

UTFORDRINGER MED SVARTE LEIRSKIFERE; MELLOMLAGRING OG NATURLIGE BLANDMASSER

Challenges with black shale: temporary storage and naturally mixed masses

Frøydis Meen Wærsted (NGI), Halldis Fjermestad (SVV), Christian Totland (NGI), Marion Børresen (NGI), Gøril Aasen Slinde (NGI), Caroline Berge Hansen (NGI), Elisabeth Tønnessen (NGI), Per Hagelia (SVV), Lars Erstad (UiO/Sweco), Gunvor Baardvik (NGI).

SAMMENDRAG

Det er planlagt flere store byggeprosjekt i Oslo-regionen de neste årene. Dette vil resultere i utgraving av potensielt syredannende svart leirskifer i volumer som er større enn kapasiteten til godkjente deponier. NGI har et internt forskningsprosjekt «Under Oslo» som fokuserer på innovasjon, bærekraft og økonomi knyttet til underjordiske byggearbeider. Delprosjekt 1 omhandler svarte leirskifere.

Svarte leirskifre er sedimentære bergarter med høyt innhold av sulfider, organisk materiale, tungmetaller og naturlig forekommende radionuklider. Riktig håndtering under prosjektgjennomføring og korrekt varig lagring av utgravde masser er avgjørende for å unngå forvitring og sur avrenning, som kan føre til skader på konstruksjoner og miljø.

Mellomlagring kan være nødvendig for logistiske formål og for å gi mulighet for forsvarlig karakterisering av utgravde masser, mens langvarig midlertidig lagring kan gi negative effekter på miljøet. For å få bedre forståelse av tidsforløpet i forvitring og syredanning, er det samlet inn historiske data og startet opp utlekkingseksperimenter i konteinere. Tilgjengelige data fra storskala forsøk så langt indikerer at det går mer enn ett år før forvitring av frisk (uforvitret) skifer gir sur utlekking. Basert på disse dataene anbefales maksimum 6 måneder mellomlagring av uforvitret skifer – fordelt på byggeplass og deponi.

Ved sprengning og utgraving kan det å skille svartskifer fra omkringliggende steinmasser være vanskelig, noe som resulterer i store mengder masser med en mindre andel svartskifer. De syredannende egenskapene til slike blandede masser er vanskelig å fastslå, og som følge av dette havner store mengder potensielt trygge masser på deponi. Konteiner- og kolonneforsøk med opptil 20 % innhold av alunskifer har etter 2 år ingen pH senkning, men det kan ikke utelukkes at dette vil komme på et senere tidspunkt. Ledningsevne og metallinnhold i avrenningen øker med økende skiferinnhold og tyder på høyere reaktivitet.

Den aller beste håndteringen av svartskifer er å la den ligge uforstyrret i bakken. Kan man planlegge prosjekter slik at man tar ut minst mulig potensielt syredannende berg?

SUMMARY

NGI's internal R&D project "Under Oslo" focuses on innovation, sustainability and economy related to underground construction work. WP1 is "Black shale". Several large construction activities are planned in the Oslo region in the coming years. This will result in excavation of potentially acid-producing black shales in volumes larger than the capacity of the approved disposal sites.

Black shales are sedimentary rocks with a high content of sulphides, organic matter, heavy metals and naturally occurring radionuclides. Proper handling during project execution and permanent storage of excavated masses is crucial to avoid acid rock drainage (ARD), which can lead to extensive damage on structures and the environment.

Temporary storage may be necessary for logistical purposes and to allow for proper characterization of excavated masses, but long-term temporary storage can give negative effects on the environment. To evaluate time before onset of ARD from alum shales, WP1 has gathered historical data and started container experiments. The available data from large scale experiments indicate that more than one year of weathering is necessary before onset of ARD from unweathered alum shale, and a recommendation of max. 6 months (in total at construction site and disposal site) is given.

During excavation, separation of black shales from surrounding rock masses may be difficult, resulting in large amounts of masses with a minor fraction of black shales. The acid-producing properties of such mixed masses is uncertain, and as a result large amounts of potentially safe masses end up at disposal sites. Container and column experiments with content of alum shale up to 20 % have no decrease in pH after two years, but this might still happen at a later time point. Conductivity and metal content in the leachate increases with increasing alum shale content and indicate higher reactivity.

The best way to handle black shales is to leave it undisturbed in the ground. Can projects be planned to minimize the amount of potentially acid-producing rock that is taken out?

INNLEDNING

Svarte leirskifre, som f.eks. alunskifer, er sedimentære bergarter med høyt innhold av sulfider, organisk materiale, tungmetaller og naturlig forekommende radionuklider. Riktig håndtering under prosjektgjennomføring og korrekt varig lagring av utgravde masser er avgjørende for å unngå forvitring og sur avrenning, som kan føre til skader på konstruksjoner og miljø.

Det syredannende potensialet (AP, acidification potential) til svartskifer stammer fra sulfider og estimeres ofte fra totalt svovelinnhold i steinen. Det nøytraliserende potensialet (NP, neutralizing potential) vil hovedsakelig komme fra karbonater i steinen og estimeres med innhold av totalt uorganisk karbon (TIC). Forholdet mellom AP og NP er viktig for å vurdere om steinmasser er potensielt syredannende.

I dette arbeidet har vi fokusert på potensielt syredannende svartskifer i den kambrosiluriske lagrekken, og resultatene er ikke nødvendigvis overførbare til andre typer syredannende stein. Videre er forsøkene utført på masser med kornfordeling som sprengestein, og masser med mindre kornstørrelse, som for eksempel tunnelboremasser, kan reagere raskere.

Kontainerforsøkene er overtatt av SFF earthresQue ved NMBU og vil bli prøvetatt fram til 2028 som en del av senteret.

Mellomlagring

Mellomlagring av utsprengte masser av svartskifer fra anleggsarbeid er ofte logistisk nødvendig, både fordi transport kanskje ikke kan skje med en gang men også for å gi tid til å karakterisere massene. Karakterisering er nødvendig for å fastslå om massene er syredannende og må på deponi. Samtidig kan lengre tids mellomlagring gi problemer med sur avrenning, og i noen tilfeller har man opplevd at massene får varmgang. Dette skyldes at de syredannende prosessene (forvitringen av sulfider) i massene er eksoterme, det vil si at de utvikler varme.

Anbefalingen i veileder M-310 fra Miljødirektoratet (2015) var at mellomlagring før massene ble sendt til deponi skulle være maksimalt 8 uker. Det ble foretatt strenge tolkninger av forurensingsforskriften som medførte at det ble beskrevet tildekking med presenning og tilsvarende løsninger i denne perioden. For å skaffe bedre grunnlag for denne anbefalingen, og

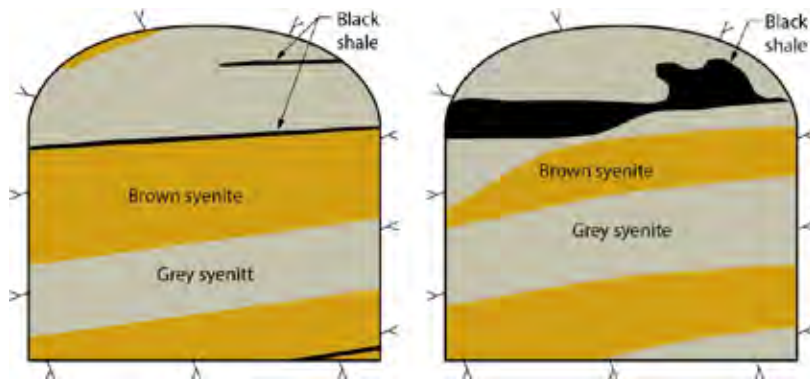
vurdere om den burde endres, samlet vi inn data fra kjente tilfeller hvor svartskifer har blitt utsatt for naturlige værforhold og avrenningen har blitt prøvetatt og kontrollert. I tillegg satte vi opp egne forsøk med svartskifer i containere som står åpne for regn og luft.

Vi jobber her med nylig utsprengte, uforvitrede masser av svartskifer. Masser som har ligget utsatt for vann og luft i lengre tid og allerede er forvitret kan gi sur avrenning med en gang og bør ikke mellomlagres.

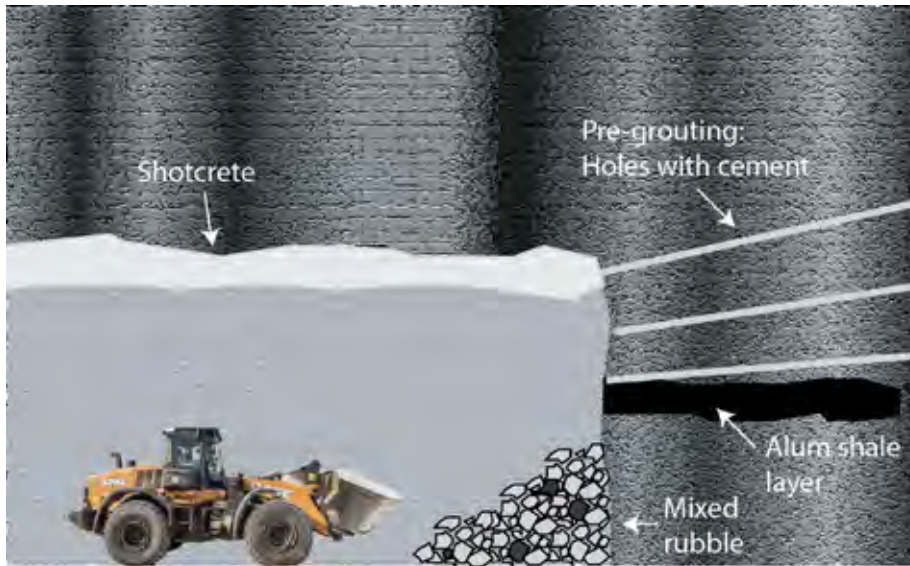
Naturlige blandmasser

Når man tar ut svartskifer, er det ønskelig å ta ut disse separat fra andre masser, slik at man slipper at rene masser fra andre bergarter også må sendes på deponi for svartskifer. Dette er allikevel ikke alltid praktisk mulig.

Tunneldriving med boring eller sprengning gjør det vanskelig å sortere massene (Figur 1 og Figur 2). Resultatet er at store mengder masser ender opp på deponi for svartskifer, selv om de kun inneholder en mindre andel svartskifer. De syredannende egenskapene til slike blandede masser er usikre og man risikerer å sende masser som kunne vært nyttiggjort lokalt til deponi. Dette har store økonomiske konsekvenser, samt miljøeffekter relatert til transport, arealbruk og uttak av jomfruelige masser for å erstatte massene kjørt til deponi. På den annen side er det viktig å håndtere faktisk syredannende masser på riktig måte, for å unngå skader på miljø og infrastruktur.



Figur 1 Eksempel på ingeniørkartlegging av stoffen i en tunnel. Svartskifer er illustrert med svart og foreligger her som tynne lag i hovedsakelig grå og brun syenitt.



Figur 2 Lengdesnitt av tunnel under driving som illustrerer hvordan massene som sprenges ut naturlig blir en blanding av bergartene som finnes i tverrsnittet. Figuren viser borhull for forinjeksjon, lag med svartskifer (her alunskifer) og blandede masser etter sprengning.

Større grad av gjenbruk av materialer med en lav andel svartskifer er ønskelig, både fra et økonomisk og et bærekraftsperspektiv. I tillegg er kapasiteten til deponier i Norge med tillatelse til å ta imot svartskifer begrenset. For å øke gjenbruk må vi være sikre på at massene ikke er syredannende eller forurensner over tillatte grenseverdier.

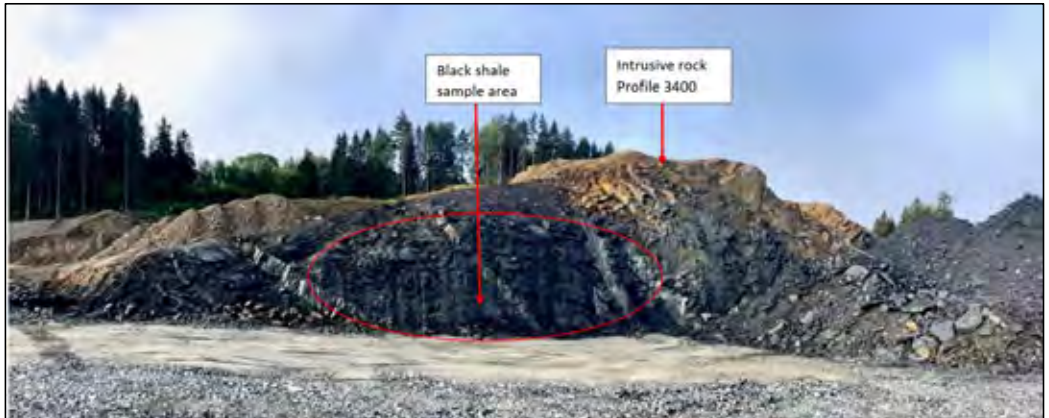
For å undersøke utlekking fra og syredanning i blandede masser med svartskifer ble det satt opp kontainerforsøk og kolonneforsøk. Effekten av kornstørrelse ble også vurdert, ettersom dette er viktig for reaksjonshastigheten.

Det er viktig å understreke at det ikke er aktuelt å fortenne svartskifermasser med andre masser. Fortynning av en forurensning er ikke lov.

FORSØKSOPPSETT

Masser brukt til kolonneforsøk og kontainerforsøk satt opp av NGI

Alunskifermasser brukt til å sette opp forsøk kom fra byggingen av nye E16 mellom Eggemoen og Olum (Figur 3). Alunskifer fra etasje 2 og 3a i den kambro-siluriske lagrekken ble sprengt ut 17.09.2020 og transportert til NGI 21.09.2020. Massene ble gitt til forskningsprosjektet av Skanska.



Figur 3. Skjæring på E16 på Kleggerud på Jevnaker for uttak av masser brukt til container- og kolonneforsøk satt opp høsten 2020. Foto: Andreas Harstad, Skanska AS.

Rombeporfyr fra Bjønndalen Bruk i Nittedal (Feiring AS) ble brukt til blanding med alunskifer for å undersøke utlekking fra blandmasser. Rombeporfyr er ansett for å være stabil, og ble valgt ettersom den geologisk ligner syenitt (mænaitt) som ofte finnes som intrusiv bergart i alunskifer. Dette kan sees på i Figur 3, hvor den intrusive bergarter som er markert er mænaitt. Ved konstruksjonsarbeider i et slikt område vil man da få ut blandede masser av alunskifer og syenitt som er vanskelig å skille (se Figur 2 og Figur 6).

Kolonneforsøk satt opp av NGI i 2020

Kolonneforsøk med alunskifer fra E16 på Kleggerud og rombeporfyr fra Bjønndalen Bruk ble satt opp for å undersøke effekt av andel alunskifer og kornstørrelse på utlekking og syredannelse. Kolonnene var åpne (umettede) og ble vannet uregelmessig (periodevis daglig eller ukentlig, noen ganger med lengre tørre perioder) med 500 mL per vanning. De har nå stått i omtrent to år.



Figur 4 Oppsett kolonneforsøk NGI.

Tabell 1 Kornstørrelse og andel alunskifer i kolonneforsøk. Prosentandel som ikke er alunskifer er rombeporfyr.

Kolonne #	Kornstørrelse (mm)	% alunskifer (v/v)
1	0-22	10.0
2	22-32	10.7
3	32-50	10.7
4	0-22	3.3
5	0-22	7.0
6	0-22	20.1
8	0-22	100
9	0-22	0

Kontainerforsøk satt opp av NGI i 2020

Kontainerforsøk med alunskifer fra E16 på Kleggerud og rombeporfyr fra Bjønndalen Bruk ble satt opp for å undersøke effekter av mellomlagring og naturlige blandmasser (Figur 5). Kontainerne har ca. 200 L sprengt stein med ulike blandingsforhold mellom alunskifer og rombeporfyr (Tabell 2, Figur 6) og står åpne slik at regnvann renner gjennom steinmassene og samles opp i en dunk på utsiden. Dette vannet prøvetas så for analyse. Kontainere ble startet høsten 2020 og skal overvåkes til 2028 som en del av earthresQue senter for forskningsbasert innovasjon ved NMBU.



Figur 5 Oppsett for kontainerforsøk. Toppen av kontainerne er kuttet av, og regnet renner fritt gjennom steinmassene i kontaineren, og ut i slangen til dunken på utsiden. Vannet i dunken samles inn til analyser.

Tabell 2 Kontainerforsøk satt opp av NGI for å undersøke effekter av mellomlagring og blandmasser. Alle blandinger ble satt med to replikater, f.eks. RM_1 og RM_2.

Navn	Alunskifer (%)	Rombeporfyr (%)
RM – Rombeporfyr	0	100
B5	5	95
B10	10	90
B20	20	80
VAS – Alunskifer	100	0



Figur 6 Innholdet i kontainer B5_1 (5 % alunskifer og 95 % rombeporfyr før (venstre) og etter (høyre) blanding av massene.



Figur 7 Kontainerforsøk etter flytting til NOAH Langøya våren 2022.

Kontainerforsøk satt opp av Statens Vegvesen i 2014 og 2015

Statens vegvesen satte i 2014 og 2015 opp kontainerforsøk med alunskifer og galgebergskifer fra tunnelbyggingen på riksvei 4, Gran, Hadeland (Figur 8). Disse kontainerne ble prøvetatt i en periode på opptil 9 måneder av SVV (Statens vegvesen, 2017), og videre av to masterstudenter ved UiO i 2016 (Børresen, 2017; Erstad, 2017). I oktober 2020 ble fem av disse kontainerne tilbudt til NGI og prøvetakingen ble gjenopptatt, se Tabell 3. Merk at det er lange gap i prøvetakingshistorikken for disse kontainerne. Kontainerne overvåkes til 2028 som en del av earthresQue senter for forskningsbasert innovasjon ved NMBU.

Kontainerne er satt opp relativt likt som ble satt opp på NGI i 2020. For detaljer rundt oppsettet, se Statens vegvesens rapport 665 (2017).



Figur 8 Kontainerforsøk satt opp av SVV på Gran i 2014. Foto: SVV.

Tabell 3 Oversikt over kontainere startet av Statens vegvesen i 2014/2015 og videreført av NGI i 2020.

Kontainer	Skifertype	Skiferkilde	Startdato
A1 ¹⁾	Alunskifer etasje 2	Veiskjæring nord for tunnelen på Gran	01.08.2014
A3	Alunskifer etasje 2	Veiskjæring nord for tunnelen på Gran	01.08.2014
AT1	Alunskifer etasje 3a	Tunnelen på Gran	21.05.2015
AT2	Alunskifer etasje 3a	Tunnelen på Gran	21.05.2015
G2	Galgebergskifer etasje 3bβ	Tunnelen på Gran	01.08.2014

1) Samme stein som for A3, men større steiner ble valgt ut for denne kontaineren.

Testcelle NOAH

I 2015 satte NOAH opp en *in-situ* testcelle for å undersøke effekten av naturlige forhold på lagring av alunskifer under åpen himmel. Kolonneforsøk ble også satt opp med samme steinmasser som i testcellen. Alunskiferen kom fra Oslo sentrum. Utvalgte resultater fra disse forsøkene presenteres her.

RESULTATER OG OBSERVASJONER

Karakterisering steinmasser

Utvalgte kjemiske parametere målt i steinmasser brukt til kolonne- og kontainerforsøk vises i Tabell 4. Svovel (S) antas å hovedsakelig foreligge som sulfider og representerer syredannende potensial. Totalt uorganisk karbon (TIC) representerer karbonater og potensialet til å nøytralisere syre. Der hvor måling av TIC mangler kan man bruke kalsium (Ca) som er mål på nøytraliserende potensial, under antagelse at det representerer kalsiumkarbonat. Det er heftet

med større usikkerhet, fordi Ca også inngår i silikatmineraler som ikke har samme raske nøytraliseringssevne

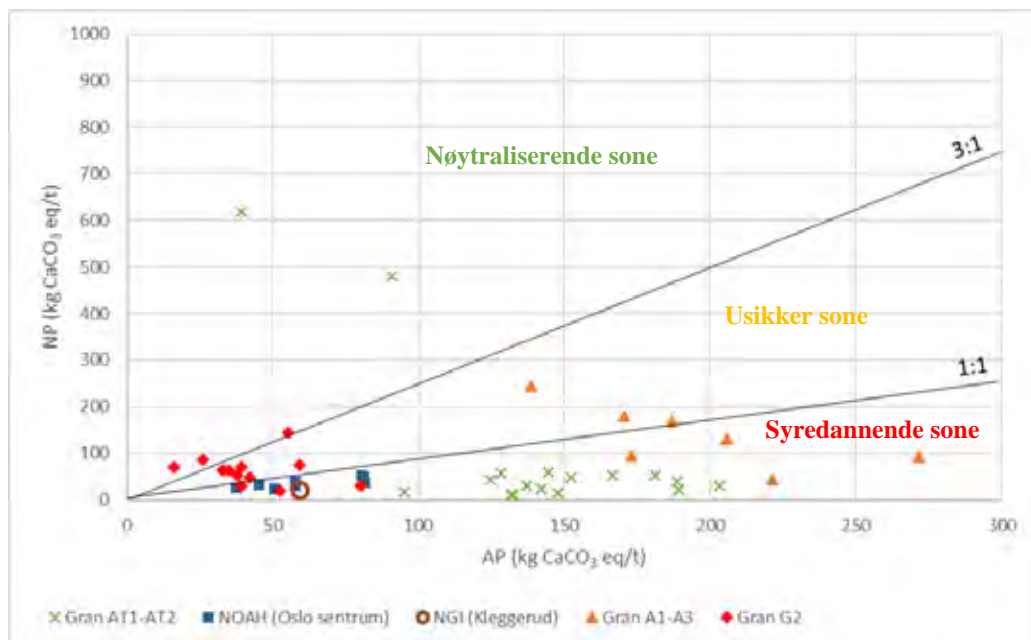
Kontainerne med alunskifer fra Gran satt opp av SVV (A1+A3, AT1+AT2) vil i lys av svovelinnholdet alene den største syredannende kapasiteten, mens alunskifertypene brukt av NGI (Jevnaker) og NOAH (Oslo sentrum) har under halvparten av dette svovelinnholdet. På den andre siden er det vist at alunskiferen fra Jevnaker i motsetning til den fra Gran også fører magnetkis i tillegg til svovelkis og derfor er regnet som mest reaktiv blant de to (Børresen, 2017, Erstad 2017). Alunskiferkomiteen viste eksperimentelt at en liten mengde magnetkis (< 0,1 %) katalyserer oksidasjon av svovelkis (NGI 1957). Galgebergskiferen brukt i kontainerforsøk satt opp av SVV har det laveste syredannende potensialet av skifrene, noe som passer med at galgebergskifer er forventet å være en mindre aggressiv bergart. Rombeporfyren, som er brukt som rene masser, har lavt innhold av svovel. Ettersom TIC målinger ikke foreligger for alle steinmassene, kan vi bruke kalsiumkonsentrasjoner for å sammenligne nøytraliserende potensial. Dette er også høyest i alunskiferne fra Gran, mens skiferen brukt av NOAH har under halvparten så mye kalsium, og skiferen brukt av NGI under en fjerdedel. For kalsium har galgebergskiferen høyere innhold enn skiferen brukt av NGI.

Tabell 4 Innhold av utvalgte kjemiske parametere i steinmasser brukt til kontainer- og kolonneforsøk, samt til testcelle satt opp av NOAH.

Parameter		Rombe- porfyr	Alunskifer E16 Kleggerud (NGI)	Alunskifer skjæring Gran (A1+A3)	Alunskifer tunnel Gran (AT1+AT2)	Galgeberg- skifer Gran (G2)	NOAH alunskifer
Ca (Kalsium)	g/kg	31,7	8,2	44,5	48,6	11,1	18,3
Cd (Kadmium)	mg/kg	0,08	6,96	n.a.	n.a.	n.a.	19,5
Ni (Nikkel)	mg/kg	3,8	238	207	290	97	204
S (Svovel)	g/kg	0,6	18,9	62,5	45,3	13,8	19,7
Zn (Sink)	mg/kg	35	379	64	348	203	350
U (Uran)	mg/kg	6,6	69,4	185	120	29	146
TOC (totalt organisk karbon)	%	0,24	5,9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
TIC (totalt uorganisk karbon)	%	0,63	0,27	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

N.a.: ikke målt

Syredannende kapasitet omtales som AP (acidification potensial) og nøytraliserende kapasitet omtales som NP (neutralizing potensial). Beregnet syredannende og nøytraliserende potensial vises ofte i et AP:NP diagram basert på total kjemisk analyse, men tar ikke i betraktning effekter av mineralogisk sammensetning. Data fra de aktuelle steinprøvene er vist i NP:AP-diagrammet i Figur 9 med andre prøve brukt i Under Oslo prosjektet.



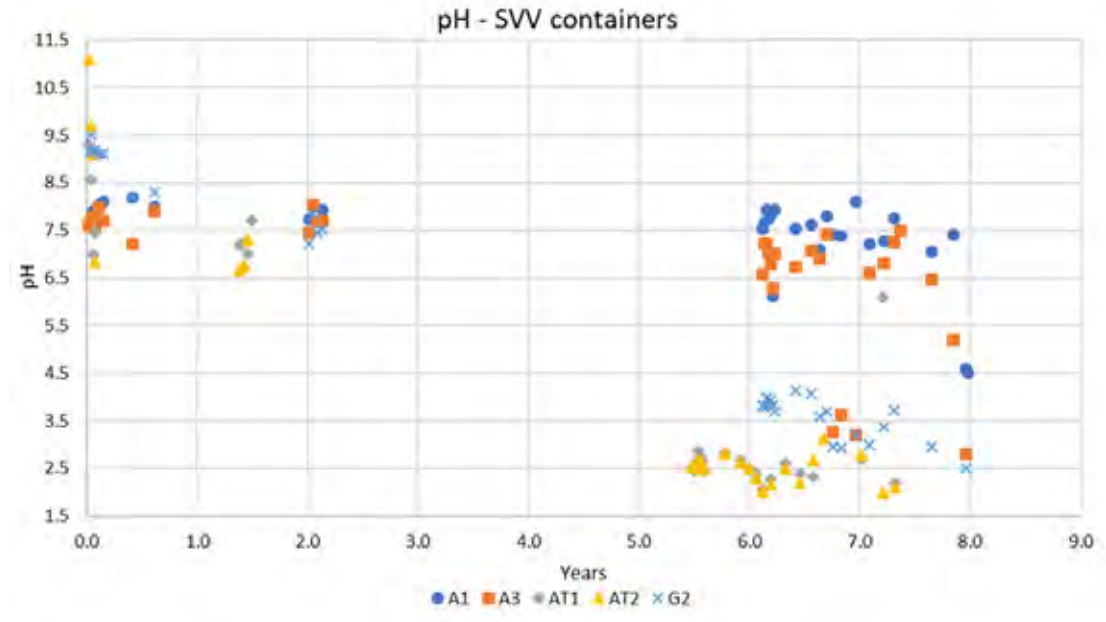
Figur 9 Nøytraliserende potensial (NP) plottet mot syredannende potensial (AP) for skifere fra flere ulike steder, med prøver fra mange ulike etasjer i den kambro-siluriske lagrekken. For prøvene Gran AT1-AT2 og NOAH-skiferen er kalsium brukt for å estimere NP.

Mellomlagring: utlekking med tid

Kontainerforsøkene satt opp av SVV i 2014/2015 har de lengste tidsseriene, men merk at sporadisk prøvetaking gjør at lange perioder med data mangler. Da SVV tok prøver av avrenningen i 2014/2015 og da to masterstudenter tok prøver høsten 2016 var pH på mellom 6.8 og 7.8 i kontainerne (Figur 10). Men det ble likevel observert betydelig mobilisering av tungmetaller fra sulfidoksidasjon (Figur 12): Ni, Zn, As og Cd derivert fra sulfidene nådde tilstandsklasse 4 til 5 i forsøket, og uran oppnådde også høye konsentrasjoner (Statens vegvesen 2017). Vi antar at det tok minimum 1,5 år (AT1 + AT2, alunskifer fra tunnel) og minimum 2 år (A1 + A3, alunskifer fra skjæring; G2, galgebergskifer fra skjæring) før pH sank i disse massene. Da kontainerne ble tatt over av NGI høsten 2020 var pH ~ 2,5 i AT1+AT2 kontainerne og ~ 3,7 i galgebergskiferen. Kontainerne med skifer fra skjæringen (A1 + A3) hadde fortsatt nøytral pH, selv om disse hadde det høyeste innholdet av svovel (Tabell 4) og dermed det antatt høyeste syredannende potensialet og lignende innhold av Ca som AT1 og AT2 kontainerne.

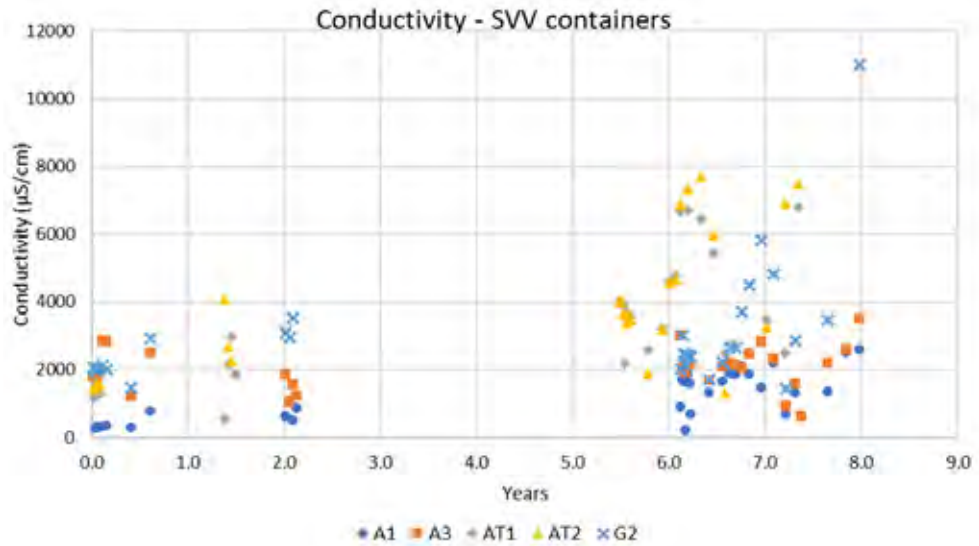
Lave pH-målinger sommeren 2021 og igjen sommeren 2022 viser dog at kontainer A3 har en sesongvariasjon med sur avrenning om sommeren og nøytral avrenning om vinteren, noe som sannsynligvis skyldes høyere reaksjonsrater når det er varmt om sommeren (Chandra og Gerson, 2010). Det er uvisst om kontainer A3 har hatt lav pH om sommeren også i tidligere år. Den observante leser legger kanskje merke til i Figur 10 at kontainer G2 har en lignende variasjon som A3 i de siste to årene, med lave verdier når A3 har lave pH verdier. Det samme er også tilfellet for AT1 og AT2, med lavere pH verdier på sommeren, men ettersom disse kontainerne ble startet ~8 måneder senere enn resten ligger de forsinket i grafen og bunn- og topppunkter sammenfaller ikke med det for A3 og G2.

Kontaineren A1 har masser tatt ut samtidig med massene til A3 og fra samme sted, men større steiner ble valgt for denne kontaineren. Første måling med redusert pH kom i september 2022. Det antas at denne kontaineren ikke har hatt sesongvariasjon tidligere siden vi ikke så noen pH-nedgang sommeren 2021. Viktigheten av langsiktige forsøk understrekes av at det tok åtte år før vi fikk pH senkning i denne kontaineren uten nevneverdig finstoffinnhold.



Figur 10 Utvikling av pH med tid for kontainerne med svartskifer satt opp av SVV i 2014/2015. AT1 + AT2 kontainerne ble satt opp året etter de andre kontainerne og målingene ligger derfor forsinket på grafen.

Ledningsevnen (konduktiviteten) til vann sier noe om den totale konsentrasjonen av ioner (salter). Mer ioner i vannet gir høyere ledningsevne. For kontainerne fra SVV ser man at ledningsevnen er høy fra begynnelsen, men stiger enda mer ettersom pH synker og utlekkingen av stoffer øker.

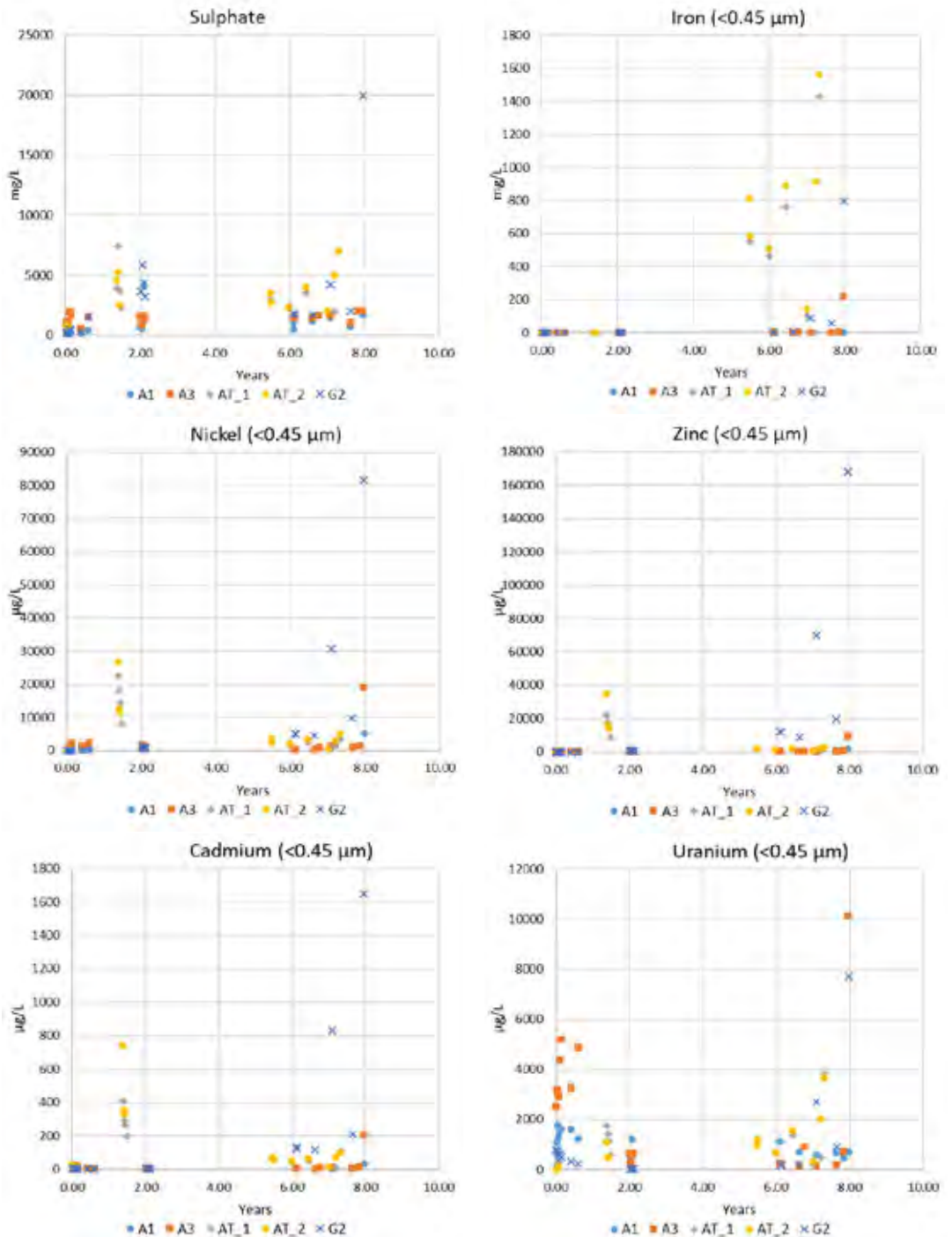


Figur 11 Ledningsevne (konduktivitet) målt i avrenning fra containere fra SVV.

Utlekking av utvalgte metaller og sulfat fra SVV containerne er presentert i Figur 12. Høye sulfatverdier reflekterer syredannelsen: når sulfidene i skiferen oksideres blir de til sulfat. Jern har lav løselighet ved nøytrale pH verdier, og man ser at løste konsentrasjoner øker kraftig når pH synker (Figur 12). Målte konsentrasjoner av nikkel, sink, kadmium og uran er høye. Spesielt de siste målingene for galgebergskiferen (G2) skiller seg ut, og det kan skyldes at pH har sunket under 3. Lav pH gir høy løselighet for en rekke metaller, og framskynder også forvitringen av steinmasser slik at metaller blir tilgjengelige for utlekking.

Sammenligner man med grenseverdier for ferskvann (Tabell 5) ser man at uforynnnet utlekking for nikkel, sink og kadmium er 2-4 størrelsesordener over grensen for klasse V etter 1,5 år, og kan føre til store negative effekter på vannlevende organismer om ikke fortynningen i nedstrøms vassdrag er betydelig. Dette vil avhenge av resipient og steds spesifikk risikovurdering kan være nødvendig.

Mens sink, nikkel og kadmium alle hovedsakelig lekker ut etter lengre tid, ser man at det er høye konsentrasjoner av uran fra begynnelsen.

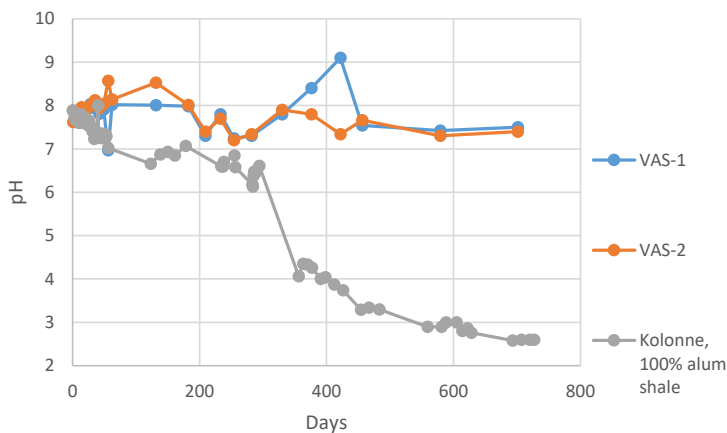


Figur 12 Utlekking av sulfat, jern, nikkell, sink, kadmium og uran fra kontainerforsøk satt opp av SVV.

Tabell 5 Grenseverdier for ferskvann (M-608) i $\mu\text{g/L}$. Grensene for kadmium avhenger av alkaliniteten (bufferevnen) til vannet, som ved $\text{pH} < 4,5$ vil være 0, men er høyere i nøytral utlekking fra svartskifer.

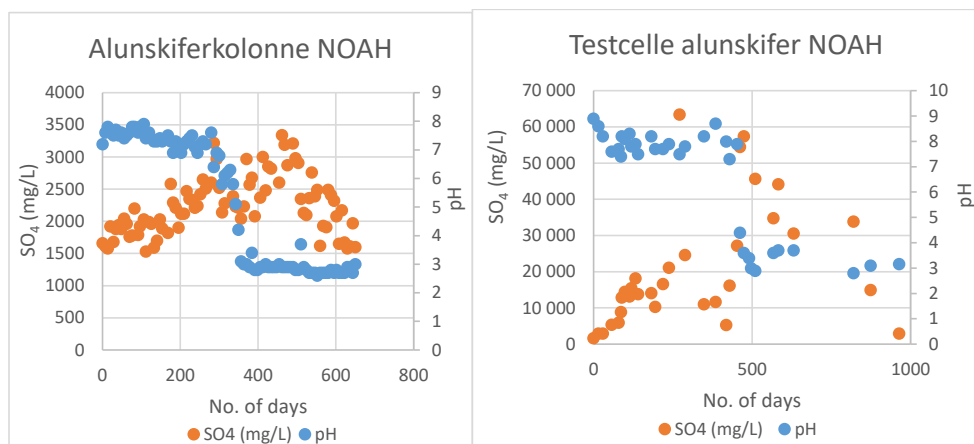
	Klasse I	Klasse II	Klasse III	Klasse IV	Klasse V
Nikkel (Ni)	0-0.5	0.5-4	4-34	34-67	>67
Sink (Zn)	0-1.5	1-5-11		11-60	>60
Kadmium (Cd)	0-0.003	0.003-0.08	0.08-0.45	0.45-4.5	>4.5

Figur 13 viser utviklingen av pH med tid for kolonne- og kontainerforsøk (VAS) med 100% sprengt skifer fra Kleggerud. Selv om det er samme steinmasser i begge forsøk, gikk pH mye raskere ned i kolonneforsøkene. Etter to år har kontainerne fortsatt nøytral pH, mens kolonneforsøkene fikk nedgang i pH etter omtrent ett år. Dette kan skyldes mindre kornstørrelse, høyere temperatur, vanningsforhold eller andre forskjeller mellom eksperimentoppsettene. I tillegg var vår og sommer i 2022 usedvanlig tørr, og dette kan ha bidratt til å forsinke syredannende prosesser i kontainerne, som står ute.



Figur 13 Utvikling av pH med tid for kolonne- og kontainerforsøk (merket VAS) med 100% alunskifer, satt opp av NGI i 2020 med svartskifer fra E16 Kleggerud på Jevnaker.

NOAH satte også opp kolonneforsøk og storskala forsøk med skifer fra samme byggegrop. Utviklingen av sulfatinnhold og pH i vannet er presentert i Figur 14. Også her var det raskere nedgang i pH i laboratorieforsøket hvor det startet ved 300-350 dager, og langsommere i storskala utendørs forsøk hvor pH sank ved ~ 450 dager. Forskjellen i tid var likevel ikke like markant som for forsøkene til NGI i Figur 13.



Figur 14 Utvikling av pH og sulfat med tid i kolonne- og testcelleforsøk utført av NOAH. Samme alunskifer er benyttet i begge forsøk.

Tiden før pH synker i storskalaforsøkene hvor svartskiferen er eksponert for naturlige værforhold er oppsummert i Tabell 6. Småskalaforsøk på laboratorium har gitt raskere pH-senkning for skiferen. Dette kan skyldes mindre kornstørrelse, høyere temperatur eller andre forskjeller i forsøksoppsett.

Tabell 6 Oversikt over tid før pH senkning inntreffer i de samlede resultatene for storskala utendørs forsøk med svartskifer. Nederst vises også resultater fra småskala innendørs forsøk.

Hva	Skifer	pH senkning
Kontainerforsøk NGI	Alunskifer, Kleggerud	> 2 år
Testcelle NOAH	Alunskifer, Oslo	ca. 14 måneder
Kontainerforsøk SVV	Alunskifer veiskjæring, Gran	> 2 år
Kontainerforsøk SVV	Alunskifer veiskjæring, Gran, store steiner	Ca. 8 år
Kontainerforsøk SVV	Alunskifer tunnel, Gran	1,5 - 5,5 år
Kontainerforsøk SVV	Galgebergskifer, Gran	2 år - 6 år
Kolonnesforsøk NGI*	Alunskifer, Kleggerud	Ca. 10 måneder
Kolonnesforsøk NOAH*	Alunskifer, Oslo	Ca. 10 måneder

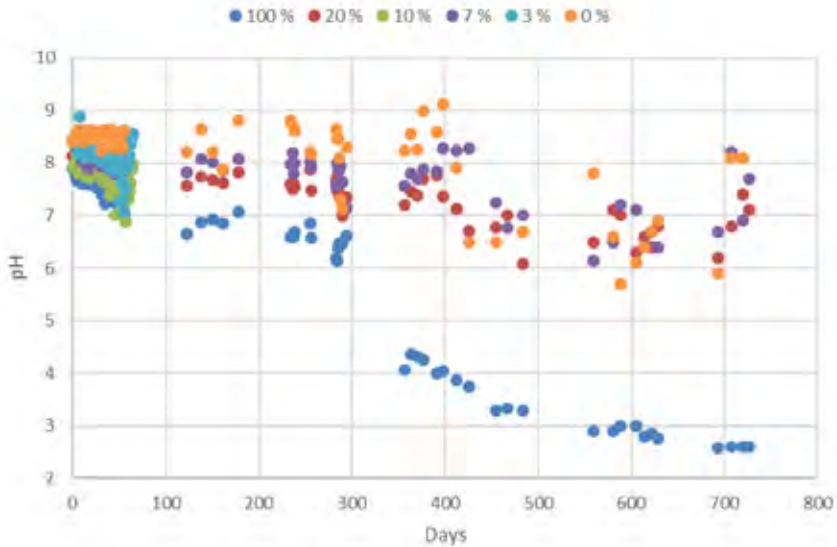
* Innendørs ved romtemperatur

Blandmasser: Utlekking fra alunskifer blandet med rombeporfyr

Etter 2 år har ingen av de undersøkte blandmassene fått pH senkning, hverken for kolonner eller kontainerforsøk. Kolonnen med 100 % alunskifer har fått pH senkning (Figur 15), mens kontainerne med 100 % alunskifer har ikke fått pH senkning (Figur 13). Mens vi forventer pH senkning i kontaineren med ren alunskifer, er det uvisst om pH senkning vil skje med tiden i kolonner og kontainere med blandmasser.

Ledningsevnen i vannet fra kolonnene øker med økende innhold av alunskifer, og det passer med målt konsentrasjoner i vannet. Konsentrasjoner av sulfat, sink og kadmium målt på 3 ulike tidspunkter i kolonnesforsøkene med naturlige blandmasser viser at utlekkningen øker med andel svartskifer (Figur 17). Særlig høye konsentrasjoner sees etter pH synker i kolonnen med 100 %

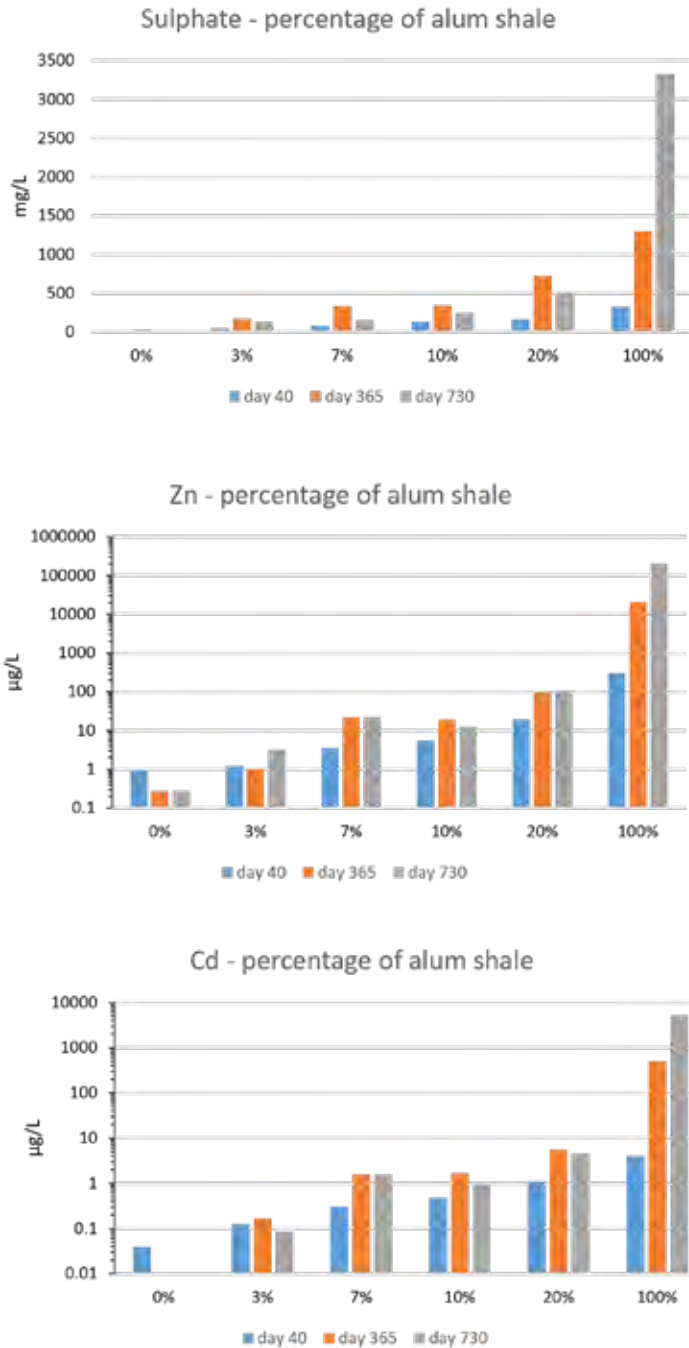
alunskifer, det vil si de siste to målingene (365 og 730 dager). Merk at y-aksen er logaritmisk for kadmium og sink.



Figur 15 pH målt for kolonnene satt opp av NGI med ulik blanding av alunskifer og rombeoporfyrr. Andel alunskifer i en kolonne angis i tegnforklaringen.



Figur 16 Ledningsevne (konduktivitet) målt for kolonnene satt opp av NGI med ulik blanding av alunskifer og rombeoporfyrr. Andel alunskifer i en kolonne angis i tegnforklaringen.



Figur 17 Utlekking av sulfat, sink (Zn) og kadmium (Cd) fra kolonner med ulike blandingsforhold av alunskifer og rombeporfyr. Prosent på x-aksen angir andel alunskifer. Merk at y-aksen er logaritmisk for sink og kadmium.

KONKLUSJONER/DISKUSJON

Eksemplene vi kjenner for lagring av alunskifer og galgebergskifer i naturlige værforhold har alle brukt minimum ett år på å få sur avrenning, i de fleste tilfeller lenger tid. Basert på dette har den oppdaterte veilederen til Miljødirektoratet (M-2105, 2022) en anbefaling på maksimum seks måneder mellomlagring før massene er deponert, det vil si at denne tiden fordeles på tiltakshaver (byggeplass) og deponi. Dette gjelder for uforvitrede masser. For anleggsarbeid i svartskifer vil det i mange tilfeller være nødvendig å søke utslippstillatelse fra forurensningsmyndighet i henhold til forurensningsforskriften, samt utslippstillatelse fra Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet.

Erfaringsmessig er det enklere å unngå at syredannende prosesser resulterer i lav pH, enn å stoppe reaksjonene når de først er i gang og pH er lav. Dette er fordi reaksjonene går raskere ved lav pH og høy temperatur. Derfor er det viktig å unngå at massene kommer til det punktet der pH synker. Dette gjøres ved en begrenset mellomlagringsperiode og riktig permanent deponering.

Forsøkene har demonstrert at det er en mulighet for stor sesongvariasjon i avrenningen fra svartskifer. Den ene kontaineren satt opp av SVV i 2014 har hatt pH < 4 sommeren 2021 og 2022, med pH > 6 vinteren mellom. Dette understreker kompleksiteten i temaet og viktigheten av systematisk og jevnlig prøvetaking og grundige undersøkelser i slike spørsmål.

Viktigheten av kornstørrelse vises i reaksjonstid for kontainere satt opp av SVV i 2014, hvor en kontainer med større steiner brukte 8 år før pH senkning kom, mens kontaineren med samme bergmasse med mindre kornstørrelse har brukt kortere tid.

Forsøkene med blandmasser (0-20 % skifer blandet med rombeporfyr) har etter 2 år ikke gitt noen nedgang i pH, hverken laboratorieforsøk eller kontainerforsøk. Det kan ikke utelukkes at en pH-nedgang kan komme på et senere tidspunkt, og forsøkene fortsetter. Det finnes en nedre grense for andel svartskifer i blandede masser hvor totalen ikke vil være syredannende, men vi vet ikke hvor denne grensen går. Den vil også variere avhengig av skiferens egenskaper, som kan variere i stor grad fra sted til sted, samt egenskapene til omkringliggende masser. Her vil stedsspesifikk risikovurdering være et godt verktøy.

Syredannende berg som ligger urørt, det vil si naturlig berg som ikke sprenges ut eller utsettes for endringer i grunnvannsspeil skaper færre problemer. Syredannende prosesser akselereres når massene tas ut og eksponeres for luft og fuktighet. Riktig håndtering av massene er kostbart for både utbygger og deponieier, ressurskrevende med tanke på transport og deponering samt at massene tar opp verdifull og mangelfull deponiplass. Det beste er derfor å la syredannende masser ligge urørt. I noen tilfeller kan man for eksempel bygge bru over vei i stedet for kulvert under, og kanskje kan man redusere antall kjellere i planlagte bygg. De som bidrar til å ta ut store mengder svartskifer bør også oppfordres sterkt til å vurdere om uttaket kan reduseres.

Mange spørsmål angående svartskifer er fortsatt ubesvart. Alunskiferens egenskaper varierer svært mye fra sted til sted og er i stor grad avhengig av total kjemisk sammensetning, mineralogi (sulfider, karbonatinnhold), forvitringstilstand, fragmenteringsegenskaper, hydrogeologiske forhold m.m. (NGI, 1957, Børresen 2017, Erstad 2017, Statens vegvesen, 2016, 2018). De som bidrar til å ta ut store mengder svartskifer bør også bidra inn i forskning på temaet for å løse utfordringen vi står ovenfor med deponier som fylles opp og oppfølging av deponerte masser i uoverskuelig fremtid.

"Under Oslo" har også sett på hva som trengs for å gi sikrere anbefalinger rundt fundamentering, og en rapport på dette temaet vil komme.

Kontainerforsøkene videreføres som en del av earthresQue senter for forskningsbasert innovasjon (<https://www.nmbu.no/tjenester/sentre/earthresque>), og skal overvåkes fram til 2028. Utlekkingsdata vil produseres kontinuerlig og bidra til å øke vår forståelse for blandmasser og prosesser vedrørende utlekking og syredanning fra svartskifer.

TAKK

Forfatterne ønsker å takke Statens vegvesen – Prosjekt Vestoppland for containere og resultater fra Rv. 4. Vi vil også takke Skanska for alunskifermasser brukt til å sette opp forsøkene. Videre er vi veldig takknemlige for at NOAH Langøya har plass til containerne og hjelper med videre overvåkning, samt for at de delte data fra deres testcelle med svartskifer.

Midlene til dette arbeidet har kommet fra Norges geotekniske institutt (NGI).

REFERANSER

Børresen, H. S. 2017. Geochemical and mineralogical evaluation of mineral-water reactions and leaching potential in a black shale depot. Weathering and transport of Ni, Zn, Cd, Sr and Co from Alum- and Black shale. Master thesis, Department of Geosciences, University of Oslo.

Chandra, A.P. og Gerson, A.R. 2010. The mechanisms of pyrite oxidation and leaching: a fundamental perspective. Surface Science Reports (65), 293-315.

Erstad, L. A. 2017. Leaching of uranium and heavy metals from acid producing black shales. Experiments and modeling study. Master thesis, Department of Geosciences, University of Oslo.

Miljødirektoratet 2015. Identifisering og karakterisering av syredannende bergarter. Fagrapport M-310.

Miljødirektoratet 2016. Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota – revidert 30.10.2020. Veileder M-608.

Miljødirektoratet 2022. Håndtering av potensielt syredannende svartskifer. Fagrapport M-2105.

NGI (1957). Bidrag til belysning av visse bygningstekniske problemer ved Oslo-områdets alunskifere. NGI Publikasjon nr 22.

NGI (2007) "Rapport 20061245-1, NOAH Langøya – Miljøriskovurdering av gipsdeponering over kote 0 i Nordbruddet"

Statens vegvesen (Norwegian Public Roads Administration) (2016). Bruk av XRF på bergarter for vurdering av miljørisiko. SVV rapport nr 516.

Statens vegvesen (Norwegian Public Roads Administration) (2017). Utlekkingsforsøk med svartskifer fra Rv. 4, Hadeland. SVV rapport nr. 665.

Statens vegvesen (Norwegian Public Roads Administration) (2018). Rv 4. Gran, nyttigjering av svartskifer. Sluttrapport og erfaringar. SVV rapport nr 333.