur 3. Ti saltvannseksperimenter i egen kjøledisk

Kolonnene inneholder 3-4 L vann og 0.9-3.5 kg prøvemateriale (Tabell 5). Rogfasteksperimentene ble utført i et eget rom for å redusere muligheten for forurensing fra annen aktivitet i laboratoriet. Vannet holdes kjølig i 5-7 °C i en egen kjøledisk. For å unngå forurensinger har kolonnene et lokk men med lufttilgang.

SALTVANNSKOLONNER			
PRØVE	BERGART	VEKT (gr)	VANNMENGDE (L)
ROG-01	Grønnskifer	2987	4
ROG-02	Grønnskifer	3544	4
ROG-03	Grønnstein	1958	3
ROG-04	Grønnstein	1822	3
ROG-05	Grønnstein	2167	3
ROG-06	Knusningssone	1809	3
ROG-07	Svartskifer	925	3

Tabell 5. Oversikt over prøvenummer bergartstype vekt av bergartene i saltvannskolonnene og startvolum av saltvann.

Det tas ut 30 ml vannprøve fra et eget prøvepunkt, hver gang det prøvetas. Prøvetagningen var med få timers mellomrom den første dagen og deretter utvidet tid mellom hver prøve. Eksperimentene ble kjørt i ca 90 dager med totalt 9 vannprøver fra hver kolonne.

Rent saltvann tilsvarende mengde uttatt vannprøve ble tilsatt eksperimentene etter hver prøvetagningen. Prøvetagningen ble gjort hyppig den første dagen med tre prøvetagninger,

og med mer tidsrom for de senere prøvetagningene. Etter 2 måned ble det tatt ut noe større mengde vann (0.5L) for å unngå at mineraler ville felles ut pga overmetning.

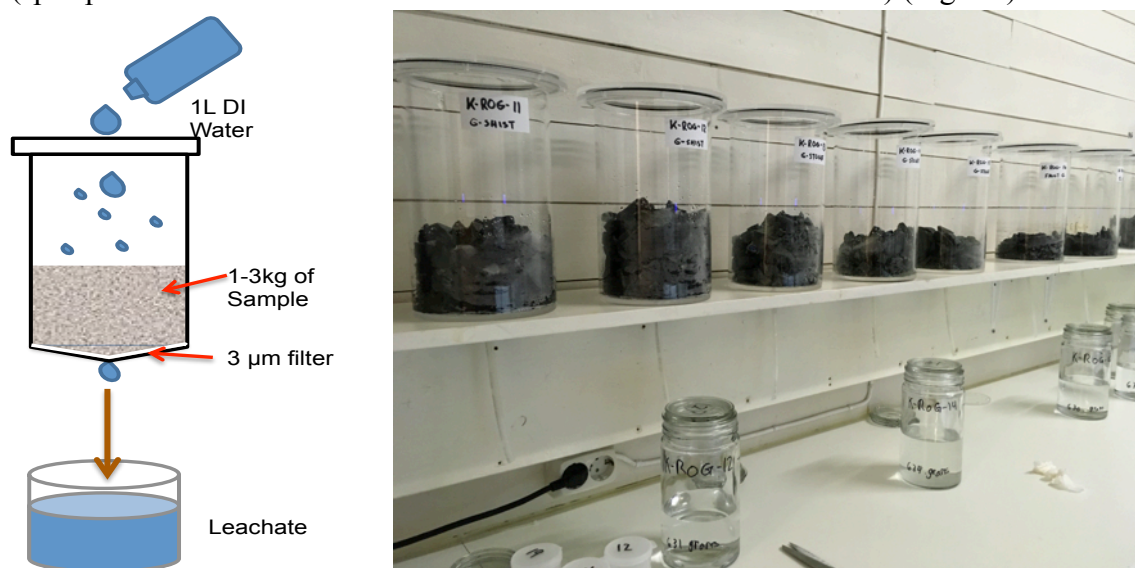
En kolonne ble kjørt med kun saltvann og prøvetatt fire ganger for å vurdere mulige forurensinger av eksperimentene.

Lakvannet ble tatt ut ved hjelp av en sprøyte som var forhåndsvasket i avionisert vann og salpetersyre. Et engangsfilter med 0.2 µm ble brukt for alle prøvene. Deretter ble prøvene satt på kjølerom inntil utsendelse til ALS laboratoriet i Oslo for ICP analyser.

Saltvannet i kolonnene ble analysert for temperatur, pH, salinitet, konduktivitet, totalt oppløst fast stoff (TDS) redox potensialet (Eh) og temperatur stort sett hver gang det ble tatt en prøve etter de første to uker av eksperimentene for å sjekke stabiliteten og buffringsevnen til saltvannet.

2.9 Kinetiske Kolonnetester med Avionisert Vann

For å kunne evaluere potensiell utlekking fra tunnelmaterialet som blir liggende over havflaten ble det satt opp kinetiske tester med avionisert vann. De kinetiske testene er spesielt egnede for sulfidholdig gruveavfall og følger veilederen CEN/TR 16363. Kolonnene som er 30 cm høye med diameter på 12.5 cm, ble fylt med 1-3 kg bergartsmaterialet (splittprøve av samme materiale som ble brukt i saltvannskolonnene) (Figur 4).



Figur 4. Oppsett av kinetisk testing med fotografi av kolonner.

Kolonnene ble tilsatt 1 liter avionisert vann en gang hver syvende dag. Vanntilsetningen ble gjort over en periode av ca 3 timer hvor 1/3 av 0.5 L ble tilsatt tre ganger med ca 10 minutter mellomrom. Dette ble gjentatt to timer etter første tilsetning av vannet. Tilsetningen av vannet ble utført med en sprutflaske for å spre vannet mest mulig på alle overflater. Ni kolonner ble satt opp (Figur 5, Tabell 6).

Lakvannet som drenerer fra kolonnene, ble analysert for temperatur, elektrisk konduktivitet, pH, Eh, temperatur, umiddelbart etter prøvetagning. Vannprøvene ble så filtrert med bruk av 0.2 µm “cellulose acetate” membran for deretter å bli analysert for alkalinitet.

FERSKVANN KINETISKE TESTER		
PRØVE	BERGART	VEKT (gr)
ROG-11	Grønnskifer	1939
ROG-12	Grønnskifer	2182
ROG-13	Grønnstein	1847
ROG-14	Grønnstein	1636
ROG-15	Grønnstein	1442
ROG-16	Knusningssone	1280
ROG-17	Svartskifer	940

Tabell 6. Oversikt over prøvenummer bergartstype vekt av bergartene i de kinetiske testene.

Filtrerte prøver ble splittet i to hvorav en splitt ble syresatt med konsentrert (65%) salpeter syre i forhold 1:100. Begge prøver ble lagt i kjølerom. Syresatte prøver ble sendt til ALS for metallanalyser ved bruk av ICP-AES, mens delprøve hvor det ikke var tilsatt syre ble analysert for alkalinitet og anioner ved laboratoriet til KREC. Alkalinitetsanalysene ble utført samme dag som prøvetagningen.

2.10 Vannanalyser

Tre forskjellige analysemetoder ble brukt for å bestemme innholdet av komponenter i vannprøvene.

- ICP- “Inductively coupled plasma” for hoved- og sporelement-analyser
- IC - Ione-kromatografi for anjoner
- Syre-titrering for alkalinitet

Disse metodene er kort beskrevet i de følgende avsnitt.

2.10.1 Metallanalyser i vann

Sporelementer ble analysert på syre-tilsatte prøver med bruk av konsentrert ultra-ren salpetersyre forhold prøve/syre = 100. Prøvene ble sendt til ALS i Oslo og loggført der og videresendt til analyselaboratoriet ved ALS i Luleå, Sverige. Analysepakken sum er brukt er for saltvann V-5 for 20 metaller og er utviklet for saltvann med mellom 1.2 og 3.5 vekt % salter (saltvann har ca 3.2-3.4 vekt % salter). Analysene for ferskvann følger V-2 metall for 22 metaller i ferskvann og V-5 Metall for 20 metaller i saltvann. Det er noe høyere deteksjonsgrense for analysene i saltvann enn for ferskvann (Tabell 7 og 8).

Det beregnes en usikkerhet for hvert element for hver analyse som er basert på tre repetisjonsanalyser for hvert analyse. Usikkerheten ligger på ca 10-20% med høyere usikkerhet nære deteksjonsgrensen.

Analysene utføres i henhold til europeiske standarder: ICP-SFMS iht ISO 17294-1,2; ICP-AES iht ISO 11885; og Hg iht ISO 17852. Analysene av saltvann gir noe høyere deteksjonsgrense for mange av metallene i forhold til ferskvannsanalysene (deteksjonsgrenser er i vedleggene med ALS analysedata).

FERSKVANN

Element	Detek.	Element	Detek.
Al, aluminium	0.2 µg/l	Mg, magnesium	90 µg/l
As, arsen	0.05 µg/l	Mn, mangan	0.03 µg/l
Ba, barium	0.01 µg/l	Mo, molybden	0.05 µg/l
Ca, kalsium	100 µg/l	Na, natrium	10 µg/l
Cd, kadmium	0.002 µg/l	Ni, nikkel	0.05 µg/l
Co, kobolt	0.005 µg/l	P, fosfor	1 µg/l
Cr, krom	0.01 µg/l	Pb, bly	0.01 µg/l
Cu, kobber	0.1 µg/l	Si, silisium	30 µg/l
Fe, jern	0.4 µg/l	Sr, strontium	2 µg/l
Hg, kvikksølv	0.002 µg/l	Zn, sink	0.2 µg/l
K, kalium	400 µg/l	V, vanadium	0.005 µg/l

Tabell 7. Elementer og deteksjonsgrenser for ferskvannsanalysene. Usikkerheten ligger på 10-20 % høyere usikkerhet når konsentrasjonene nærmer seg deteksjonsgrensen.

SALTVANN

Element	Detek.	Element	Detek.
Al, aluminium	0.7 µg/l	K, kalium	500 µg/l
As, arsen	0.5 µg/l	Mg, magnesium	90 µg/l
Ba, barium	0.1 µg/l	Mn, mangan	0.1 µg/l
Ca, kalsium	200 µg/l	Mo, molybden	0.1 µg/l
Cd, kadmium 1	0.05 µg/l	Na, natrium	120 µg/l
Co, kobolt	0.05 µg/l	Ni, nikkel	0.5 µg/l
Cr, krom	0.1 µg/l	P, fosfor	40 µg/l
Cu, kobber	0.5 µg/l	Pb, bly	0.3 µg/l
Fe, jern	4 µg/l	Si, silisium	200 µg/l
Hg, kvikksølv	0.002 µg/l	Sr, strontium	50 µg/l

Tabell 8. Elementer og deteksjonsgrenser for saltvannsanalysene. Usikkerheten ligger på 10-20 % høyere usikkerhet når konsentrasjonene nærmer seg deteksjonsgrensen.

2.10.2 Anion-analyser

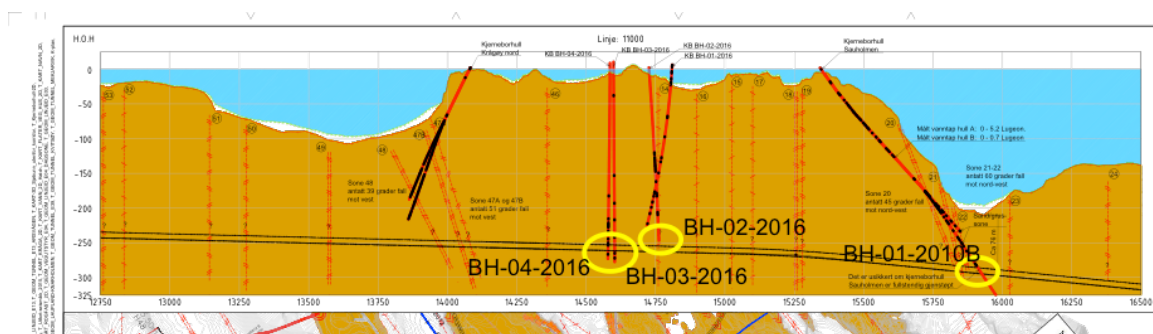
Anioner ble analysert ved KREC laboratoriet ved bruk av ione-kromatograf (IC) Metrohm 760 og ASUP-5, 150 mm kolonne. Det ble analysert for fluorid, nitrat, fosfat, og sulfat. Kun klorid og sulfat var over deteksjonsgrensen på ca 0.1-0.2 mg/L.

2.10.3 Alkalinitet

Alkalinitet ble bestemt ved KREC laboratoriet ved bruk av Metrohm Titrando. 40 mL filtrert prøve ble titrert med 0.001 mol HCl til pH 5.4 og 4.5 ved bruk av kontinuerlig automatisk pH måling. Alkaliniteten, et mål på karbonatmengden i vannet, er gitt i mille-mol/L.

3 RESULTATER

Det ble tatt 62 prøver fra syv kjerneboringer (Vedlegg 2) hvor prøver ble tatt nærmest mulig den planlagte tunneltraseen (Figur 5). Noen av boringene var nære men ikke i traseen men ble allikevel prøvetatt for å kunne få prøver fordelt i en større del av traseen.



Figur 5. Markering av prøvetagningsområder for fire av borehullene.

De følgende avsnitt beskriver resultatene av analysene som er utført.

3.1 Felt/prøve-observasjoner

Alle kjerneprøvene ble logget og fotografert. Mindre mengder av finkornete sulfidmineraler ble observert i de fleste prøvene. Det ble observert årer av kvarts og kalkspatt. De fire bergartstypene som ble prøvetatt i forbindelse med dette studiet er beskrevet i de følgende avsnitt og alle prøvebeskrivelser finnes i Vedlegg 5.

3.1.1 Grønnstein

26 grønnsteinsprøver ble tatt fra flere borekjerner. En samleprøve fra borehull BH-04-16 ble splittet i to, ROG-05S og ROG-15K, for laktesting. En samleprøve ble laget av de andre prøvene fra BH-02-16 og BH-03-16 og splittet i fire for S-ROG-03, S-ROG-04, K-ROG-13 og K-ROG-014.

Grønnsteinen er foliert, med aktinolit som hoved mineral. Mørke leirmineraler er fremtredende sammen med årer av kvarts som krysser foliasjonen (Figur 6). Aksessoriske mengder av svovelkis ble observert i de fleste prøvene.



Figur 6. Grønnstein med tynne kvarstårer, ca 15 cm lang prøve.

Grønnsteinen er relativt kompetent men ved knusning ble det mye oppdeling etter foliasjonsplan dog i mindre grad enn for grønnskiferen.

3.1.2 Grønnskifer

Grønnskifer er representert ved ni prøver fra BH-03-11, en prøve fra BH-02-2011B, og 15 prøver fra BH-01-10B og er utgangspunktet til materialet for S-ROG-1, S-ROG-2, K-ROG-11 og K-ROG-12. Grønnskiferen viser sterk foliering med små folder. Grønnskiferen har grå-grønn farge pga stort innhold av kloritt og sammen med de mørke leirmineraler utgjør disse hoveddelen av bergarten. Det er tynne kvartsårer (Figur 7) som krysser foliasjonen og viser små folder. Aksessorisk innhold av pyritt ble observert (0.5-1.5 vol.%).

Nedknusning ved bruk av kjefteknuser resulterte i oppdeling etter foliasjonen og dermed mange tynne skiver.

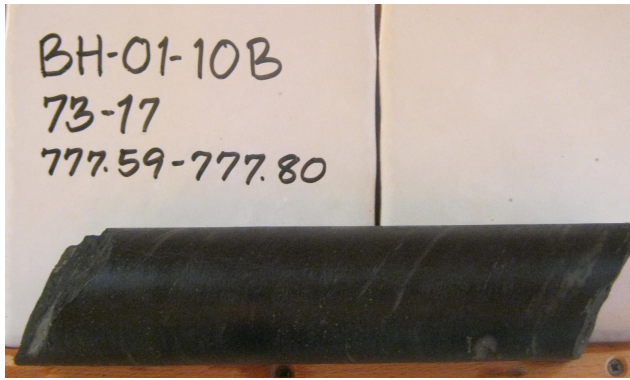


Figur 7. Grønnskifer med tynne kvarstårer, ca 15 cm lang prøve.

3.1.3 Svartskifer

Ti prøver ble plukket ut for å representere svartskiferen. Ved nærmere logging av disse prøvene har det vist seg at syv av disse prøvene ikke kan klassifiseres som svartskifer men som forkastningssoner med omvandling og er beskrevet i et eget avsnittet under. De resterende prøvene utgjør S-ROG-07 og K-ROG-17.

Svartskiferen består av svart materialet med tynne (1-3 mm tykke) hvite kvartsårer. Den inneholder 1-5 % pyritt primært som sprette korn men noen årer ble også observert. Svartskiferen er sterkt foliert.



Figur 8. Svartskifer med tynne kvarstårer, ca 15 cm lang prøve.

3.1.4 Knusningssone

Knusningssonen består av syv prøver som er basisen for lakprøvene S-ROG-06 og K-ROG-16. Den er sterkt foliert og knust i borekjernekasene. Materialet er nesten svart og inneholder mørke leirmineraler, kloritt, kvarts (som tynne årer og klaster), små mengder kalkspatt og aksessoriske mengder med pyritt.

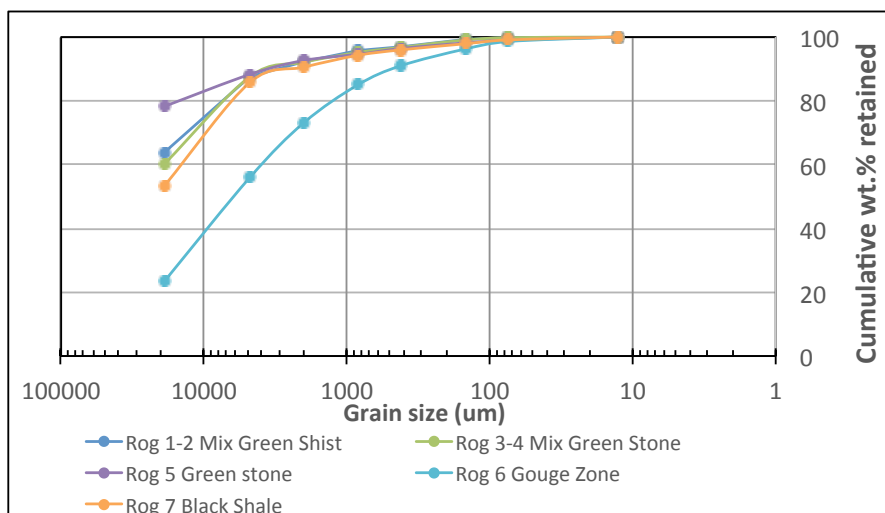


Figur 9. Knusningssone med med klaster og kvarstårer.

3.2 Kornstørrelse

Kornstørrelse-fordeling ble analysert for de seks prøver som er lagt i saltvanns og ferskvannskolonnene. Det var ikke laget en egen delprøve av S-ROG-01 eller S-ROG-02. Det var heller ikke laget en splitt prøve av grønnstein S-ROG-03 og K-ROG-04. Det var antatt at disse splittprøvene skulle være meget like i konsentrasjoner og kornfordeling.

En stor andel av materialet gikk ikke gjennom 19 mm diameter åpning i den største sikten selv om knusnings avstand var satt til 15 mm i kjefteknuseren (Figur 10). Dette skyldes at bergartene er sterkt foliert og i en knuser sprekker den opp etter foliasjonen hvor prøven parallelt med foliasjonen er >15 mm, mens den perpendikulært på denne retningen er <15 mm. Knusningssonen har betydelig mindre foliasjon enn de andre bergartene og en større andel passerer 19 mm.



Figur 10. Kornfordeling for fem bergarts samleprøver. Kornfordelingen i Svartskifer ble analysert i tre prøver og i figuren representerer et veiet gjennomsnittet.

Prosentandelen av materialet som går igjennom den fineste fraksjonen brukt i disse analysene (74 µm) er mellom 0,2 wt.% og 1,6 wt.% (Tabell 9).

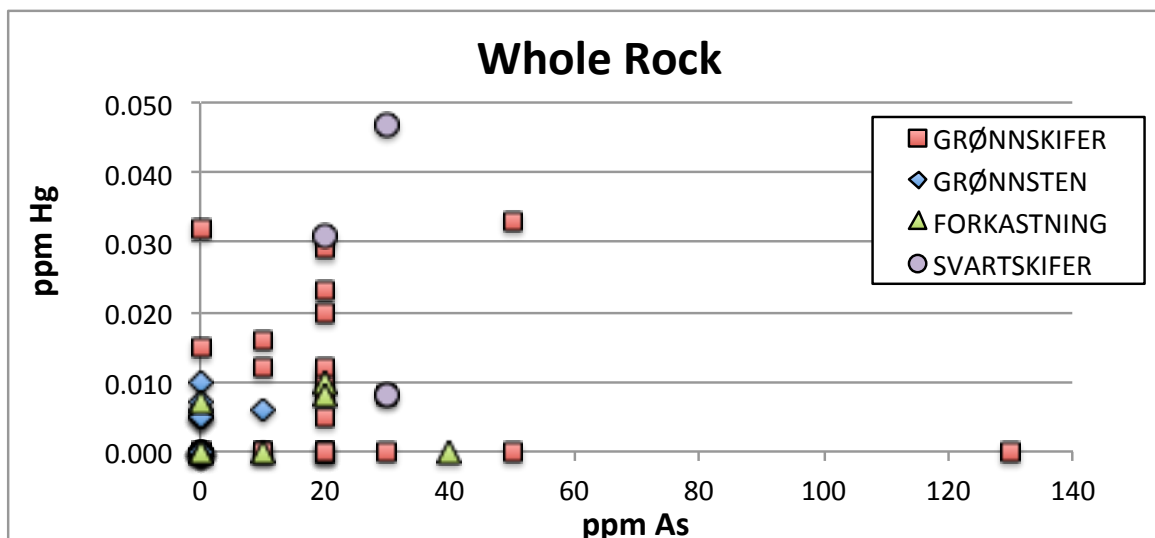
PRØVE	WT.% <75µm
Rog 1-2 Mix Grønnskifer	0.16
Rog 3-4 Mix Grønnstein	0.19
Rog 5 Grønnstein	1.00
Rog 6 Forkastningssone	1.40
Rog 7 Svartskifer	0.88

Tabell 9. Wt.% av prøvene knust til <15 mm som passerer <75µm sikt.

3.3 Totale Element Konsentrasjoner

Analyser av total elementkonsentrasjon for 29 elementer ved fire-syre oppløsning ble utført på 62 prøver (26 grønnstein, 26 grønnskifer, 7 forkastningsmateriale, 3 svartskifer). Disse analysene inkluderer konsentrasjoner av de potensielt farlige elementene As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, og Zn. Kadmium og bly er under deteksjonsgrensen for disse to elementene, henholdsvis 10 og 20 ppm, for alle prøvene bortsett fra en grønnskiferprøve med 21 ppm bly.

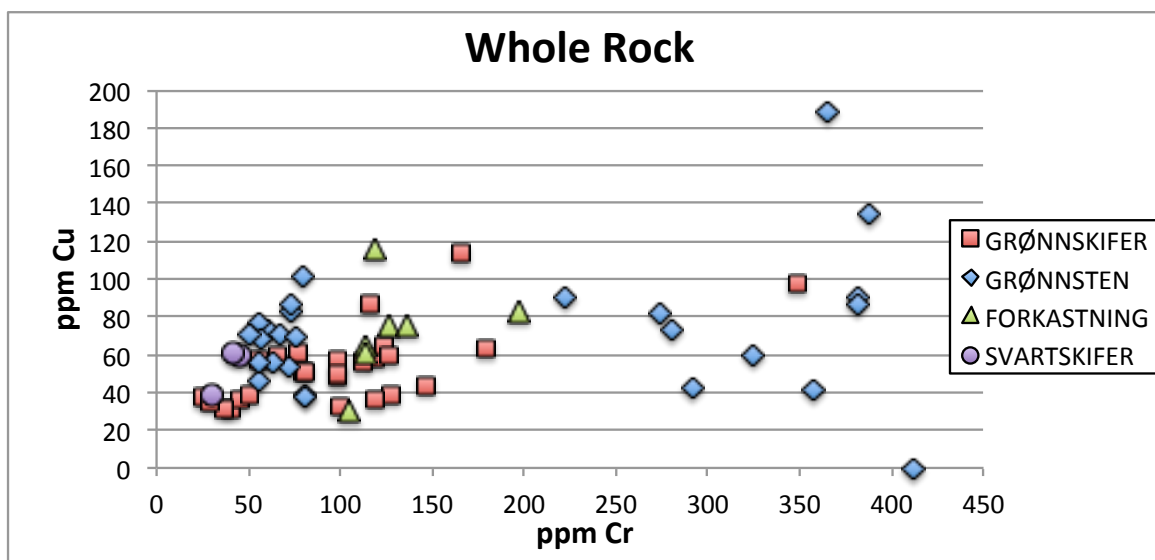
De aller fleste grønnsteinsprøvene er under deteksjonsgrensen for arsen (10 ppm) og ca 2/3 av grønnsteinsprøvene er under deteksjonsgrensen for kvikksølv (0,005 ppm). Prøvene over deteksjonsgrensen er 1-3 ganger deteksjonsgrensen (Figur 11).



Figur 11. Bergartsanalyser for kvikksølv og arsen for de fire bergarter i tunneltraseen.

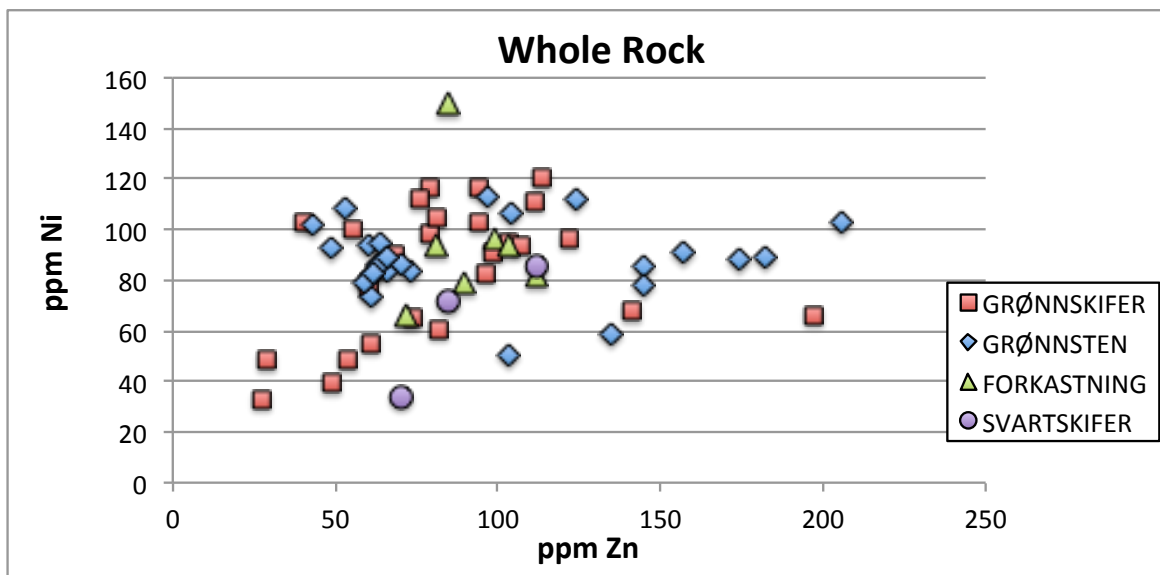
Mange av de andre bergartene har noe høyere konsentrasjoner av arsen og kvikksølv, men også med konsentrasjoner under deteksjonsgrensen.

Grønnsteins-prøvene viser en todeling i kromkonsentrasjoner (Figur 12), hvor prøvene fra borekjerne BH-02-2016 og dypere deler av BH-03-2016 viser tydelig høyere konsentrasjoner, enn de andre grønnsteinsprøvene. Forkastningssonematerielt viser noe høyere krom konsentrasjoner enn hoveddelen av grønnsteinsprøvene (Figur 12). Det er ingen distinkte forskjeller i kobberkonsentrasjonene mellom disse fire bergartene men det er stor variasjon i innholdet av kobber (30-140 ppm).



Figur 13. Bergartsanalyser for kobber og krom for de fire bergarter i tunneltraseen.

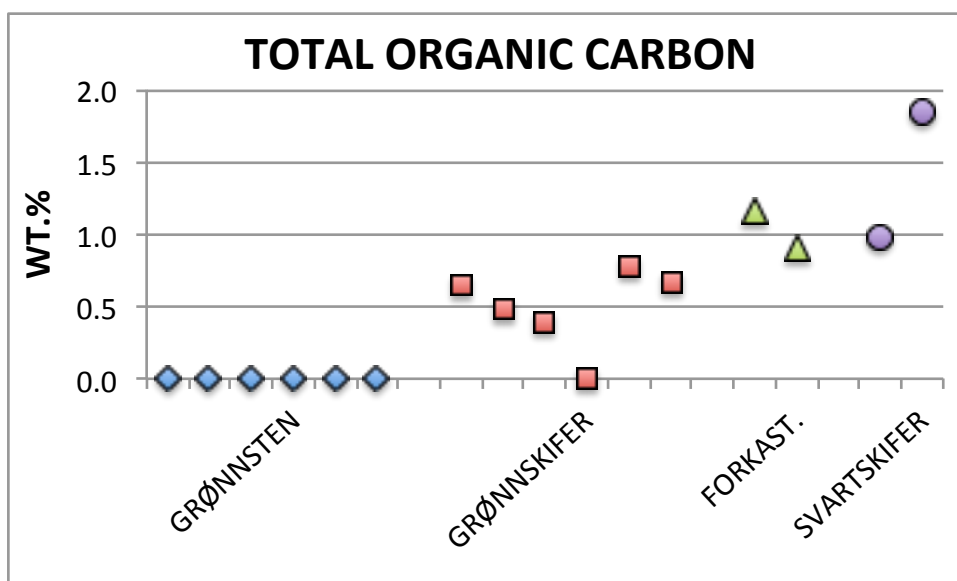
Både sink og nikkell viser store variasjoner for alle fire bergarter (Figur 14). Grønnsteinsprøvene fra BH-02-2016 har de høyeste sinkkonsentrasjonene. Konsentrasjonene for sink ligger mellom 25 og 200 ppm, mens nikkell variasjonen av alle prøvene er 30-150 ppm.



Figur 14. Bergartsanalyser for nikkell og sink for de fire bergarter i tunneltraseen.

3.4 Total Organisk og Uorganisk Karbon (TOC og TIC)

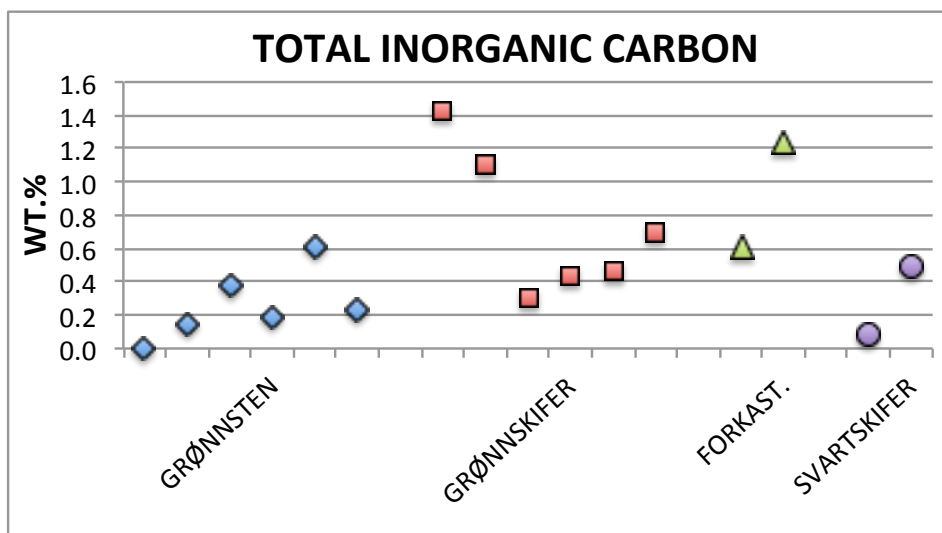
Fire prøver av grønnstein, fem grønnskifer, to svartskifer, en forkastningssone samt fire blandingsprøver ble analysert for total organisk karbon (TOC) og total uorganisk karbon (TIC). Grønnsteins-prøvene er under deteksjonsgrensen på 0,05 vekt% karbon for alle prøvene inkludert de to samle prøvene for kolonne 3/4 og 5 (Figur 15). Resultatene tyder på at det er høyere TOC i forkastningssonen enn grønnskifere, og svartskifer har høyere TOC innhold enn forkastningssonen.



Figur 15. Analyser av TOC for fire bergarter analysert samt samleprøvene. Samleprøvene er de to siste for grønnstein og den siste for hver av grønnskifer og forkastningssonen. Ingen samleprøve for svartskifer.

Det er kun mindre forskjeller i det uorganisk karboninnholdet (karbon primært fra karbonatmineraler) mellom disse bergartene (Figur 16). Analysene tyder på lavere uorganisk

karbon for grønnstein og svartskifer. Dette samsvarer med ABA analysene i neste avsnitt 4.5.

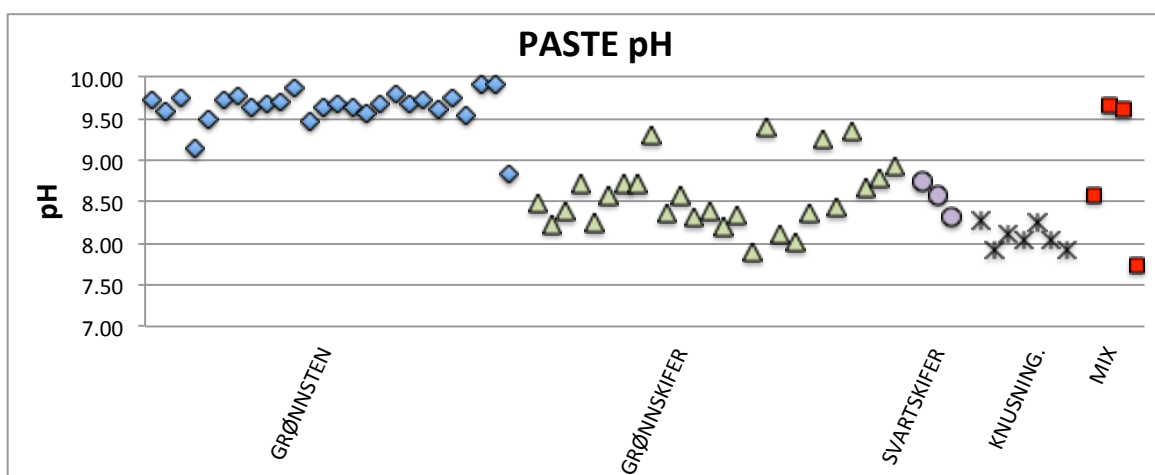


Figur 16. Analyser av TIC for fire bergarter analysert samt samleprøvene. Sampleprøvene er de to siste for grønnstein og den siste for hver av grønnskifer og forkastningssonen. Ingen samleprøve for svartskifer.

3.5 Syre-Base Analyser

Alle prøver innsamlet for denne vurderingen ble analysert for syre dannende potensiale og syrenøytraliserende potensialet. Som en del av disse analysene ble alle prøvene også analysert for jord pH.

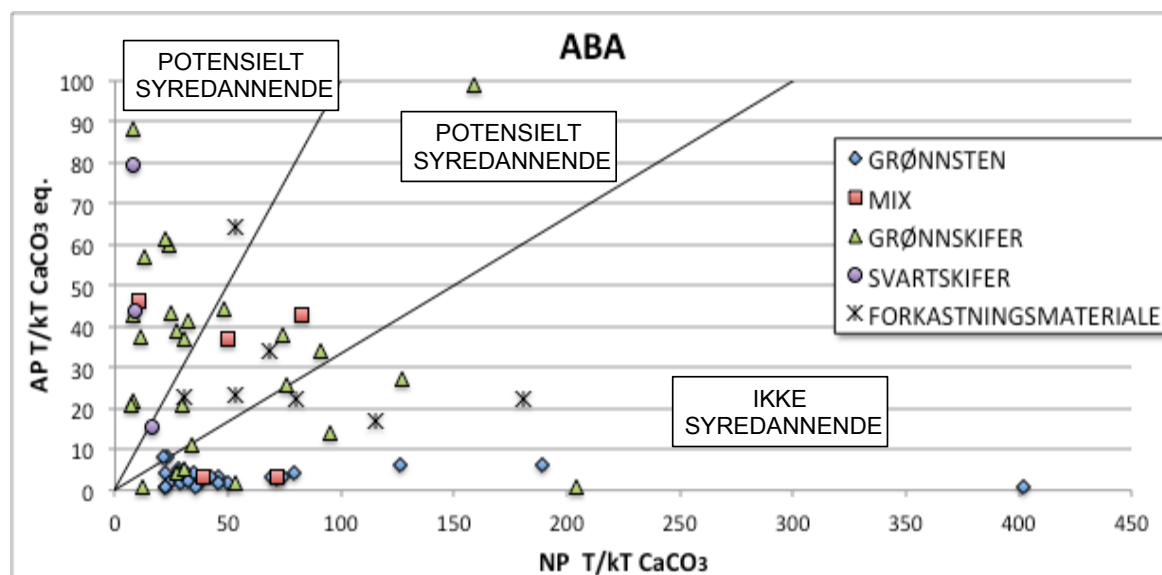
Resultatet av jord-pH analysene viser at alle prøvene gir basisk vann med pH rundt 7.5 til 9.5 (Figur 17). Grønnstein har de høyeste jord-pH verdier, mens knusningssonen har de laveste verdier.



Figur 17. Jord-pH analyser for fire bergarter analysert samt samleprøvene.

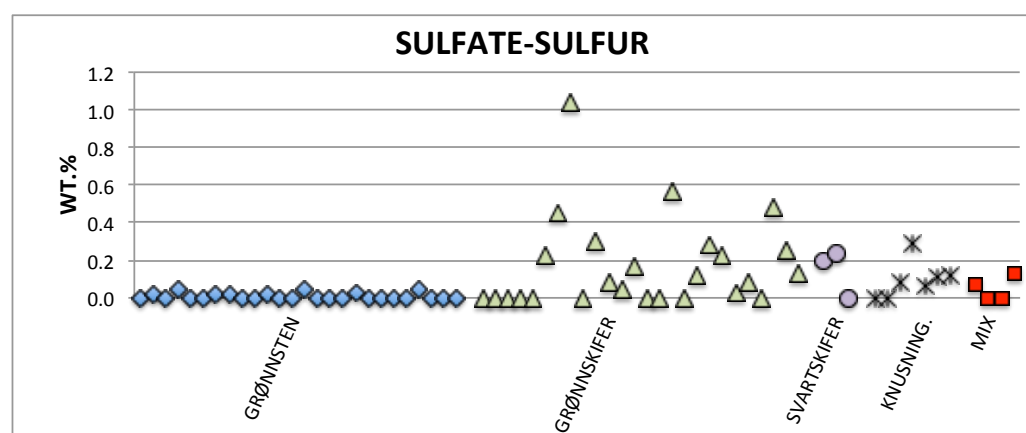
Syrenøytraliserende potensiale, NP er plottet mot syredannende potensiale, AP (Figur 17) for de fire bergartene sammen med analysene for blandingsprøvene. Det var for lite materiale for svartskifer blandingsprøven for denne analysen så et veiet gjennomsnitt basert for de tre

svartskiferprøvene er blitt brukt i denne figuren. Dette viser at alle prøvene av grønnstein har mer enn tre ganger så mye NP relativt til AP og er regnet som ikke syredannende materiale ifølge veileder CEN/TR 16363 (2012). Grønnskifer og forkastningsmaterialet plotter i alle tre felt mens svartskifer har NP/AP <1 hvilket tilsier at disse tre bergarter er regnet som potensielt syredannende og trenger videre vurdering gjennom langtids kinetiske tester (se kapittel 3.10).



Figur 18. Syrenøytraliserende (NP) vs. syredannende potensiale (AP) for de fire bergarter samt samleprøvene. Det er også lagt inn to linjer NP:AP 1:1 og NP:AP 3:1. Potensialet er gitt i ton CaCO₃/1000 ton materiale.

De syreløselig svovelanalysene viser at grønnsteinsprøvene ikke inneholder sulfat svovel, mens en del av prøvene av grønnskifer, svartskifer og knusningssone inneholder sulfatsvovel. Sulfatsvovel vil sannsynligvis være gips (CaSO₄x2H₂O) eller anhydritt (CaSO₄) (Figur 19). Blandingsprøven for knusningssone-materiale har noe høyere sulfat-svovel enn grønnskiferprøvene.

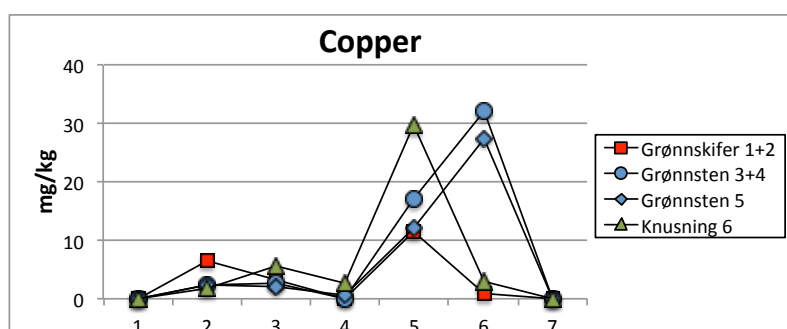


Figur 19. Vektprosent sulfat-svovel for de fire bergartsprøvene samt blandingsprøvene (Mix). Venstre blandingsprøve er grønnskifer, høyre blandingsprøve er knusningssone-materiale.

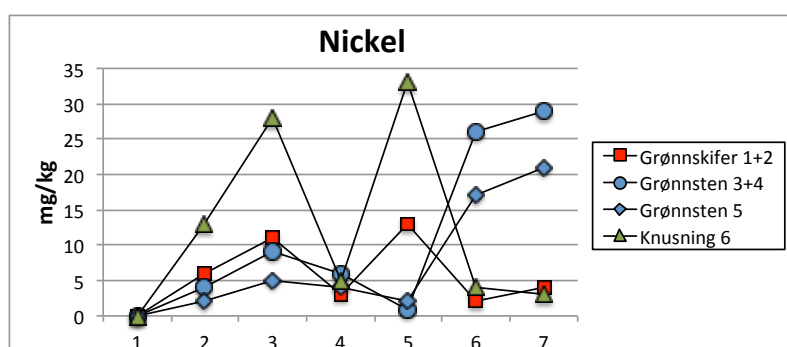
3.6 Sekvensiell Kjemisk Ekstraksjon

Sekvensiell kjemisk ekstraksjon ble utført på fire samleprøver brukt i kolonneforsøkene S-ROG 1-2, S-ROG 3-4, S-ROG 5 og S-ROG 6. Analysene er utført for å kunne vurdere tilgjengeligheten av elementer for utlekking. Det ble analysert for 26 elementer hvor kun noen få elementer som er av betydning for denne vurderingen er presentert i de påfølgende avsnitt. Av de potensielt farlige elementer er kadmium, arsen, kvikksølv og bly i så lave konsentrasjoner at videre tolkninger ikke er mulig. Alle analyser er i Vedlegg 7:.

Hoveddelen av kobber kommer fra steg 5 og 6, men det er også mindre mengder som løses i steg 2, 3, og 4 (Figur 20; hvor steg 2 er elementer bundet til kalsitt og absorbert på leirminerale; steg 3 og 4 er elementer bundet til jern-mangan hydroksidminerale). Nikkel på den andre siden har høyeste konsentrasjoner i steg 6 (sulfidbundet) og steg 7 (hvor steg 7 er silikatbundet elementer). Det er dog betydelig andel av nikkel som også er løselig i steg 2 og 3 (Figur 21). Grønnskifer og Knusningssonen har størst andel av nikkel løst i steg 3 og fem.

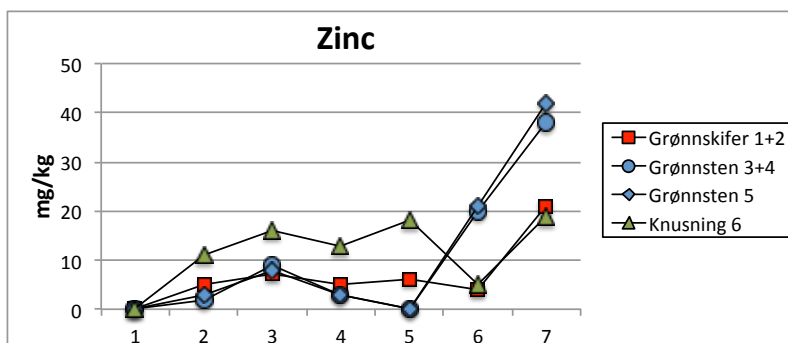


Figur 20. Kobber fordeling for de blandingsprøvene unntagen svartskifer ved bruk av sekvensiell kjemisk ekstraksjon i syv steg.



Figur 21. Nikkel fordeling for de blandingsprøvene unntagen svartskifer ved bruk av sekvensiell kjemisk ekstraksjon i syv steg.

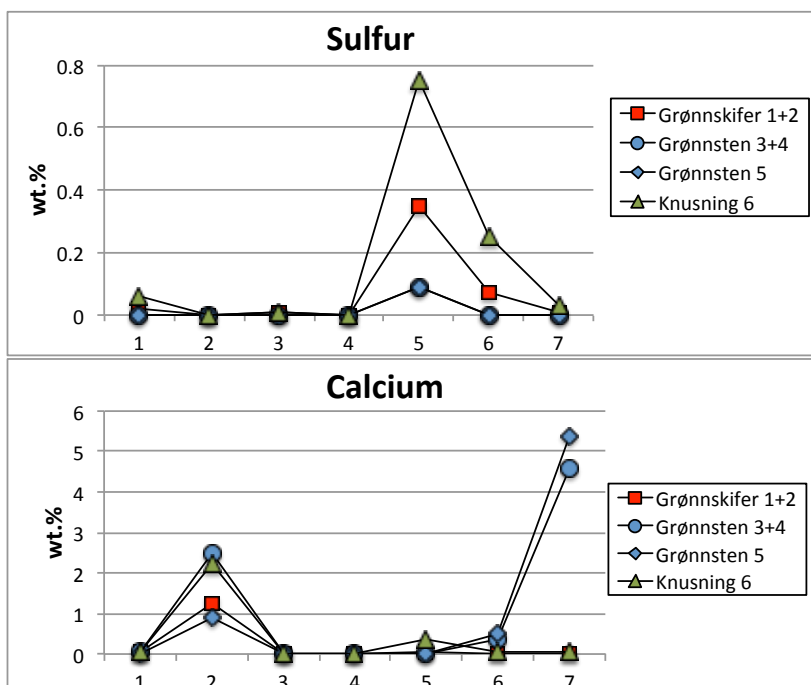
Sink har samme fordeling som for nikkel for grønnsteinen (Figur 22) hvor mest løses i steg 7 etterfulgt av steg 6. Også grønnskifer og knusningssone materialet har størst utlekking i steg 7, men for knusningssonen er det også betydelig andel laket i stegene 2, 3, 4, og 5.



Figur 22. Sink fordeling for de blandingsprøvene unntagen svartskifer ved bruk av sekvensiell kjemisk ekstraksjon i syv steg.

Det er meget små mengder av svovel som er målt i 1. Steg (lettløselige sulfatmineraler og salter), mens steg 5 har klart høyeste konsentrasjoner med noe lavere konsentrasjon i steg 6 (Figur 23). Det er ikke noe svovel løst i de andre steg.

Kalsium løses delvis i steg 2. For grønnskifer og knusningssone-bergartene utgjør dette steget hoveddelen av kalsium. For grønnsteins-materialet er det i steg 7 hvor hoveddelen av kalsium frigjøres.



Figur 23. Svovel og kalsium fordeling for de blandingsprøvene unntagen svartskifer ved bruk av sekvensiell kjemisk ekstraksjon i syv steg.

3.7 Mineral analyser

Mineralogiske analyser er utført ved bruk av X-Ray Diffraksjon (XRD) på syv prøver, tre svartskifer prøver, blandingsmaterialet for ROG 01 og 02; ROG 03 og 04; ROG 05, and ROG 06. Mineraler med konsentrasjoner på under 2 wt.% detekteres ikke i denne type

analyser. Dvs. at sulfidmineraler som var observert i håndprøver men i lave konsentrasjoner er ikke bli detektert disse mineralanalysene, men påvist i syre-base analysene som total innhold av sulfid-mineral innhold.

Grønnstein utgjøres vesentlig av kloritt, aktinolitt og epidot (Tabell 10). Grønnstein har i tillegg kvarts og muskovitt. Svartskifer inneholder stor grad av kvarts, samt illit, kaolin, og muskovitt. Det er store forskjeller mellom de tre svartskifer prøvene hvor det kan se ut som 84-17 er mer lik grønnskifer enn de andre to svartskifer prøvene.

MINERALOGISKE ANALYSER							
Minerals	73-17 Black Shale	67-17 Black shale	84-17 Black shale	Rog-01-02 Mix Green shist	Rog-03-04 Mix Greenstone	Rog-05 Greenstone	Rog-06 Gouge zone
Chlorite (Clinochlore)		6.1	23	25	66	55	8.1
Actinolite			14	11	22	34	7.1
Epidote			4	8	12	13	
Quartz	67	41	21	44			38
Illite	27						
Kaolinite	6	4					
Muscovite		49	39	12			47
Total	100	100.1	100	100	100	100.1	100.2

Tabell 10. Mineralogiske analyser av samleprøver fra kolonnene, samt tre svartskifer prøver. Konsentrasjoner gitt i vektprosent er semi-kvantitativt, og basert på intern beregning av element konsentrasjoner og kalkulert med de observerte mineraler. +/- 2% usikkerhet.

3.8 Saltvannslaktester

Saltvannslaktesting startet i midten av oktober og 9 vannprøver fra hver kolonne ble analysert. Siste prøve ble tatt ca 3 måneder etter oppstart. Det ble observert finkornete leirmineraler på overflaten i alle saltvannskolonnene rett etter fylling av bergartsprøvene. Dette var forsvunnet (sunket til bunnen) i alle kolonnene i løpet av noen dager til noen uker bortsett i svartskifer-kolonnen hvor mindre mengder svarte partikler var flytende i opptil 2 måneder etter start. Det ble også observert høy turbiditet rett etter fylling av kolonnene og i noen timer fremover før saltvannet fremstod som klart vann (Figur 24).



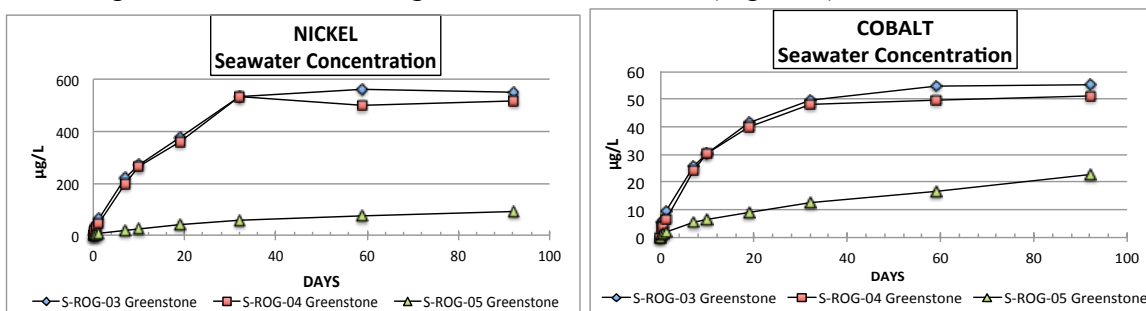
Figur 24. Fotografier av saltvannskolonnene med grønskifer (ROG-1), Grønnstein (ROG 3) og svartskifer (ROG-7), 1-2 timer etter fylling.

I de følgende avsnitt er resultater for hver av bergartstypen beskrevet.

3.8.1 Grønnstein

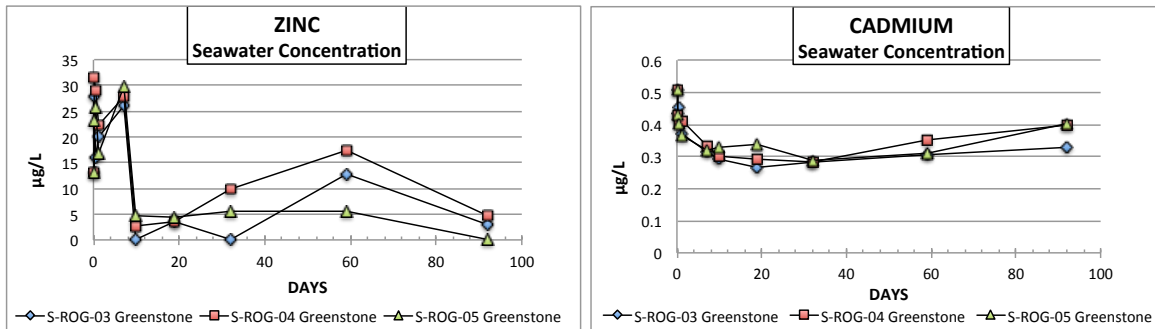
Det ble satt opp tre saltvannslakteter, S-ROG-03 og S-ROG-04 som er splitt av samme samleprøve-blanding, og S-ROG-05 som er samleprøve fra borehull BH-05-16. Små brunfargete korn i grønnsteinen viser jernhydroksiddannelse fra sulfidoksidering etter noen uker i saltvannet.

Det er for alle elementer en rask økning i konsentrasjon de første timene etter fylling av prøvematerialet. Nikkel og kobolt viser en kontinuerlig økning i en måned etter den initiale utlekkingen men uten forandring de siste to månedene (Figur 25).



Figur 25. Nikkel og kobolt konsentrasjoner (microgram/liter µg/L) over tid i saltvannet fra langtidslakteter av grønnstein.

Sink og kadmium sank kraftig etter de første dagene utlekking. Kadmium viser en potensiell økning igjen de siste to måneder (Figur 26).



Figur 26. Sink og kadmium konsentrasjoner ($\mu\text{g/L}$) over tid i saltvannet fra langtidslakter av grønnstein.

3.8.2 Grønnskifer

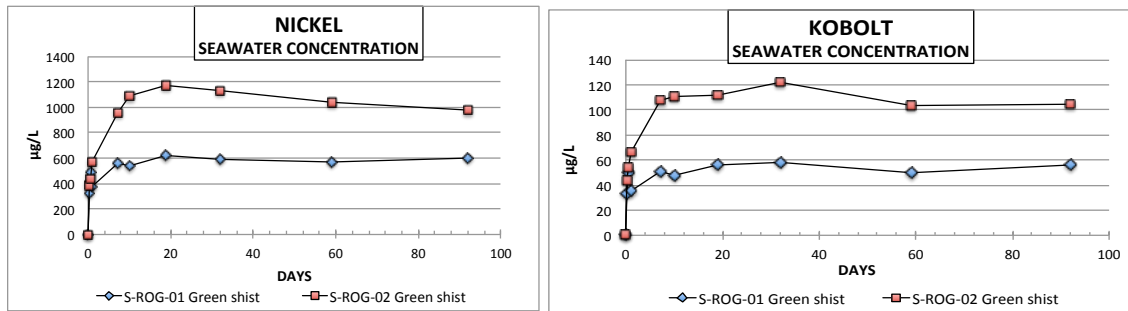
Det ble satt opp to kolonner for grønnskifer (S-ROG-01 og S-ROG-02), som var splitt av en samleprøve. Ved fylling var det betydelig materialet på vannoverflaten. Dette forsvant helt etter 1 ½ - 2 måneder.

Små sulfidkorn i grønnskiferen viser jernhydroksiddannelse (Figur 27).

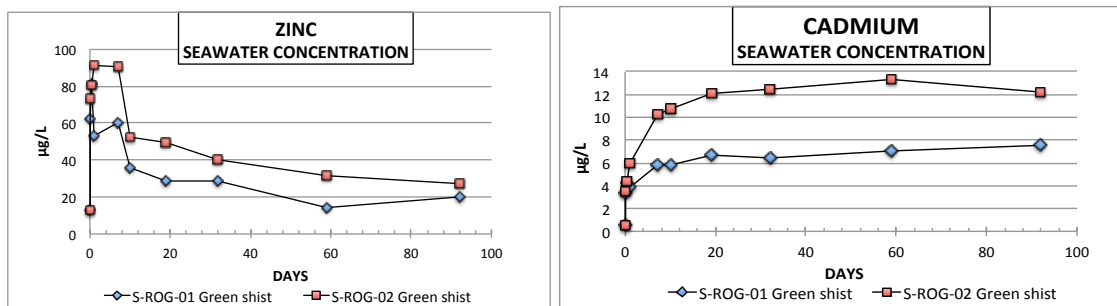


Figur 27. Foto av ROG-01 grønnskifer som i midten av bildet viser rust (jern hydroksid) dannelse fra sulfidmineral oksidering.

De to grønnskifer-kolonnene viser betydelig forskjeller i elementkonsentrasjonene, men med den samme trend over tid. Konsentrasjonene blir konstante etter 10-15 dager for de fleste elementer (Figur 28-29). Sink konsentrasjonen er avtagende etter de første timene mens kadmium flater ut etter de første 15 dagene (Figur 29).



Figur 28. Ni og kobolt konsentrasjoner (µg/L) over tid i saltvannet fra langtidslaktester av grønskifer.

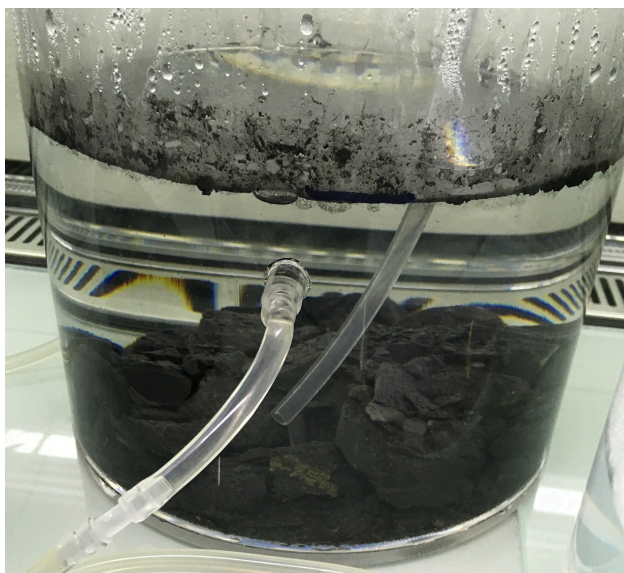


Figur 29. Sink og kadmium konsentrasjoner (µg/L) over tid i saltvannet fra langtidslaktester av grønskifer.

Grønskiferen viser betydelig høyere utlekkingsrate enn for både svartskifer og grønnstein for de fleste elementer. Kobber er dog lav i grønskifer slik den er i svartskifer, grønnstein og materialet knusningssone og ligger under 1 µg/L i hele perioden.

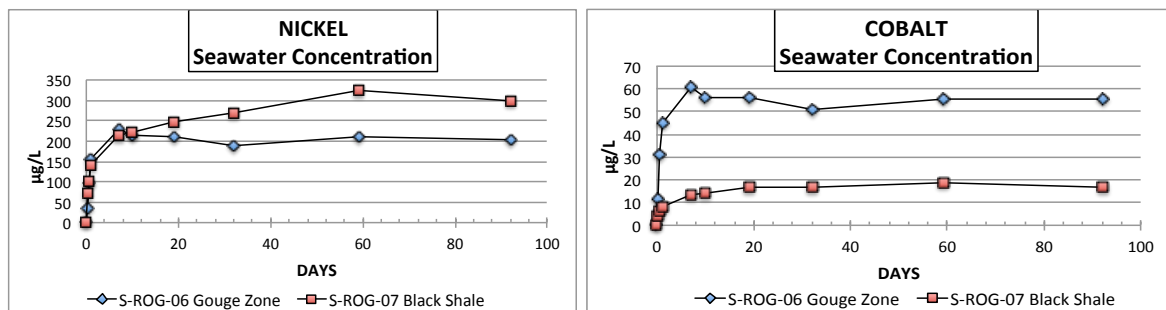
3.8.3 Svartskifer og Knusningssone

Ved fylling av svartskifer og knusningssone i saltvannskolonnene var det betydelig leirmineraler og sorte partikler som fløt. Leirmineralene forsvant for disse to kolonnene relativt fort, men det var fortsatt et oljefilm på vannet i svartskiferkolonnen i opptil 1.5-2 måneder. Det var fortsatt sorte flytende partikler i saltvannskolonnen som er antatt å være kull.



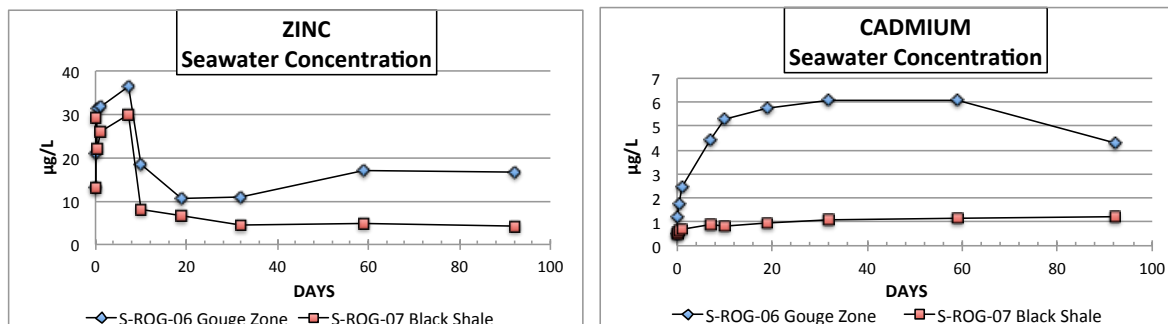
Figur 30. Flytende kullpartikler på overflaten i svartskiferkolonnen

Resultater fra saltvannsutlekkingsstestene for svartskifer og knusningssone er plottet sammen. Etter 5-10 dager flater konsentrasjonen ut i saltvannet for de fleste av sporelementene e.g. nikkel og kobolt (Figur 31). Sink faller i konsentrasjon for både svartskifer og knusningssone slik som er også vist for grønnstein og grønnskifer (Figur 32).



Figur 31. Ni og kobolt konsentrasjoner ($\mu\text{g/L}$) over tid i saltvannet fra langtidslakteter av svartskifer og knusningssone.

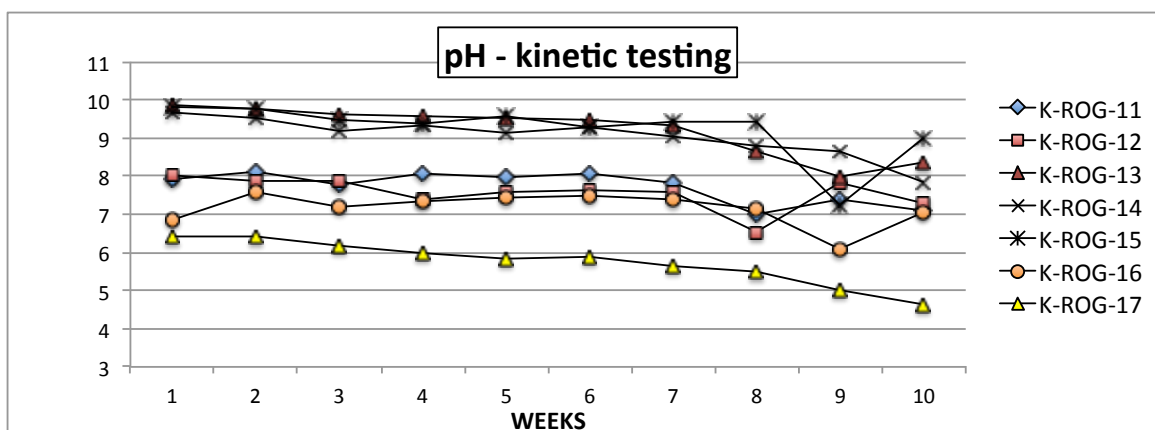
Det er lite kadmium som lages ut fra svartskifer sammenlignet med grønnskifer, men det er høyere konsentrasjoner av kadmium i vannprøvene fra svartskifer enn for grønnstein. Fallende sinkkonsentrasjoner etter første utlagnings periode er meget tilsvarende for alle fire bergartstyper.



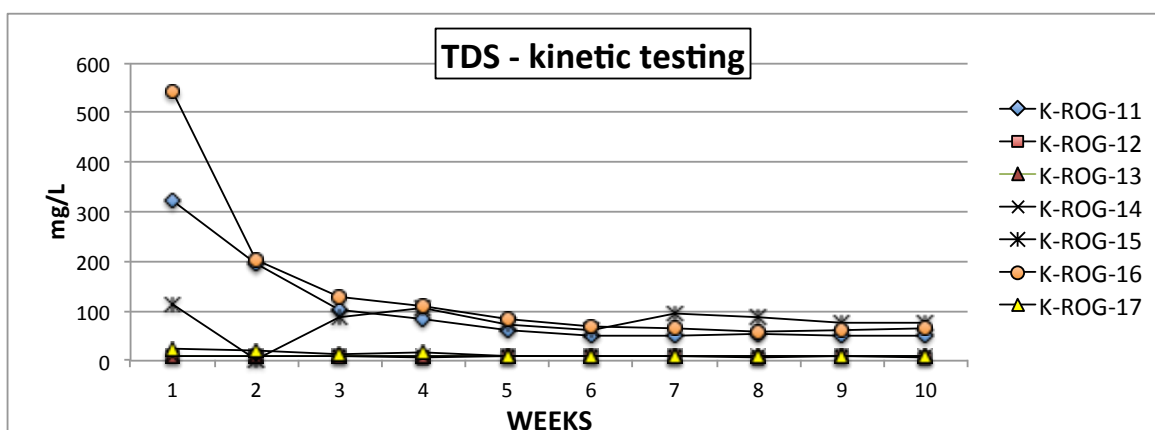
Figur 32. Sink og kadmium konsentrasjoner ($\mu\text{g/L}$) over tid i saltvannet fra langtidslakteter av svartskifer og knusningssone.

3.9 Kinetiske tester med ferskvann

Ni kolonneeksperimenter med ukentlig utlekking med avionisert vann har vært kjørt i 3 ½ måned. Alle eksperimentanalyser finnes i Vedlegg 8 og noen av de potensielt farlige metallene er beskrevet i de følgende avsnitt. Alle kolonnene viser lav total utlekking generelt, med nær nøytral til basisk miljø i lakvannet (Figur 33). Kun svartskiferen viser over tid en reduserende pH til et svakt surt lakvann. Totalt løste salter er dog under 10 mg/L i det ukentlige utlekkingsvannet (Figur 34). pH blir derfor vanskelig å måle i et vann med så lav elektrisk ledningsevne.

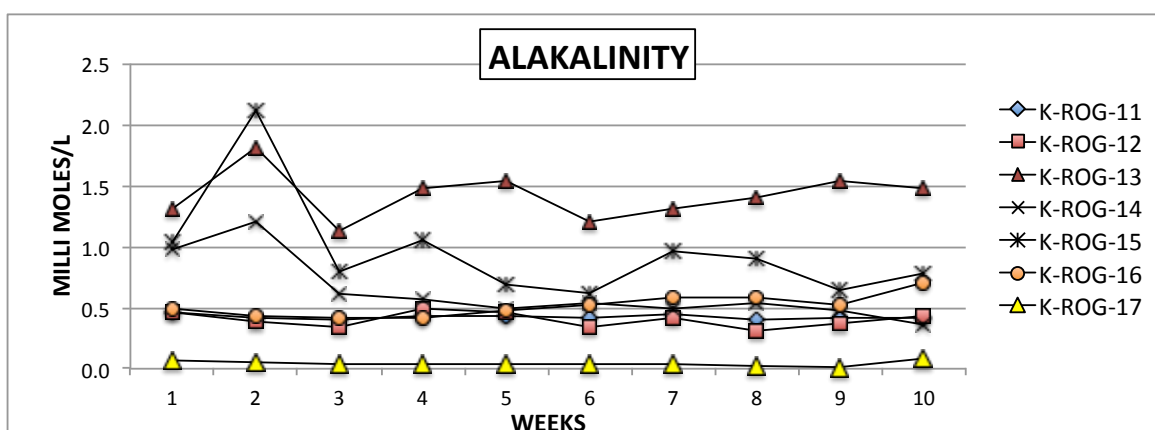


Figur 33. pH i lakvann fra kinetiske tester for de fire analyserte bergarter.



Figur 34. TDS (mg/L) i lakvann fra kinetiske tester for de fire analyserte bergarter.

Alkalinitet er relativt konstant for hele testperioden (Figur 35). Svartskifer viser liten alkalinitet i lakvannet, mens grønnskifer og knusningssone har alkalinitet omkring 0.5 millimol/L hvilket tilsvarer ca 30 mg/L HCO_3^- . Grønnsteinen viser høyere alkalinitet enn de andre bergartsprøvene.

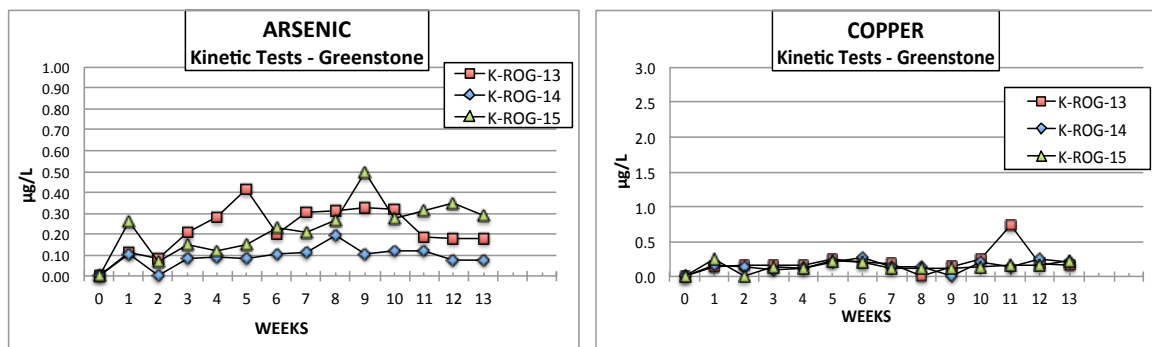


Figur 35. Alkalinitet (milli mol/L) i lakvann fra kinetiske tester for de fire analyserte bergarter med duplikater.

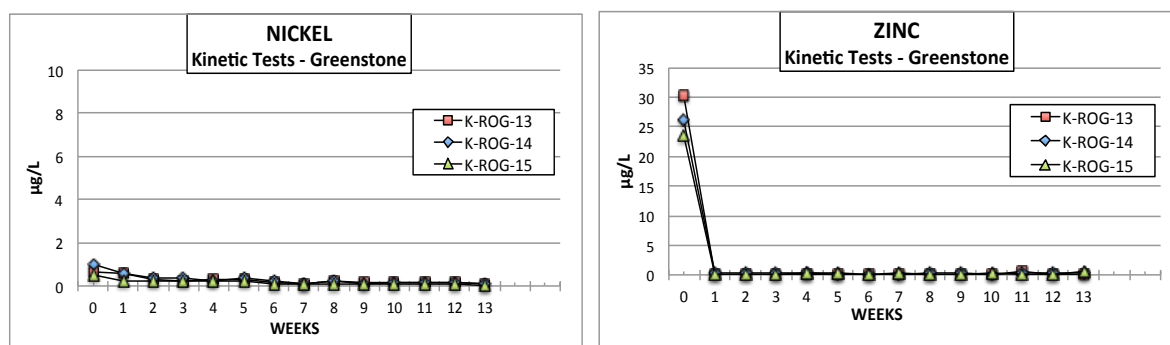
De følgende avsnitt er en gjennomgang lakvannsdata for de fire bergartene.

3.9.1 Grønnstein

De tre grønnsteinsprøvene viser lite utlekking av de potensielt farlige elementer. Det er heller ingen økning over tid. Arsen, kobber, nikkell og sink viser en utlekking godt under 1 µg/L (Figur 36 og 37). Sink viser dog en tydelig utlekking den første uken.



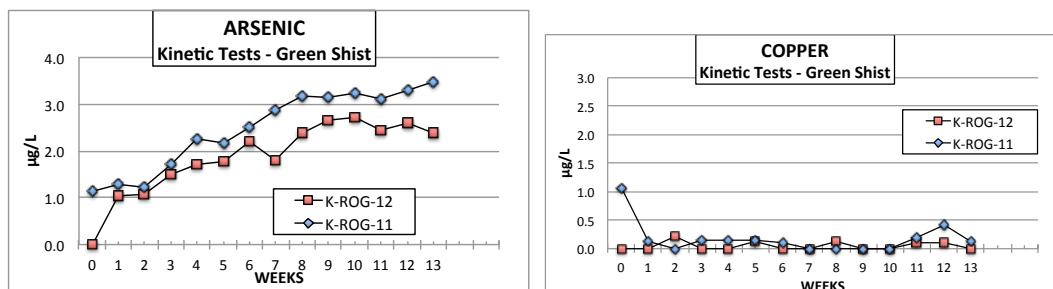
Figur 36. Arsen og kobber konsentrasjoner (µg/L) i lakvannet fra kinetiske tester for grønnstein.



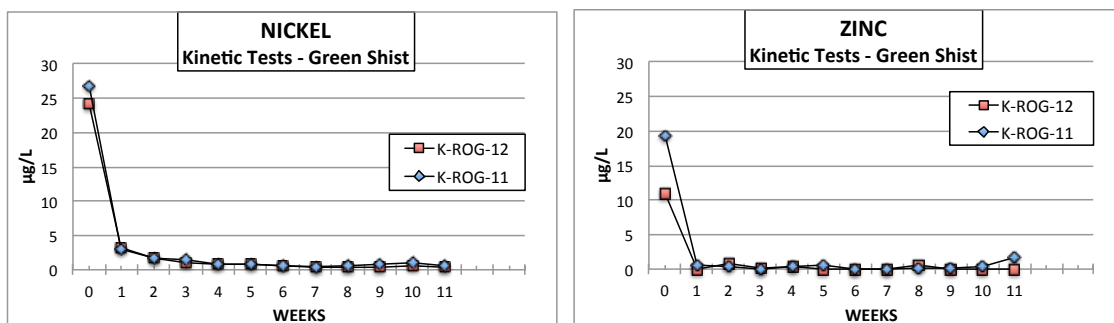
Figur 37. Nikkel og sink konsentrasjoner (µg/L) i lakvannet fra kinetiske tester for grønnstein.

3.9.2 Grønnskifer

Grønnskiferen viser en svak økning i utlekking av arsen over de første 7-8 ukene, mens de andre sporelementene og hovedelementene er avtagende eller under deteksjonsgrensen (Figurer 38 og 39). Både nikkell og sink viser tydelig utlekking den første prøvetagningen, men etter dette er utlekkingen nær eller under 1 µg/L.



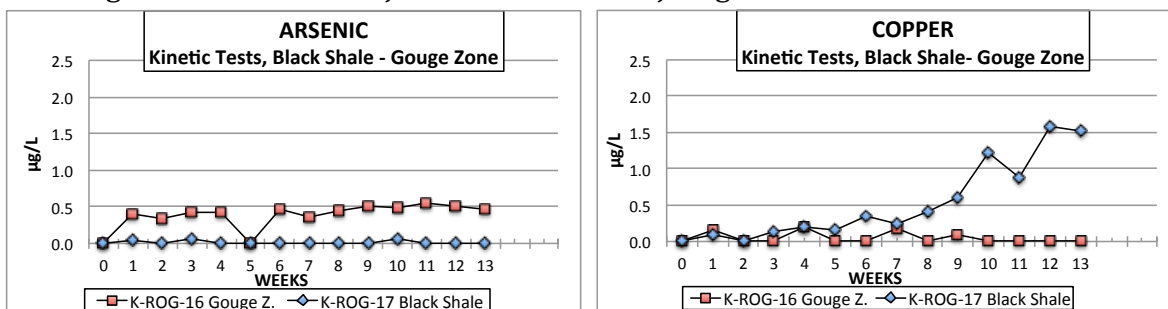
Figur 38. Arsen og kobber konsentrasjoner (µg/L) i lakvannet fra kinetiske tester for grønnskifer.



Figur 39. Nikkel og sink konsentrasjoner ($\mu\text{g/L}$) i lakvannet fra kinetiske tester for grønskifer.

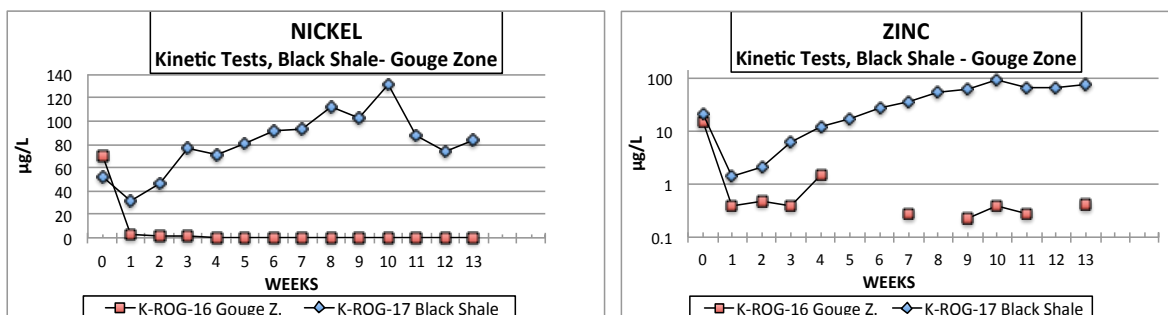
3.9.3 Svartskifer og Knusningssone

Arsen viser nær deteksjonsgrensen for svartskifer mens kobber viser en økende konsentrasjon etter syv uker (Figur 40). Knusningssonen viser jevnt lav utlekking av arsen og kobber konsentrasjonen er nær deteksjonsgrensen.



Figur 40. Arsen og kobber konsentrasjoner ($\mu\text{g/L}$) i lakvannet fra kinetiske tester for svartskifer (blå ruter) og knusningssonen (rød firkant).

Nikkel og sink konsentrasjonene i vannet fra svartskiferen har derimot vært jevnt økende i de første 10 ukene og så flatet ut eller falt noe i konsentrasjonene (Figur 41). Vannet fra knusningssonen derimot hadde en tydelig utlekking den første uken, men har derefter vist lave konsentrasjoner (Figur 41).



Figur 41. Nikkel og sink konsentrasjoner ($\mu\text{g/L}$) i lakvannet fra kinetiske tester for svartskifer (blå ruter) og knusningssonen (rød firkant).

3.10 Mineralstabiliteten / Geokjemisk Modellering

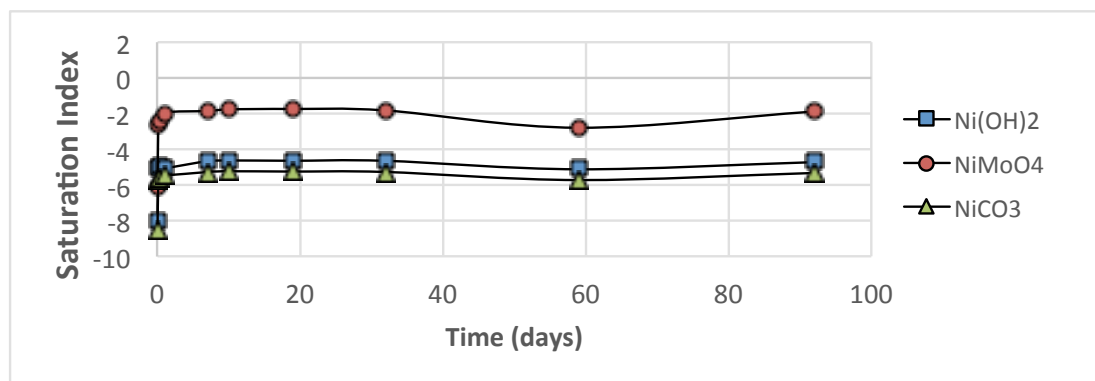
Etter hvert som konsentrasjonene av komponenter øker i saltvannet i utlekkings-eksperimentene som en følge av mineraloppløsning er det en mulighet for at nye mineraler

vil felles ut. Dette ser vi fra pyritt (svovelkis) oksidering hvor jernhydroksid felles ut og gir rustfarge (se kapittel 3.8). For å vurdere dette er det geokjemiske modelleringsprogrammet PHREEQC (Parkhurst et al, 2015) utviklet av US Geological Services brukt sammen med den termodynamiske databasen Minteq4V.

Inndata til modelleringen er vannkjemien slik som analysert sammen en med data for anion-konsentrasjoner fra produsenten VWR saltvannet brukt i eksperimentene (Vedlegg 7). Beregningene er utført under likevekt med luft (0.21 vol.% oksygen) og ved temperatur på 8°C. Disse beregningene gir metningsgraden (mineralstabilitet) for alle mineraler som kjemisk sett kan dannes fra den vannkjemien som er brukt som inndata og modellresultatene gir konsentrasjoner av komplekser som dannes i den vannkjemien som er brukt.

Alle mineralstabilitetsanalysene ved bruk av PHREEQC gir negative metningsgrad (Saturation Index) for de potensielt farlige elementer som er spesielt vurdert i denne rapporten (As, Pb, Cd, Co, Cr, Cu, Ni og Zn) (Figur 342; Vedlegg 7). Modelleringen beregner metningsgrad for blant annet metall oksid-hydroksid, karbonat sulfat mineraler som vil være mest sannsynlig dannet i et alkalisk-, sulfat- og karbonat-rikt sjøvann.

Denne modelleringen tar dog ikke adsorpsjons- eller absorpsjons-prosesserer med i betraktning noe som er sannsynlig at også foregår i dette vannsystemet. Disse prosessene vil allikevel også foregå i det naturlige systemet og foregå i stor grad uten påvirkning av konsentrasjonene av de potensielt farlige metaller som er spesifikt vurdert i denne rapporten.



Figur 42. Metningsgrad (Saturation Index) i logaritmisk skala for nikkelferter basert på vannprøver for saltvannskolonnen Rog-02, grønnskifer. De listede Ni-mineraler er de som er nærmest metnings. Negativ metningsgrad betyr undermettet, dvs, felles ikke ut.

4 RESULTATVURDERING

Det ble utførte kolonnelekketester i saltvann og med gjennomstrømmende ferskvann for å vurdere egnetheten av å bruke overskuddsmassene fra Boknafjordtunnelen til utfyllinger over og under havflaten. Resultatene av disse testene gir en mulighet for å beregne utlekkingshastigheter enten materialet plasseres over eller under havflaten. Datagrunnlaget er basert på vekt av steinmassene, mens en videreutvikling av datagrunnlaget med overflate tilknyttet utlekking kan også utføres. Da det ikke er datagrunnlag for å beregne kornstørrelsesfordeling for utsprengt materiale før sprengninger er utført er beregningene basert på vekt istedenfor overflate-arealet av mineraler.

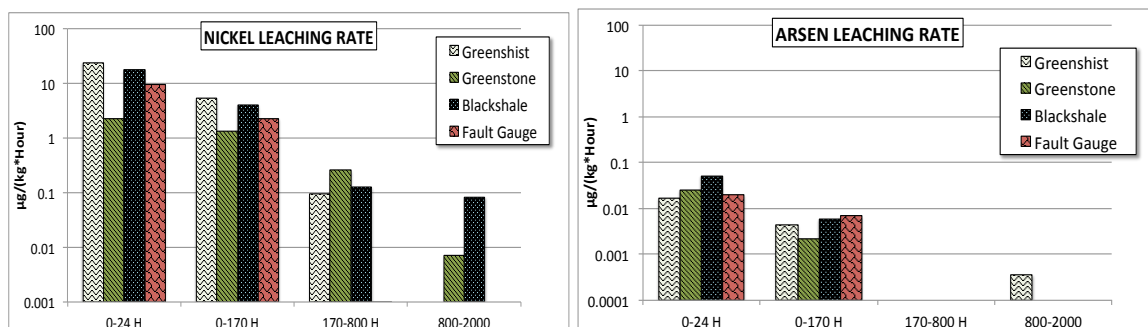
Utlekkingsrater og andre beregninger beskrevet i disse påfølgende tolkninger er direkte gjeldende for det materialet som har vært testet i kolonnene. Kornfordeling og overflateareal vil være annerledes for sprengte masser relativt til prøver knust fra borekjerner, hvilket gir en usikkerhet ved å skalere opp resultatene fra kolonnetestene til hele overskuddsmassen fra tunneldriften. Det er usikkerhet angående forholdet mellom de tre bergartene som utgjør hoveddelen av massene, og om det er forskjeller som ikke er påtruffet i de prøver som er med i analysegrunnlaget. Kornfordeling av sprengte masser sammen med vurdering av bergartsforholdet bør følges opp slik at det geologiske datagrunnlaget for beregningene kan verifiseres, eventuelt oppdatere beregningene hvis det viser seg å betydelige store forandringer.

4.1 Saltvannsutlekking

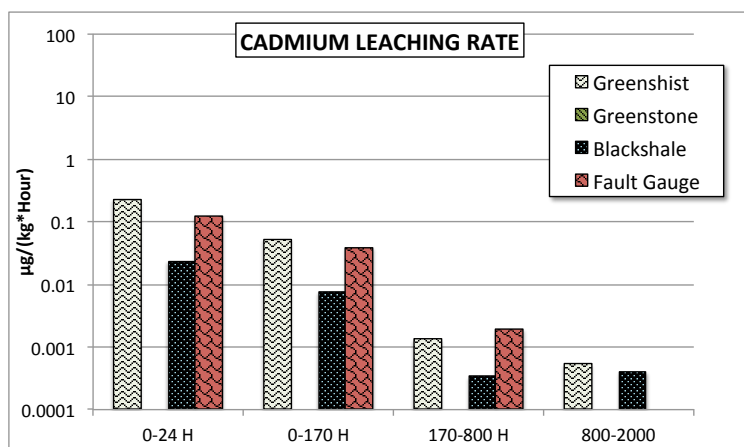
Utlekking av nikkell, kadmium og kobolt er mulig å beregne, men andre potensielt farlige elementer (kobber, arsen, kvikksølv, bly og sink) viser ingen signifikant langtidsutlekking fra de prøver som er testet. Utlekkingsraten kan fordeles i korttidsutlekking som er i stor grad knyttet til perioden av utlegging i saltvannet (og oppløsning av meget finkornet material) og mellomtidsutlekking opptil 1 måned og langtidsutlekking.

Korttidsutlekking er vurdert i to tidsperioder 1 døgn (24 timer) og ca 7 døgn (170 timer). Mellomperiode er 170-800 timer (7 dager til 1 måned) og langtidsutlekking er de to siste månedene.

Disse beregningene viser at grønnskifer og svartskifer har omtrent lik utlekkingsrate mens grønnstein er fra $\frac{1}{2}$ - 1 størrelsesorden lavere for nikkell. Arsen er relativt like for alle fire bergartene og det er lite utlekking eller under deteksjonsgrensen i mellomperioden og i langtidsperioden 1-3 måneder. Kadmium er under bakgrunns verdiene for lakvannet for grønnstein, slik at det ikke kan beregnes noen utlekkingsrate. Utlekkingsraten er ca. $1\frac{1}{2}$ - 2 størrelsesordener lavere for mellomtidsutlekking relativt til korttidsutlekking (Figur 43 og 44).



Figur 43. Utlekningsrater i $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{time})$ for nikkel og arsen fra material plassert i saltvann for de fire bergarter testet for to korttidsscenarier og langtidsscenarier.



Figur 44. Utlekningsrater for kadmium i $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{time})$ fra material plassert i saltvann for de fire bergarter testet for to korttidsscenarier og langtidsscenarier.

Statens vegvesen region vest har estimert at ca 2.15 mill. m^3 fast fjell tas ut i Entreprise E2, hvorav 10-20 % utgjøres av granitt og potensielt noe fyllitt mens resten utgjøres av grønnstein-grønnskifer-svartskifer delen av ofiolittkomplekset. Mengdeforholdet mellom disse tre bergartene er ikke beregnet. Grov kartlegging av de tilgjengelige borehull tyder på at hoveddelen utgjøres av grønnstein noe mindre grønnskifer, mens svartskifer er påtruffet kun i et av borehullene. Statens vegvesen region vest har vurderte at svartskifer utgjør ca 2-5% av massene.

Hvis vi tenker oss at 1,795 mill. m^3 fast fjell utgjøres av grønnstein-grønnskifer-svartskifer (80% av totalmassene; Estimert av Statens vegvesen vest), vil med en egenvekt på rundt 2,8 ton/m^3 (typisk for basalt 3,0 ton/m^3 mens disse omvandlete basaltbergartene med øket vannmengde og derved lettere) vil dette gi 5,4 mill. ton masse. Hvis vi antar 2,8 mill. ton materiale er grønnstein (50 vekt %), 2,6 mill. tonn grønnskifer (45 vekt%) og 0,2 mill. ton svartskifer (5%) som legges ut vil nikkel fra korttidsutlekkningen utgjøre ca 132 kg nikkel/år, mens utlekking fra mellomperioden utgjør 58 kg/år (hvilket tilsvarer 0.37 kg/døgn) (Tabell 11). Denne beregningen antar at 85% av bergartene legges under havflaten, men resten legges over. Beregningen tar også i betraktning at hoveddelen av utlekkningen skjer fra det finere knuste materialet og representerer 30% av totale mengde bergart som tas ut. Etter avsluttet utlegging forventes det ikke å være målbar utlekking av nikkel fra saltvannsdelen av deponiet.

Tidsperiode	0,18	1,05	132	15
kg/7 dager (kort)	Ikke målbart	0,27	58	Ikke målbart
kg/7 dager-1 mnd (mellom)	*0,070	*0,12	3,3	Ikke målbart
kg/ 1 mnd-3 mnd (lang)	0,25	1,44	193	15
Kg totalt 1. år	1,27	7,22	967	76
Kg totalt for 5 år	0,0007	0,0040	0,53	0,041
kg/døgn	0,18	1,05	132	15

Tabell 11. Kalkulert metall utlekket (kg) totalt tilsammen fra de tre bergartene testet som et veiet gjennomsnitt, korttids, langtids, første år og for hele perioden utlegging vil foregå (planlagt a ta fem år) samt daglig utlekking. Etter at deponeringen er avsluttet vil det ikke være signifikant utlekking fra deponiet ifølge utlekkingstestene. Denne kalkuleringen er basert på at 1/3 av deponi materialet har overflate som lekker.

Til sammenligning er utlekkingen fra Titania ilmenitt gruve i Tellnes, Hauge i Dalane aktive landbaserte avgangsdeponi estimert til 1-1,2 ton per år hvor det deponeres ca 2 millioner ton avgang om året (TA2715, 2010). Deponiet til Titania gruver, Hauge i Dalane har vært i bruk siden tidlig på 1990 tallet.

Resultatene fra de kinetiske kolonnene er blitt brukt til å beregne utlekking på kort og lang sikt. Resultatene av den første ukes utlekking er brukt for korttids utlekking, mens gjennomsnittet av uke 9 og 13 er brukt for langtidsutlekking. Gjennomsnittet av uke 9 til 13 er antatt å representere den ukentlige utlekkingen og er derfor multiplisert med 51. Totalt for året er summen av korttids- og langtids-utlekking (Tabell 12). Resultatene viser noe utlekking for de potensielt farlige elementene arsen, bly, kadmium, krom og kobber. Nikkel og sink viser betydelig høyere utlekking enn de andre sporelementene. Det er forventet at utlekkingen fra grønnsteinen vil synke ytterligere, men det er større usikkerhet om hva som vil skje med grønnskifer og svartskifer med tid, da disse er potensielt syredannende.

Tidsperiode	Arsen	Bly	Kadmium	Krom	Kobber	Nikkel	Sink
kg/7 dager (kort)	0,06	0,02	0,01	0,01	0,04	1,26	1,4
kg/ 51 uker (lang)	8,1	0,11	0,5	0,09	0,81	65	41
Kg totalt 1. år	8,1	0,13	0,51	0,1	0,84	66	42
Kg totalt for 5 år	41	0,63	2,51	0,48	4,2	330	211
kg/døgn	0,11	0,0003	0,0014	0,0013	0,0023	0,2	0,12

Tabell 12. Kalkulert metall utlekket (kg) totalt fra de tre bergartene testet som et veiet gjennomsnitt, korttids, langtids for hele perioden av 51 uker ved bruk av gjennomsnittet for uke 9 til 13, første år og for hele perioden utlegging vil foregå (planlagt a ta fem år) samt daglig utlekking. Beregningene er basert på at 15% legges over havflaten og at den finere del av massene (30%) gir signifikant utlekking.

Denne måten å bruke kinetiske test data er å regne for konservativt. Den store tilgangen på vann helt jevnlig gir maksimal utlekking og overestimerer den naturlige utlekkingen. Kinetiske tester kjørt over lengre tid enn de foreløpige 3 måneder med variasjoner i vanntilgang kan avdekke slike forhold.

Arsenutlekkingen er betydelig høyere i disse kinetiske testene enn for saltvannet, mens kadmium er noe lavere. Arsenkilden er vesentlig fra grønnskifer. Nikkel er omtrent det dobbelte fra kinetiske tester med ferskvann relativt til saltvann, mens sink er ca 20 ganger

høyere for de kinetiske tester relativt til saltvannstestene. Mer enn 95 % av nikkel og sink kommer dog fra svartskifer i beregningen av langtidsutlekkningen hvor beregningene er basert på 5% svartskifer. Forandring i massene av svartskifer vil derfor lett forandre utlekkingsstallet. Svartskifer bør derfor behandles særskilt når det påtreffes håndterbare mengder av svartskifer under tunneldriften. Det bør også unngås å legge grønnskifer som øvre del av utfyllingene.

Hvis grønnskifer går sur pga mangel på det naturlig nøytraliseringspotensialet bør det vurderes å tilføre nøytraliserende material ev. skjellsand.

4.2 Utlekkingskilde

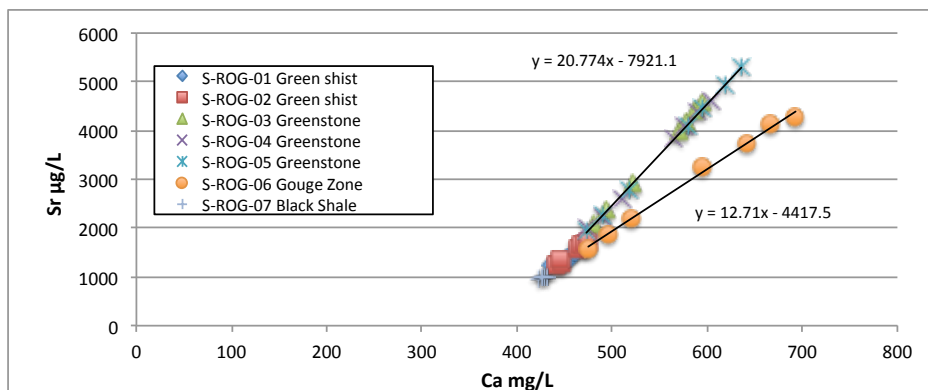
Svovel fordeler seg i to mineralgrupper, sulfat- og sulfid-mineraler hvor gips og pyritt er hoved-mineralene for disse to gruppene. Gips er lettløselig og løses i første steg den sekvensielle kjemiske analysene med kun vann, mens sulfidmineralene løses i den oksiderende løsningen i steg 5 og 6. Det er lite svovel eller kalsium som frigjøres i første steg. Kalsium frigjøres derimot til dels i steg 2. Dette tilsier at det er kalsiumkarbonat som frigjøres og utgjør hovedkilden til kalsium ved siden av steg 7 for grønnstein. Metaller som er tilknyttet silikatene, steg 7, og er ikke tilgjengelig for oppløsning. Siden Steg 7 løser kun opp silikatmineraler tilsier at det er et kalsiumsilikat mineral, hvilket kan være en aktinolit og epidot, hoved-mineralene i grønnstein fra XRD analysene.

Hoveddelen av utlekkningen vil være fra det finere knuste materialet da utlekkningen er en mineraloverflate prosess. Hvis vi antar at Norconsults 2017 (NO-110/YM) vurdering om ca 30% av sprengt materiale vil være under 20 cm i diameter, vil finkornet materiale (>75 µm) basert på siktanalyser av borekjerner knust i en kjefteknuser, være på under 0.5 vekt% av totalt utsprengt masse. Forholdet mellom kornfordeling av material knust i en kjefteknuser og sprengt materiale er dog ikke kjent. En lavere andel finknust materiale fra sprengningen relativt til knusningen vil resultere i mindre tilgjengelighet for mineraloppløsning. Dette bør derfor følges opp.

4.2.1 Saltvannsutlekkning

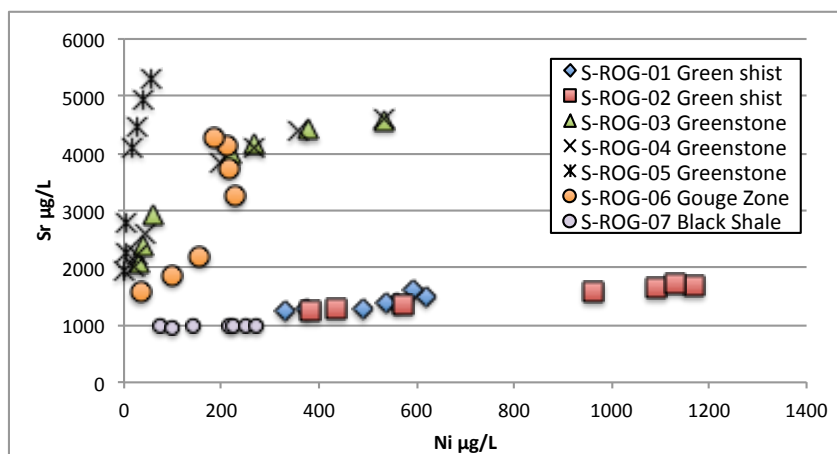
Strontium og kalsium er sterkt lineært korrelert i utlekkingsvannet og alle utlekkingsresultatene viser en tilsvarende korrelasjon, bortsett fra forkastningssonevannet (Figur 45). Magnesium, som også har høy løselighet i vannfasen viser ingen signifikant økning slik som kalsium. Dette kan tyde på at kalkspatt lages ut og kan være en hovedkilde til noen av sporelementene.

Forholdet mellom strontium og kalsium i vannet vil gjenspeile forholdet i kildemineralet. Den lave utlekkningen av kalsium og strontium i grønnskiferen tyder på et lavt innhold av kalkspat i grønnskiferen sammenlignet med de andre bergartene, hvilket er bekreftet ved syre-base analysene.



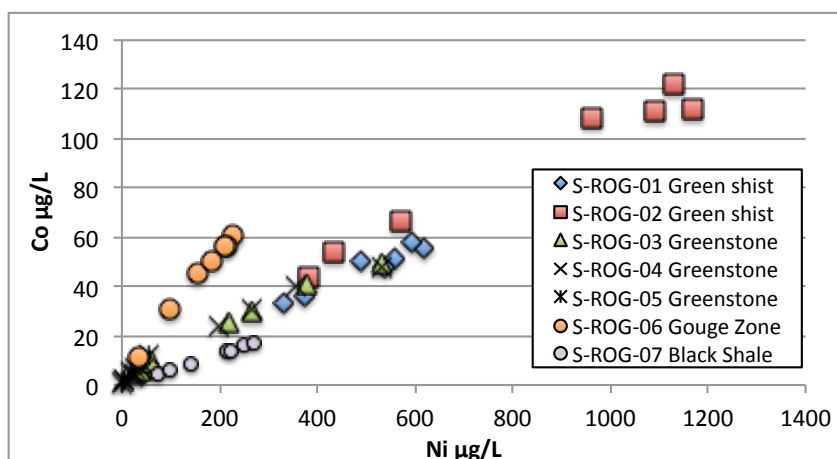
Figur 45. Kalsium vs. strontium fra saltvannskolonnene.

Det er en lav lineær korrelasjon mellom nikkell og strontium hvilket tyder på at nikkell ikke kommer fra kalkspatt oppløsningen (Figur 46). Kobolt er derimot lineært korrelert til nikkell og tyder på en felles kilde (Figur 47). Data fra sekvensiell kjemisk ekstraksjon tyder på at en vesentlig av nikkell og kobolt er knyttet til sulfidmineralene, men noe er også assosiert med jernhydroksider og absorbert til leirmineraler og silikatmineraler.



Figur 46. Nikkell vs. strontium fra saltvannskolonnene.

Grønnskifer og grønnstein viser sammen lineære korrelasjon og samme Ni:Co forhold, mens svartskifer og materialet fra forkastningssone har andre Ni:Co forhold (Figur 47). Dette kan tyde på at grønnstein og grønnskifer har samme bergartsutgangspunkt. Under omvandlingen fra original bergarten basalt er nikkell og kobolt blitt mer tilgjengelig ved at de nye mineralene er noe mer løselig i grønnskifer enn i grønnstein.



Figur 47. Nikkel vs. kobolt fra saltvannskolonnene.

Sink og til dels kadmium viser en kraftig utlekking rett etter fylling av saltvannskolonnene med påfølgende fall av konsentrasjoner (Figur 38). Dette kan tyde på at sink og kadmium blir avgitt fra mineraler som de er absorbert til eller oppløsning e.g av kalkspatt (CaCO_3). Dette stemmer også godt med de data fra sekvensiell kjemisk ekstraksjons analysene hvor betydelig andel av sink lages i andre steg, hvilket er oppløsning av kalsitt sammen med desorpsjon fra leirmineraler.

Etter denne raske avgivelsen av sink og kadmium synker konsentrasjonene hvilket kan tyde på adsorpsjon av sink og kadmium. Sink og kadmium adsorberes mer effektivt ved noe lavere pH enn kobolt og nikkel hvilket kan gi disse forskjellene. Dette er prosesser som kan være effektive inne i utfyllingen, men ikke nødvendigvis særlig effektiv under utfyllingen i sjøvannet da mineralene ikke er like tilgjengelige for adsorpsjon under fyllingen med stor tilgang på vann sammenlignet med de små kolonne-eksperimentene. Etter utfylling vil disse prosessene kunne være av betydning inne i fyllingsområdet.

4.2.2 Ferskvannsutlekking

De fleste kinetisk test kolonnene viser høyere sulfat i lakvannet for de første ukene relativt til senere prøver. Det er dog adskillig høyere utlekking i kolonnen med knusningsbergarten relativt til grønnskifer og igjen mye lavere utlekking fra grønnstein og svartskifer enn de andre to bergartene. Grønnstein og svartskifer har lite eller ingen sulfat svovel, mens grønnskifer og svartskifer har noe sulfat-svovel. Dette tyder på at det høye sulfatinholdet i begynnelsen kommer fra gips. Kalsium har en tilsvarende utlekkingstrend som sulfat.

4.3 Klassifisering i forhold til Miljødirektoratets veiledere

Miljødirektoratet har laget en veileder for klassifisering av forurenset grunn basert på totalinnhold av komponenter i sedimentene TA2553/2009, Helsebaserte tilstandsklasser for forurenset grunn (Tabell 13). Denne klassifiseringen forutsetter dog at grunnen er forurenset av eksterne kilder, mens det materialet som tas ut ikke er å regne som forurenset,

men kan betraktes som overskuddsmateriale etter tunneldrift med alternativ bruksområdet, utfylling.

TILSTANDSKLASSE FOR FORURENSET GRUNN mg/kg					
Tilstandsklasse	1	2	3	4	5
Beskrivelse av tilstand	Meget god	God	Moderat	Dårlig	Svært dårlig
Øvre grense styres av	Normverdi	Helsebaserte akseptkriterier	Helsebaserte akseptkriterier	Helsebaserte akseptkriterier	Nivå som anses å være farlig avfall
Arsen (As)	<8	8 – 20	20 – 50	50 – 600	600 – 1000
Bly (Pb)	< 60	60 – 100	100 - 300	300 - 700	700 – 2500
Kadmium (Cd)	< 1,5	1,5 - 10	10-15	15 - 30	30 – 1000
Krom, total (Cr)	< 50	50 - 200	200 - 500	500 - 2800	2800 - 25000
Kobber (Cu)	< 100	100 - 200	200 - 1000	1000 - 8500	8500 – 25000
Kvikksølv (Hg)	<1	1-2	2-4	4-10	10 – 1000
Nikkel (Ni)	< 60	60 - 135	135 - 200	200 - 1200	1200 – 2500
Sink (Zn)	< 200	200 - 500	500 - 1000	1000 - 5000	5000 – 25000

Tabell 13. Tilstandsklasser for forurenset grunn i henhold til Miljødirektoratets veileder TA 2553/2009. Konsentrasjoner i mg/kg.

Det er et spørsmål om dette er den rette bruk av dette tilstandsklasse dokumentet, da bergartene som er planlagt er naturlige bergarter. Miljødirektoratet har laget kriterier for tilstandsklasser også for marine bunnsedimenter (M608/16) (Tabell 14).

TILSTANDSKLASSE FOR MARINE BUNNSEDIMENTER mg/kg					
Parameter	Klasse I	Klasse II	Klasse III	Klasse IV	Klasse V
Arsen (As)	15	18	71	580	>580
Bly (Pb)	25	150	1480	2000	2000-2500
Kadmium (Cd)	0,2	2,5	16	157	>157
Kopper (Cu)	20	84	84	147	>147
Krom (Cr)	60	660	6000	15500	15500-25000
Kvikksølv (Hg)	0,05	0,52	0,75	1,45	>1,45
Nikkel (Ni)	30	42	271	533	>533
Sink (Zn)	90	139	750	6690	>6690

Tabell 14. Tilstandsklasser for forurenset marine bunnsediment i henhold til Miljødirektoratets veileder M608/16. Konsentrasjoner i mg/kg.

Bergartsprøvene analysert for denne studien viser at de ligger i klasse 1 og 2 (Tabell 15) for forurenset grunn bortsett for nikkell som er i klasse 3, og følger analysene utført av Norconsult, (2017, NO-110-YM), hvor alle prøvene var klasse 1 og 2. Nikkellkonsentrasjonen er omtrent det dobbelte av tilstandsklasse 2 for bunnsedimenter (M608/16), men er i tilstandsklasse 2 for forurenset grunn (NO-110-YM). Sekvensiell kjemisk ekstraksjonsanalysene viser at en betydelig andel av nikkell finnes i silikatmineralene (ca 40 %) og noe mindre i sulfid mineralene. Dette tilsier at tilgjengelighetene av nikkell er svært lav for om det deponeres i sjøvann hvor pH kontrolleres av den store mengde havvann hvor både sulfid og silikat mineralene har lav oppløsningsgrad/reaksjonshastighet (se kapittel 5.4 og 5.5). Denne type tilstandsklassifisering er derfor lite egnet for den type masser som tas ut av veitunnel.

TOTALKONSENTRASJON FAST STOFF ANALYSER					
ELEMENT	Grønnstein	Grønnskifer	Svartskifer	Veiet gjennomsnitt	
Antall analyser	26	26	3	Fargekode forurenset bunnsediment	Fargekode forurenset grunn
Arsen As	<10	23	27	16	16
Bly Pb	<20	<20	<20	<20	<20
Kadmium Cd	<10	<10	<10	<10	<10
Krom Cr	180	103	39	147	147
Kobber, Cu	72	54	53	66	66
Kvikksølv Hg	¹ 0,0036	¹ 0,017	0,028	0.010	0.010
Nikkel Ni	96	84	89	93	93
Sink Zn	88	85	64	87	87

Tabell 15. Totalkonsentrasjon av utvalgte elementer hvor det er satt miljøkrav. Konsentrasjonene er gitt i mg/kg tørrprøve og analysert utfra firesyre oppløsning og ICP-OES av oppløsningen for alle elementene bortsett fra arsen som er analysert fusion ICP og kvikksølv ved bruk av AA (se metode kapittel 3 for detaljer). ¹Mange av analysene for disse elementene er under deteksjonsgrensen. Siste to kolonner viser et veiet gjennomsnitt med fargekode for forurenset bunnsedimenter (M608/2017) og forurenset grunn (TA 2553/2009); blå-meget god; grønn-god; gul-moderat.

Dette vil tilsi at bergartsmassene kan brukes som fyllmasser slik som planlagt. Da klasse to også aksepteres for bruk til bolig, barnehage etc. vil dette tilsi at det utfylte området også kan utnyttes til boligområdet (i forhold til forurensings-problematikken i fyllmasser) om det skulle være ønskelig. Da overskuddsmassene er naturlig bergarter uten prosessering og ikke forurensete masser er det derfor viktig å vurdere massene relativt til utlekkingspotensialet.

4.4 Utlekkingsnivå i forhold til Miljødirektoratets veiledere, marine sedimenter

Veilederen for karakterisering av tildekkingsmateriale for forurenset grunn, Miljødirektoratet (M-411-15) er den nærmest veilederen som kan brukes relativt til det utfyllingsmaterialet som kommer fra Boknafjordtunnelen. Arsen, bly, kadmium, kopper, krom, kvikksølv, nikkel og sink er de potensielt farlige elementer som det fokuseres på med hensyn på bergarters utlekking. I de påfølgende vurderinger brukes veilederen M-608-16, for utlekkingskriterier basert på ristetest og oppstrøms utlekkingstest fra M-411-15.

Resultatene fra saltvannsutlekkingsstestene er kalkulert basert på beregningsmåten ristetest dvs standard metode og initial utlekking (Tabell 16) med vann til fast stoff forhold 10. Resultatene er sammenlignet med LS10 grenseverdi for tilstandsklasse III for den initiale utlekkingen (ristetest) og den stabile utlekkingen (oppstrøms kolonnetest) (Miljødirektoratets veileder M608/2016). Dette viser at alle tre bergartene er under grenseverdiene for denne tilstandsklassen for både den initiale utlekkingen og for den stabile fasen for et materiale som skal brukes som tildekking av forurensete masser. Det er ikke satt noen spesifikke akseptkriterier for bergartsmateriale som skal brukes for marine utfyllinger derfor brukes akseptkriteriene for marine sedimenter.

SALTVANNSUTFYLLING					
ELEMENT	BESKRIVELSE	Grønnstein	Grønnskifer	Svartskifer	L/S10 grense klasse III/II
Arsen	Noe utlekking i begynnelsen, men	0.016	0,023	0,02	8,5

As µg/L	avtagende til under deteksjonsgrensen (0.5 µg/L) for svartskifer og grønnstein. Noe utlekking i begynnelsen (første døgn) ingen signifikant forandring etter dette.	nd	0,013	nd	0,6
Bly Pb µg/L	Under deteksjonsgrensen (0.3 µg/L) for alle analyser bortsett fra noen få sprette prøver som er nær deteksjonsgrensen.	nd nd	nd nd	nd nd	14 1,3
Kadmium Cd µg/L	Grønnstein og svartskifer har avtagende konsentrasjon etter initial utlekking. Grønnskifer viser utlekking den første måneden etter dette stabil konsentrasjon.	nd 0,003	0,20 0,020	nd 0,006	0,45-1,5 0,2
Kobber Cu	Opp til 1 µg/L laket ut i begynnelsen fra laae tre bergarter, dette falt ned til deteksjonsgrensen (0.1 µg/L).	nd nd	nd nd	nd nd	2,6 2,6
Krom Cr µg/L	Under deteksjonsgrensen (0.1 µg/L) for alle analyser bortsett fra noen få sprette prøver som er nær deteksjonsgrensen.	nd nd	nd nd	nd nd	36 3,4
Kvikksølv Hg µg/L	Avtagende konsentrasjoner over tid og under deteksjonsgrensen (0.002 µg/L) etter 1 måned.	nd nd	nd nd	nd nd	0,07 0,047
Nikkel Ni µg/L	Alle bergarter viser utlekking de første 10-30 dager etter dette stabil konsentrasjon uten videre økning. Størst utlekking fra grønnskifer hvor i stagnerende vann konsentrasjoner kan bygges opp til konsentrasjoner nær 1 mg/l i disse testene.	6,9 nd	21 0,22	9,8 nd	34 8,6
Sink Zn µg/L	Initial utlekking de første dager, etter dette en avtagende konsentrasjon for alle tre bergarter.	0,68 nd	2,3 nd	0,74 nd	6 3,4

Tabell 16, beregnet utlekking fra den initiale perioden til stabil langtidsutlekking. Beregningene er basert på saltvannskolonnetestene for grove materialer. Siste kolonne gir akseptkriterier for ristetest (initial utlekking) og oppstrøms-kolonnetesting (stabilisert utlekking) fra M608-.

Beregningene er basert på at konsentrasjonene etter 7 dager er brukt for den initiale utlekkingen med vann-bergartsforhold på 10 og utlekking skjer fra 30% av massene (prosentandel finknust material). Hvis det var brukt konsentrasjoner etter 24 timer ville det vært noe utlekking for kobber og bly ved disse beregningene, men dog godt under det som er satt som akseptkriteriet for den initiale utlekkingen. Ved å bruke konsentrasjonene ved 24 timer ville nikkelskonsentrasjonen vært lavere.

De kinetiske testene har kun vært kjørt i 13 uker. Den lave sulfidkonsentrasjonen og relativt høye nøytraliserings potensialet av karbonater og silikater gjør at det er lite sannsynlig med økende sulfidoksidationsrate for grønnstein, men noe mer usikkerhet for grønnskifer og svartskifer. Testene er alle blitt tilført 1 liter avionisert vann ukentlig uansett materialmengde. For å kunne sammenligne utlekkingsrater ble dette normalisert til utlekking per kg masse. Gjennomsnittlig utlekking over de siste 5 uker (uke 9-13) er så blitt brukt for å beregne utlekking relativt til saltvannskriteriene beskrevet ovenfor (Tabell 17). Bruk av saltvannskriteriet vil være det mest naturlige da disse massene blir plassert slik at saltvann er resipienten for mulig avrenning.

UTFYLLING OVER HAVFLATEN

ELEMENT	BESKRIVELSE	Grønnstein	Grønnskifer	Svartskifer	L/S10 grense klasse III/II
Arsen As µg/L	Økende utlekkingsrate for de første 7-8 ukene og deretter relativt konstant, grønnstein rundt 1/10 av grønnskifer. Svartskifer gir lav utlekking hele tiden.	0,09 0,04	0,12 0,43	0,02 0,02	8,5 5
Bly Pb µg/L	Grønnstein og grønnskifer har lave konsentrasjoner de første ukene som går ned til og under deteksjonsgrensen (0,01 µg/L). Svartskifer gir svakt økende utlekking, 0,2 µg/L for uke 10)	0,02 0,002	0,04 nd	0,01 0,1	14 1,2
Kadmium Cd µg/L	Grønnstein laker lave eller under deteksjons-grensen (0,002 µg/L), men grønnskifer har lave, men noe utlekking gjennom all 10 uker. Svartskifer laker betydelig mer første uke enn de andre bergartene 0,2 µg/L som faller til 0,02 µg/L.	0,02 0,0002	0,008 0,002	0,01 0,25	0,45-1,5 0,2
Krom Cr µg/L	Krom viser noe høyere avrenning i begynnelsen 0,05-0,08 µg/L, med jevnt avtagende konsentrasjon til litt over 0,01 µg/L.	0,013 0,002	0,012 0,002	0,014 0,025	36 3,6
Kobber Cu µg/L	Det er en svak utlekking av kobber gjennom hele testperioden for grønnstein og grønnskifer, men svartskifer viser en svak økning.	0,086 nd	0,058 0,040	0,033 0,42	2,6 2,6
Kvikksølv Hg	Under deteksjonsgrensen (0,002 µg/L) for alle analysene.	nd nd	nd nd	nd nd	0,07 0,047
Nikkel Ni µg/L	Sterkt fall i utlekking fra uke 1 til uke 2 for grønnskifer, lav utlekking fra grønnstein fra første uke. Økende utlekking fra svartskifer de første 10 uker, fall i siste uke.	0,16 0,03	3,8 0,09	10,1 30,4	34 8,6
Sink Zn µg/L	Sink utlekket med betydelig høyere konsentrasjon i første uke, og faller kraftig til neste uke.	3,9 nd	2,2 0,08	0,44 24	6 3,4

Tabell 17. Beregnet utlekking µg/L fra kortidstesting til stabil langtidsutlekking for kinetiske kolonnetester. Siste kolonne gir akseptkriterier for ristetest (initialt utlekking) og oppstrøms-kolonnetesting (stabilisert utlekking) for marine sedimenter (M-608-17).

Resultatene av beregningen LS10 akseptkriterier metoden viser at svartskifer potensielt overskrider ferskvannskriteriet for stabilisert utlekking for nikkel, kadmium og sink. Grønnstein og grønnskifer er under disse kriteriene for både sink og nikkel og utgjør klart den største andelen av utfyllingsmassene.

For å redusere potensiell utlekking fra deponiområdet vil det være naturlig å håndtere svartskifer spesielt. Svartskifer kan plasseres i et designert området under havflaten da testene tyder på at utlekking i sjøvann er betydelig lavere enn i ferskvann med luft tilgang. En overdekking med grønnstein vil være det beste basert på de tre hovedbergartene som er vurdert i denne utredningen.

5 KONKLUSJONER

5.1 Observasjoner

- Borekjernene viser noen få lag med svartskifer i tilknytning til grønskifer.
- Borekjerneene dekker kun mindre deler av den planlagt tunneltraseen og er potensielt ikke representativt for massene som skal drives ut. Det er derfor nødvendig å kartlegge dette etter hvert som tunnelene drives for å verifisere forutsetningene og resultatene i denne rapporten.
- Det er en del leirmineraler og kull som vil flyte på overflaten er periode. Leirmineralene vil relativt raskt synke pga bølgeaktivitet. Kullbiter kan potensielt lang-transporteres.

5.2 Klassifisering relativt til forurenset grunn og bunnsedimenter

- Tunnelmaterialet er naturlige bergarter som sprenges ut i forbindelse med bygging av veitunnel. Klassifisering i henhold til forurenset grunn eller bunnsedimenter blir derfor noe feil da tunnelmaterialet er blokkstein med mindre mengder finmaterialet. Materialet som tas ut kan heller regnes som bakgrunns-verdier da grønnstein og grønskifer forekommer naturlig på Kvitsøy.
- Ved bruk av tilstandsklassifiseringen vil en samlet bergart klassifiseres som II ved plassering over havet relativt til veileder TA2553/2009.
- Ved tilstandsklassifisering for bunnsedimenter klassifiseres en samlet bergart som III, pga noe høyt nikkelinhold (M-608-16). En betydelig del av nikkelet er bundet til silikatmineraler og er ikke tilgjengelig for utlekking slik at klassifisering i kategori II vil være mer riktig. Konsentrasjonene er dog såpass over normverdiene at de som sediment ikke kan klassifiseres innen Normverdien (klasse I) når analysene er basert på knust og malt materiale. Derfor er laktesting utført for neste steg i vurderingen av massene.

5.3 Metallutlekking ved plassering over havflaten

- Omtrent halvparten av bergartene er potensielt syredannende. Videre testing har så langt vist at samleprøvene brukt i langtidstester etter tre måneder ikke er syredannende, sannsynligvis pga syrenøytraliserende egenskaper ved silikatmineraler i tillegg til karbonatmineraler. De er dog kun kjørt i 13 uker. Det er mulig at de mikrobiologiske prosesser ikke har kommet riktig i gang pga den relative høye pH (svakt surt lekkevann).
- Avgivelsen av sulfat fra kinetiske tester er meget lav hvilket tyder på lite sulfid oksidering.
- Høy andel av organisk karbon vil begrense muligheten for oksidering av sulfidmineraler i svartskifer.

- Metallutlekkingen er klassifisert i forhold til ristetest for kort og langtidstesting tilsier at grønnskifer ligger i klasse II, mens svartskifer overskrider klasse II for nikkel, kadmium og sink i langtidsutlekkning.
- Svartskifer bør derfor behandles spesielt.

5.4 Metallutlekkning ved plassering i sjøvann

- Hoveddelen av metallutlekkingen vil foregå i forbindelse med utlegging av massene. De aller fleste av de potensielt farlige elementene lages ikke ut eller i svært liten grad etter de første 2-4 ukene.
- Klassifisering ved bruk av kravene brukt i forbindelse med ristetest og oppstrøms-kolonnetesting for tildekning av forurensende bunnsedimenter vil tilsa at bergartene ligger i klasse II (M608/2017) for alle elementer fokusert på i denne vurderingen: As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb og Zn, hvilket tilsier at bergartsmaterialet som er prøvetatt ville kunne brukes for overdekning av forurensede bunnsedimenter basert på utlekkingskriteriene.
- Det er usikkerheter knyttet til kornfordelingen i sprengte masser med kornstørrelse <20 mm sammen lignet med knuste prøver fra borekjerner. Dette bør følges opp.
- Bergartsfordeling er også et usikkerhetsmoment som bør følges opp for å verifisere at det materiale som har vært brukt for disse vurderingene er i tråd med det som tas ut av Boknafjordtunnelen.

6 REFERANSER

- CEN/TR 16363, 2012: Characterization of waste - Kinetic testing for assessing acid generation potential of sulfidic waste from extractive industries, CEN/TC 292 WG8.
- CEN/TR 16376, 2012: Characterization of waste - Overall guidance document for characterization of wastes from the extractive industries, CEN/TC 292 WG8.
- Dold, B. 2003: Speciation of the most soluble phases in sequential extraction procedure adopted for geochemical studies of porphyry copper sulfide mine wastes. *Jour. Geochem. Explor.* 80, 55-68.
- EN 15875, 2010: Characterization of waste. Static test for determination of acid potential of sulfidic waste. CEN/TC 292 WG8
- EN 14405, 2002: Characterisation of waste: Leaching behavior tests – up-flow percolation test, CEN/TC 292 WG6
- EN 12457-3, Characterization of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges. Two step leaching.
- EU Mine Waste Directive, 2006: Directive 2006/21/EC of the European parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC
- Fjermestad, H., Hagelia, P. og Thomassen, T., 2017; Utlekkingsforsøk med svartskifer fra Rv. 4, Hadeland. Statens Vegvesen Rapport serie , nr 665, 71pp
- FOR 2004-06-01 nr 930: Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall (avfallsforskriften). Sist oppdatert FOR-2012-06-15-542
- Hagelia, P. og Fjermestad, 2016; Bruk av XRF på bergarter for vurdering av miljørisiko. Statens Vegvesen Rapport serie , nr 516, 45pp
- M-411 - 2015 Miljødirektoratet. Testprogram for tildekkingsmasser, Forurenset sjøbunn (oppdatert pr. august 2017).
- M-608 – 2016, Miljødirektoratet. Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota.
- Norconsult, 2017: Geologi i tunneltraseen og metallinnhold, Rogfastprosjektet. Dokument nr. NO-110-YM. 35 pp
- Saintot, A. og Solli, A. 2011, Geological investigations by drill core logging for the Rogfast tunnel project. NGU Report 2011.034, pp 71.
- Sollie, A. and Nordgulen, Ø., 2014: Geological investigations for the ROGFAST project in the area between Kvitsøy and Bokn. NGU report 2014.054.
- Pabst, T., Hindar, A., Hale, S., Garmo, Ø., Endre, E., Petersen, K., Bækken T., og Baardvik, G., 2015: Bergarters potensielle effekter på vannmiljøet ved anleggs-virksomhet. Statens Vegvesen Rapport serie , nr 389, 100 pp.
- TA 2553/2009, 2009: Helsebaserte tilstandsklasser for forurenset grunn, Miljødirektoratet, 30 pp.
- Walder, I.F. 2014: Sub-sea tailings deposition evaluation guideline – prSN/TR-9432. Norsk Bergindustri, Report No 2. 110 pp.
- TA2715, 2010: Bergverk og avgangsdeponering, status, miljøutfordringer og kunnskapsbehov. Miljødirektoratet – Klif rapportserie. 109 pp.
- ISO 17294-1, 2004: Water quality - Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) - Part 1: General guidelines. International Organization for Standardization.
- ISO 17294-2, 2016: Water quality -- Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) - Part 2: Determination of selected elements including uranium isotopes. International Organization for Standardization.

ISO 11885, 2006: Water quality -- Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). International Organization for Standardization.

ISO 17852, 2006: Water quality -- Determination of mercury -- Method using atomic fluorescence spectrometry. International Organization for Standardization.