

RAPPORT

Håndtering av potensielt syredannende svartskifer

FAGRAPPORT TIL MILJØDIREKTORATET

DOK.NR. 20200680-01-R
REV.NR. 0 / 2021-12-13
M-2105|2021

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentsiteteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.



Prosjekt

Prosjekttittel: Håndtering av potensielt syredannende svartskifer
Dokumenttittel: Fagrapport til Miljødirektoratet
Dokumentnr.: 20200680-01-R
Dato: 2021-12-13
Rev.nr. / Rev.dato: 0 /

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Miljødirektoratet
Kontaktperson: Hannah Hildonen
Kontrakthereferanse:

for NGI

Prosjektleder: Frøydis Meen Wærsted
Utarbeidet av: Frøydis Meen Wærsted, Gijs Breedveld, Erlend Sørmo
Kontrollert av: Christian Sætre, Gunvor Baardvik, Gudny Okkenhaug, Eivind Wiik
Ånes, Paul Sverdrup Cappelen

Sammendrag

Feil håndtering av svartskifer kan forårsake sur avrenning, utlekking av sporstoffer ("tungmetaller") og radionuklider, som igjen kan skape problemer for bygninger, mennesker og miljø. Svartskifer kan også være en kilde til radon i inneluft. Denne rapporten beskriver hvordan svartskifer kan identifiseres og håndteres. Den gir også en oversikt over hvilke skader som kan oppstå dersom dette ikke gjøres forsvarlig. Alunskifer er den mest kjente av denne typen berggrunn og finnes flere steder, men særlig i og rundt Osloområdet.

Miljødirektoratet har engasjert NGI til å utarbeide denne rapporten, som er en revidert og oppdatert utgave av dokumentene M-310 (Veileder for karakterisering og identifisering av syredannende bergarter) og M-385 (Deponering av syredannende bergarter. Grunnlag for veileder). Arbeidet er begrenset til svarte leirskifere (kalt svartskifere) med potensielt syredannende egenskaper. Forvitring av sulfider i svartskifer kan, som følge av kontakt med luft og vann, medføre avrenning med svært lav pH og høye konsentrasjoner av sporstoffer, jern, aluminium og radionuklider som uran. For nylig sprengte masser tar utvikling av sur avrenning noe tid, mens for allerede forvitrede masser kan dette komme umiddelbart.

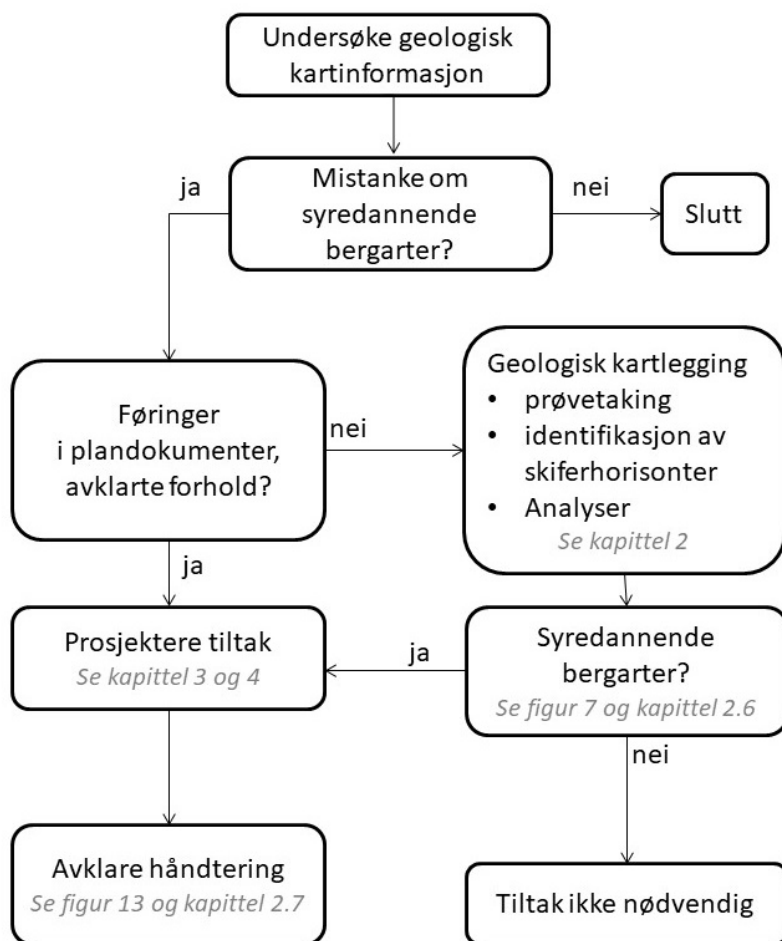
Rapporten beskriver en metode for å vurdere syredannelsespotensialet til svartskifer og avgjøre hvordan massene kan håndteres. Metoden består av tre ledd:

1. Sammenstilling av geologisk informasjon.
2. Geologisk kartlegging i felt.
3. Kjemisk karakterisering av massene.

Masser av syredannende svartskifer kan skape store problemer dersom de håndteres uforsvarlig, for eksempel om de mellomlagres eller sluttdisponeres uten at det treffes nødvendige tiltak. Dersom oksygentilførsel til masser av syredannende svartskifer hindres, vil forurensningspotensialet minimeres, ettersom forvitningsreaksjonene stoppes. Sikker deponering krever derfor at massene legges i tette celler hvor det benyttes en tildekking som reduserer inntrengning av luft og vann i størst mulig grad. Gjennomstrømning av vann kan lede til spredning av oppløste sporstoffer og radionuklider.

Driftsfasen av et deponi, med mellomlagring og åpne celler, er den mest kritiske perioden i deponeringsprosessen, siden massene da har kontakt med luft og vann/fuktighet. Det anbefales at denne fasen er kortest mulig, for å begrense og/eller hindre forvitningsreaksjonene. Samdeponering med kalk eller alkaliske avfallsmaterialer og komprimering av massene vil begrense syredannelse i deponicellene i driftsfasen. Det vil ofte være nødvendig med renseanlegg som kan justere pH og felle ut løste metaller tilpasset sigevann fra deponier.

For anleggsarbeid i svartskifer, vil det i mange tilfeller være nødvendig å søke tillatelse fra forurensningsmyndighet i henhold til forurensningsforskriften, samt utslippstillatelse for radionuklider fra Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA). Det samme gjelder deponivirksomhet.



Flytskjema ved håndtering av syredannende bergarter i prosjekter.

English summary

This report describes how black shales can be identified and handled. It also gives an overview of damages that can occur if this is not done properly. Alum shale is the best-known example of this kind of rock and occurs in several places, but especially in the Oslo region. Inappropriate handling of black shales can cause leaching of acid, heavy metals and radionuclides, which in turn can cause trouble for buildings, humans, and the environment. Black shale can also be a source for radon in indoor air.

The Norwegian Environment Agency has engaged NGI to prepare this report, which is a revised and updated version of the documents M-310 (Identification and characterization of acid-producing rocks) and M-385 (Disposal of acid-producing rock. Basis for guidelines). The task is limited to black mudrocks (called black shales) with potential acid-producing properties. Weathering of sulphides in black shales can, as a consequence of contact with air and water, cause runoff with very low pH and high concentrations of heavy metals, iron, aluminium and radionuclides like uranium. For freshly excavated masses, developing acid drainage will take some time, while for already weathered masses this can be an immediate problem.

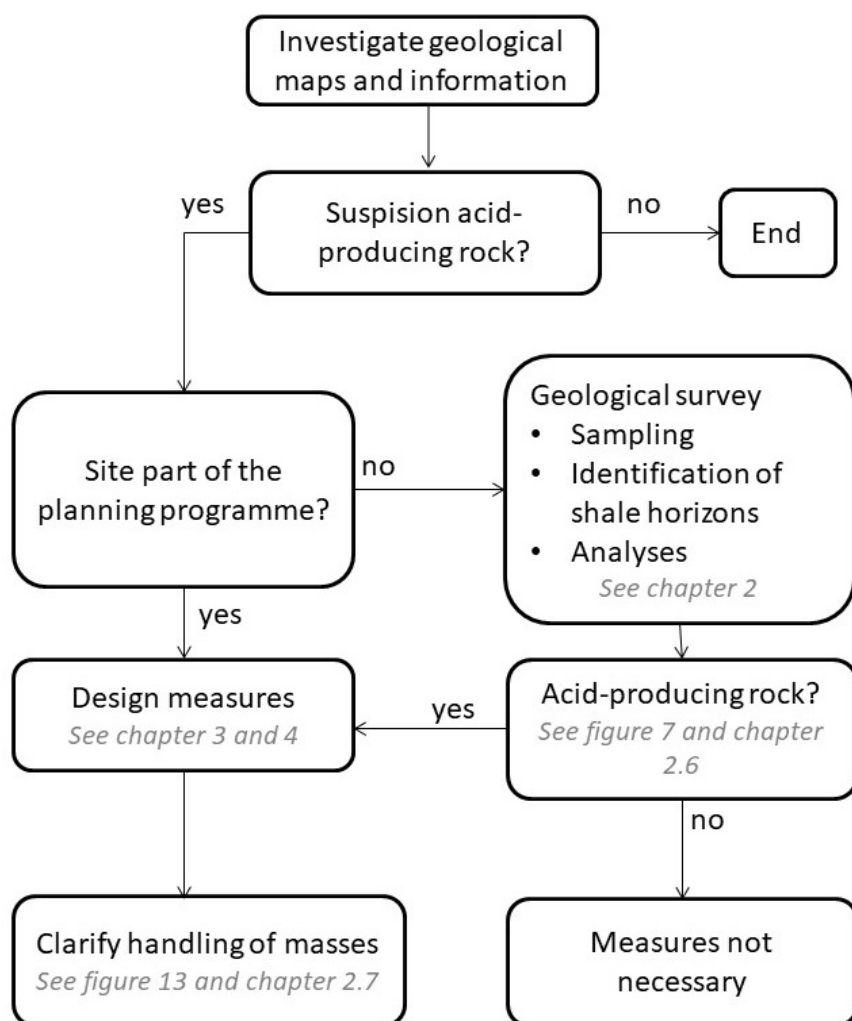
This report describes a method to assess the acidification potential of rock masses and determine how the masses can be handled. The method consists of three parts:

1. Compilation of geological information
2. Geological mapping in the field
3. Chemical characterization of the masses

Masses of acid-producing black shales can cause trouble if they are improperly handled, for example by temporary storage or final disposal without the necessary measures. If oxygen supply to acid-producing black shales is prevented, the potential for pollution is minimized as the weathering reactions stop. Thus, safe disposal requires that the masses are put in closed cells, with a cover that to the greatest possible extent reduces the intrusion of air and water. Infiltration of water may lead to spreading of dissolved heavy metals and radionuclides.

During operation of a disposal site there will be temporary storage and open cells, making this the most critical period of the disposal process as the masses will be in contact with air and water/humidity. It is recommended to keep this phase as short as possible, to limit and/or prevent weathering reactions. Co-disposal with alkaline waste products and compression of the masses can limit the acid production during the operation phase. It is necessary with a treatment plant that can adjust pH and precipitate dissolved metals, adjusted to the leachate from the disposal site.

Construction work in black shales will in many cases require a permit in accordance with the Pollution Control Act, as well as a discharge permit for radionuclides from the Norwegian Radiation and Nuclear Safety Authority. This is also the case for landfills.



Flow chart for handling acid-producing rocks in projects.

Innhold

Sammendrag	4
English summary	6
1 Innledning	10
1.1 Hensikt og begrensninger	11
1.2 Bakgrunn	12
1.3 Nøkkelpbegreper for syredannelse	15
1.4 Utbredelse	16
1.5 Relevant regelverk og anbefalinger	20
2 Identifisering og karakterisering av svartskifer og avfallstype	22
2.1 Informasjon fra geologiske kart	22
2.2 Geofysiske metoder for å identifisere svartskifer	22
2.3 Geologisk kartlegging med prøvetaking i felt	23
2.4 Bestemmelse av etasje ved hjelp av indeksfossiler	24
2.5 Geokjemiske analyser	25
2.6 Tolkning av analyseresultatene: er massene syredannende?	27
2.7 Klassifisering av avfallstype	35
3 Graving i og mellomlagring av svartskifer	40
3.1 Forarbeid før graving	40
3.2 Forvitrede masser, tidligere oppgravde masser og løsmasser	41
3.3 Disponering av massene	43
3.4 Mellomlagring før transport til deponi	43
3.5 Mottak av masser på deponi	44
3.6 Temperaturøkning og risiko for selvantenning	45
4 Tiltak og sluttdeponering	45
4.1 Tiltak for å begrense syredannende reaksjoner	45
4.2 Etablering av deponiceller for svartskifer	46
4.3 Tilsats av pH-regulerende materialer	47
4.4 Bunn- og sidetetting	49
4.5 Tildekking i driftsfasen	49
4.6 Redusere overflate	49
4.7 Komprimering	49
4.8 Sigevann	50
4.9 Toppdekke ved ulike deponiløsninger	54
4.10 Overvåking og etterdrift	57
4.11 Lokal disponering av svartskifer	58
5 Oppsummering og anbefalinger	59
6 Referanser/Leseliste	60

Vedlegg

Vedlegg A	Ordforklaringer
Vedlegg B	Eksempel på tolkning av analyserte data fra svartskifer
Vedlegg C	Referansedata for trekantdiagrammer
Vedlegg D	Faglig fordypning

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

Miljødirektoratet har engasjert NGI til å utarbeide en fagrapport for håndtering av potensielt syredannende svartskifer (svart leirskifer). I denne fagrapporten beskrives identifisering, karakterisering, håndtering og deponering av svartskifer.

Leirskifer er sedimentære bergarter og er dannet ved forsteining av leire- og slamavsetninger i innsjø eller hav (NGU, 2018). Ulike lag (etasjer) kan ha ulik sammensetning. Lysere lag kan være kalkrike, og mørkere lag har gjerne et høyere innhold av organisk materiale, sporstoffer (ofte kalt tungmetaller) og radionuklider, samt potensielt syredannende egenskaper.

Berggrunn som danner syre ved forvitring utgjør byggegrunn flere steder i Norge. Ettersom ulike syredannende bergarter kan ha ganske ulik sammensetning og geokjemiske egenskaper, fokuseres det i denne rapporten kun på svartskifer. Informasjonen om svartskifer i denne fagrapporten er ikke nødvendigvis overførbar til andre typer syredannende berggrunn, selv om en del mekanismer og forholdsregler vil være de samme. Svartskifer finnes flere steder i Norge, men er mest utbredt i Østlandsområdet, og da ofte som alunskifer. Svartskifer må håndteres riktig i forbindelse med tiltak ved ulike bygge- og anleggsprosjekter. Dette gjelder både ved sprengning og utgraving, samt ved tiltak som kan endre grunnvannsstanden der svartskifer finnes.

Svartskifer kan ved forvitring føre til sur avrenning med høye konsentrasjoner av sporstoffer, jern, aluminium og uran. Slik avrenning kan ha negative effekter på det lokale miljøet. Forvitring av svartskifer kan også sterkt begrense levetiden på konstruksjoner og infrastruktur gjennom svelle-, setnings- og korrosjonsskader. Masser av syredannende svartskifer kan skape problemer i deponier som ikke er riktig utformet.

Forvitringsprosesser i urørt berggrunn er langsomme, men prosessene kan akselerere etter at inngrep er utført i et område. **Den beste håndteringen av syredannende berggrunn er derfor å la det ligge urørt.** En bør vurdere om inngrep kan unngås eller nedskaleres for å redusere risiko for økt forvitring og for å unngå avfallsmasser. Dette kan for eksempel oppnås ved grunnere utgraving eller bergskjæring, færre kjellernivåer, flytting av trasé for vei eller bane, eller bygging av gangbro i stedet for tunnel for fotgjengere. Negative miljøeffekter, kostnader til forsvarlig deponering av masser og utforming av skadebegrensende tiltak bør settes opp mot kostnadene til alternative løsninger og nytten for samfunnet. Bygging på grunn som består av svartskifer kan medføre økt risiko for høye radonnivåer i inneluft, men alle nybygg med oppholdsrom skal i dag bygges med tiltak som sikrer akseptable radonnivåer, i henhold til kravene i Byggeteknisk forskrift til Plan og bygningsloven (TEK17).

Syredannende svartskifer som oppdages sent i et prosjekt kan føre til store kostnadsoverskridelser, og det er derfor viktig med tilstrekkelig kartlegging og god planlegging i en tidlig fase av et prosjekt.

Alunskifer og andre typer syredannende svartskifer kan ikke benyttes til gjenbruk eller som fyllmasser uten risikovurdering, spesielle tiltak og tillatelse fra forurensningsmyndigheten. Svartskifer med forurensende potensial må derfor som utgangspunkt leveres til godkjent avfallsmottak. Vær oppmerksom på at allerede forvitrede masser kan forårsake skade (sur, metallholdig avrenning) mye raskere enn uforvitrede steinmasser, og at ulike tiltak derfor er nødvendige for forvitrede og uforvitrede masser.

1.1 Hensikt og begrensninger

Hensikten med denne rapporten er å gjøre det enklere for plan-, bygnings- og miljømyndigheten i kommuner og fylker, konsulenter, entreprenører og andre, å redusere risikoen for skadevirkningene på menneske, miljø og eiendom ved graving, håndtering og disponering av svartskifer. Dokumentet er også rettet mot avfallsaktører som driver deponier, eller aktører som har et ønske om å opprette et deponi for syredannende svartskifer. Rapporten er ment å bidra til å øke forståelsen for problemene knyttet til disse bergartene og sikre en forsvarlig og enhetlig håndtering og forvaltning.

Metodene som beskrives her for å bestemme om en bergart er syredannende, er særlig tiltenkt håndtering av svartskifer, og er ikke nødvendigvis passende for andre typer syredannende bergarter (eksempelvis gneiser og andre bergarter som inneholder syredannende mineraler).

Avfallskarakteriseringsmetoden som er beskrevet danner grunnlag for en riktig håndtering av svartskifer, hovedsakelig rettet mot sluttdisponering på et deponi for ordinært avfall (kategori 2 deponier) på land. Avfall med forhøyet innhold av uran og økt risiko for radondannelse må vurderes særskilt. Underjordiske deponier er ikke omfattet av dette dokumentet, ei heller deponering i sjø.

Når informasjonen i denne rapporten benyttes, vær oppmerksom på at allerede forvitrede masser kan gi problematisk avrenning mye raskere enn uforvitrede steinmasser.

1.2 Bakgrunn

Svarte skifre, og særlig alunskifer, er bergarter som har syredannende egenskaper. Slike syredannende egenskaper er noe visse bergarter har naturlig som følge av innholdet av sulfidholdige mineraler, og er ikke en tilført forurensning. Syredannelse er en viktig årsak til utlekking av sporstoffer fra svartskifer og forurensing av omgivelsene, i tillegg kan syren i seg selv være skadelig for miljø og konstruksjoner. Sporstoffer i svartskifer inkluderer As (arsen), Cd (kadmium), Co (kobolt), Mo (molybden), Ni (nikkel), Sb (antimon), U (uran), Zn (sink), Cu (kobber) og Cr (krom).



Figur 1 Fotoet viser alunskifer i tynne flak som forvitrer ved tilgang på fuktig luft og vil swelle til et volum som kan være 2-3 ganger opprinnelig volum. Høyden på bildeutsnittet er ca. 5 centimeter. Gule utfellingene er jernsulfat ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). Foto: Erik Endre

Når svartskifer kommer i kontakt med luft og vann, vil den begynne å reagere (Figur 1). Dette kan føre til blant annet sur avrenning og at skiferen sveller. Urørt svartskifer vil sjelden gjøre skade (bortsett fra fare for radon i bygninger). Problemer kan derimot oppstå når skiferen graves ut eller grunnvannsspeilet endres. Dette skyldes at nye overflater kommer i kontakt med luft og vann og kan begynne å reagere. I knust bergmasse økes i tillegg det reaktive arealet, noe som vil akselerere dannelsen av sur avrenning.

Hovedproblemene som kan oppstå og bør vurderes ved svartskifer er potensialet for:

- ↗ avrenning av surt vann.
- ↗ utlekking av aluminium, jern, sporstoffer og radionuklider.
- ↗ forvitring og korrosjon av betong og stål.
- ↗ svelling og trykk mot konstruksjoner og fundamenter.
- ↗ redusert bæreevne/styrke av undergrunnen.

- frigjøring av radon.
- temperaturøkning og selvantenning ved feil lagring.

Syredannelsen og utlekking av sporstoffer skyldes forvitring av sulfidmineraler i svartskifer. Avrenning av surt vann, sporstoffer og radioaktive stoffer (radionuklider) som frigjøres i prosessen, kan forårsake miljøskader. Vann som har vært i kontakt med svartskifer, og særlig alunskifer, kan ha høye konsentrasjoner av sporstoffer, uran og aluminium. pH i slikt sigevann kan bli svært lav ($\text{pH} < 2$). På engelsk omtales sigevannet som *Acid Rock Drainage* (ARD). Tabell 1 viser pH og konsentrasjoner av ulike metaller i vann som har vært i kontakt med forvitret og uforvitret, syredannende svartskifer (alunskifer og galgebergskifer). Når masser som allerede er forvitret kommer i kontakt med vann, kan man umiddelbart få avrenning med lav pH og høye sporstoffkonsentrasjoner. Dette skyldes at forvitring har pågått over en lengre tid og det er en forvittringsoverflate som kan løses opp i kontakt med vann. Uforvitrede masser vil utvikle lav pH og høye metallkonsentrasjoner først etter en viss tid med kontakt med oksygen og vann.

Tabell 1 Eksempler på analyser av vann som har vært i kontakt med forvitret og uforvitret svartskifer (NGI, i arbeid; SVV, 2017). Metallanalysene gjelder for filtrerte prøver ($0,45 \mu\text{m}$).

Prøve	pH	SO_4^{2-} (mg/L)	Al ($\mu\text{g/L}$)	Cr ($\mu\text{g/L}$)	Cu ($\mu\text{g/L}$)	Pb ($\mu\text{g/L}$)	U ($\mu\text{g/L}$)
Forvitret alunskifer (5 år)	2,4	2 900	27 600	39	3190	1,1	1 220
Forvitret galgebergskifer (6 år)	3,8	1 800	9 170	0,4	795	4,4	169
Uforvitret alunskifer (2 uker)	8,6	554	26	12	<5	<0,5	225
Uforvitret alunskifer (1 dag)	6,9	1 000	<60	<20	<7	<8	704
Uforvitret alunskifer (2 uker)	7,8	330	3,9	0,03	0,3	0,02	289
Uforvitret alunskifer (8 uker)	7,7	1 730	<10	<0,5	11,5	<0,5	5 180
Uforvitret Galgebergskifer (1 uke)	9,2	186	185	0,9	<5	<0,5	445

Skader på bygninger kan komme av svelling eller sur avrenning som tærer på materialer som stål og betong (se Figur 2 og Figur 3). Svelling er hovedsakelig et problem ved sulfidoksidasjon og utfelling av nye forbindelser (sekundærmineraler) som tar større plass, men kan også skyldes innhold av svellende leirmineraler. Svelling kan også forekomme i ikke-syredannende leirskifer. Ved feil lagringsforhold for svartskifermasser er det også risiko for temperaturøkning og selvantenning. Dette er ytterligere omtalt i kapittel 3.6. I tillegg kan det oppstå høye radonnivåer i bygninger som følge av naturlig forhøyede urannivåer i svartskifer (se Vedlegg D for ytterligere informasjon).

Figur 2 Innlekkasje av surt vann (pH < 3) i et kjellerrom. Vannet kan medføre skade på



konstruksjonen og være helseskadelig ved direkte kontakt. Foto: Erik Endre



Figur 3 Eksempel på skader på bygningskonstruksjoner som følge av forvitring av alunskifer. Veggen presses ut pga. svelletrykk fra forvitrende alunskifer (røde piler). Veggen er fundamentert direkte på og etablert inn mot alunskifer og står i fare for å rase ut pga. setninger. Foto: Erik Endre

Viktige egenskaper for svartskiferens syredannende egenskaper er innhold av svovelholdige mineraler (sulfider) som danner syre i kontakt med oksygen og vann, og hvor lett bergarten sprekker opp. Små sulfidmineraler og flakdannelse øker overflaten

som er tilgjengelig for oksidasjon, og reaksjonene kan gå raskere. Syredannelse blir motvirket av syrenøytraliseringspotensial i bergarten (innhold av karbonater, f. eks. kalkstein).

Det er omfanget av syredannelse som bestemmer hvor mye en bergart kan lekke ut til omgivelsene, og som avgjør om en bergart betraktes som potensielt forurensende eller ikke. Derfor vil syredannende bergarter ikke medføre forurensning i særlig grad dersom en klarer å hindre de syredannende reaksjonene. Både oksygen og vann er nødvendige for de syredannende reaksjonene, men oksygen er vanligvis den begrensende faktoren. Dersom oksygen ikke er tilgjengelig, vil ikke forvitningsprosessen komme i gang.

Endringer i grunnvannsstand, forårsaket av for eksempel byggearbeider eller drenering, kan medføre økt forvitring og syredannelse i grunnen. Når vannivået endres eller fluktuerer, kan luft (oksygen) komme til. Dersom vann i kontakt med syredannende bergarter skiftes ut raskere, vil oksygenrikt vann strømme til og svartskifer i grunnen kan oksideres.

1.3 Nøkkelbegreper for syredannelse

Syredannende potensial (AP): Det syredannende potensialet (acidification potential, AP) til en bergart styres i stor grad av innholdet av sulfidmineraler. Jern (Fe) og svovel (S) er de to viktigste grunnstoffene i sulfidmineralene, som forekommer blant annet som mineralene pyritt (FeS_2 , svovelkis) og pyrrhotitt (FeS , magnetkis). Syredannelsen skjer når disse mineralene kommer i kontakt med oksygen og vann. Sulfid oksideres til sulfat, og sporstoffer som var bundet i sulfidene kan frigjøres. I tillegg dannes svovelsyre som gir lav pH og økt løselighet av sporstoffene.

Nøytraliserende potensial (NP): Dersom bergarten har et stort potensial for å nøytralisere syre, kan produsert syre nøytraliseres. Dette hindrer dermed dannelse av sur avrenning. Nøytraliseringspotensialet (NP) kommer i stor grad fra karbonater som kalsitt (CaCO_3), og kan også omtales som bufferevne. Forholdet mellom NP og AP er avgjørende for å vurdere om bergarten kan forårsake sur avrenning:

$$\frac{\text{Nøytraliserende potensial (NP)}}{\text{Syredannende potensial (AP)}}$$

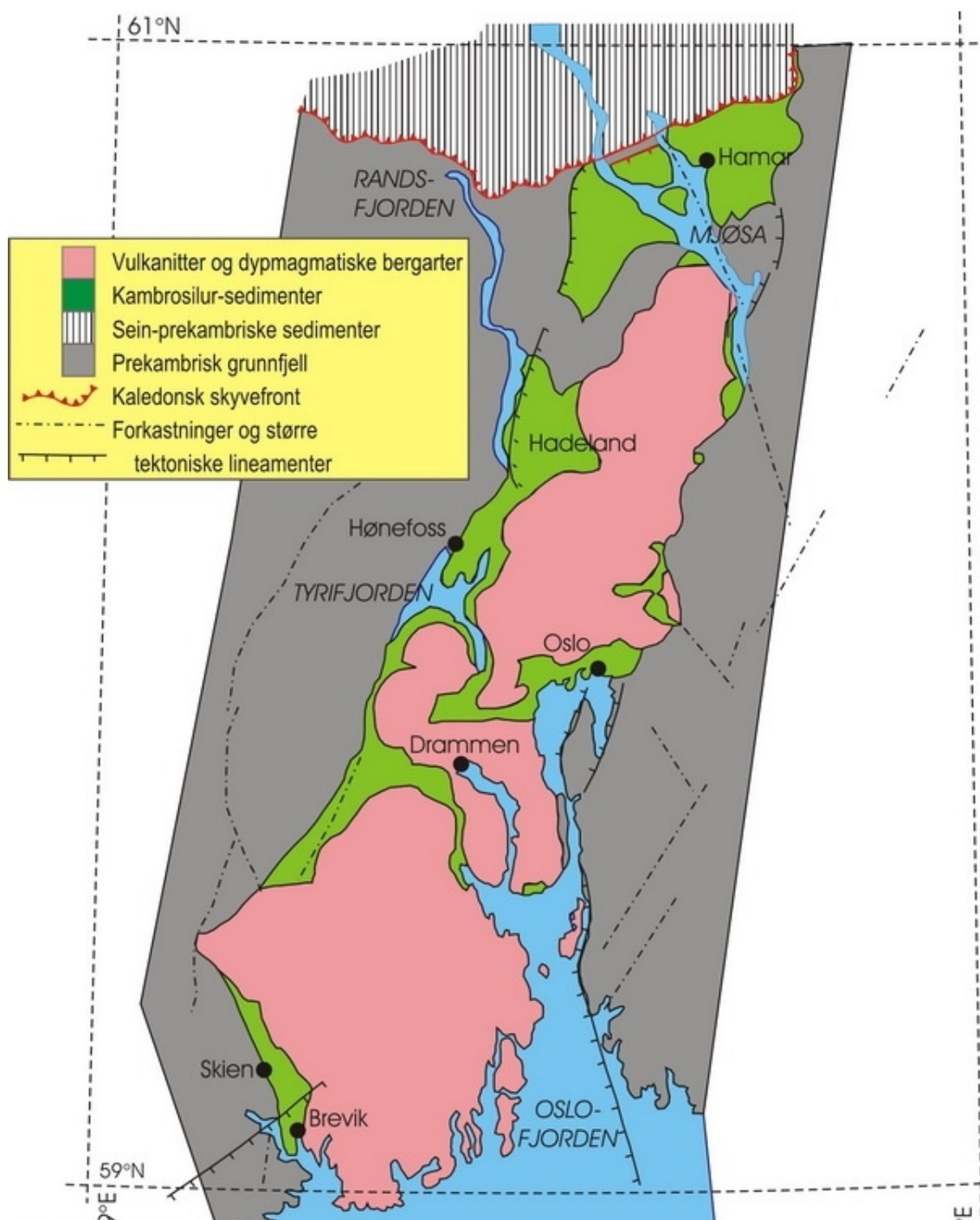
Mekanismer for syredannelse og ytterligere beskrivelse av effekter av sur avrenning, er beskrevet i Vedlegg D.

1.4 Utbredelse

De syredannende bergartene er knyttet til forekomster med relativt høyt innhold av sulfidmineraler. Dette kan dels leses ut av geologiske berggrunnskart for eksempel i Oslofeltet (grønn farge i Figur 4) eller må avdekkes gjennom geologisk kartlegging. Svartskifrene i Oslofeltet ble dannet i kambrosilur (ca. 400 – 550 millioner år siden) og deles inn etter alder (Tabell 2). De ulike lagene omtales som etasjer (engelsk: horizon) og disse kan finnes på geologiske kart. Alderen er bestemt på grunnlag av hvilke fossiler som er funnet i de ulike etasjene, og etasje 1 er den eldste. Alunskiferformasjonen omtales som etasje 1c – 3aβ i den kambrosiluriske lagrekken. Andre leirskifre med potensielt syredannende egenskaper kan påtreffes i andre nivåer i denne lagrekken, se Tabell 2. Kjennetegn og egenskaper for leirskiferlagrekken fra kambrosilur er også vist i Tabell 2. Det er flere typer leirskifer som kan forveksles visuelt, noe som kan føre til feilvurderinger. Det er viktig å skille de ulike etasjene fra hverandre for å sikre at syredannende masser håndteres forsvarlig, men også for å unngå at deponier for syredannende masser fylles opp av rene masser. Det kreves derfor en nærmere karakterisering av leirskifertype for å skille de ulike etasjene fra hverandre. Dette er nærmere beskrevet i kapittel 2 og vedlegg B.

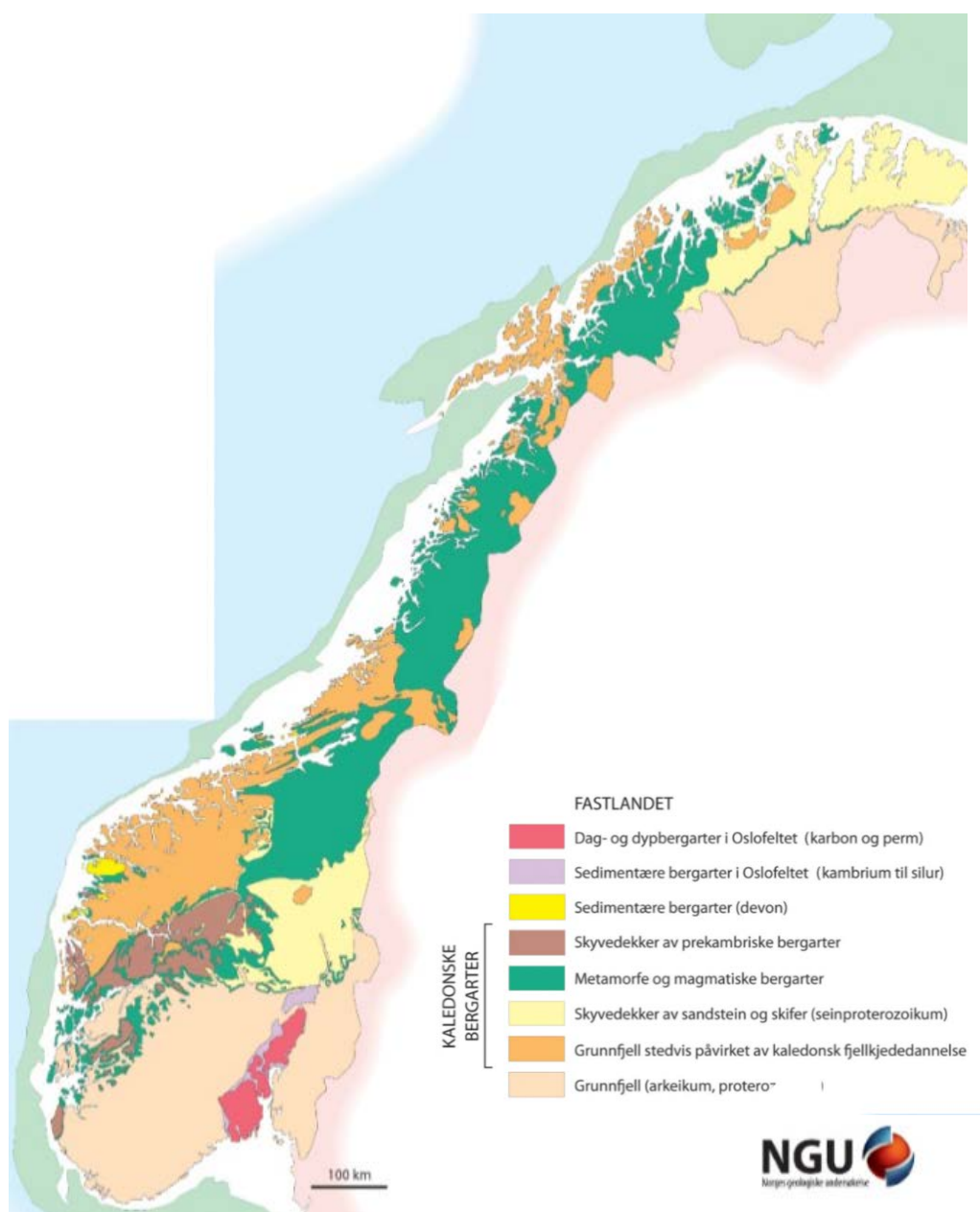
Tabell 2 Leirskiferlagrekken fra kambrosilur, med navn slik de er beskrevet i Oslo-Asker formasjonen. Eldst er angitt med 1 og yngst med 4. Geologiske hendelser har flere steder stokket om på rekkefølgen. Rekkefølgen kan derfor være forskjøvet eller deler av lagrekken kan mangle eller gjentas. Legg merke til mektigheten (tykkelsen) av de ulike lagene. Utseende og egenskaper er oppsummert for hver etasje (modifisert etter NGU berggrunnskart og Owen m. fl., 1990).

Etasje	Navn formasjon (Oslo-Asker)	Navn ledd (Oslo-Asker formasjonen)	Utseende	Egenskaper	Mektighet
4d	Grimsøya	-	Knollekalk	-	-
4cα	Venstøp	-	Leirskifer	-	-
4bδ	Solvang	-	Leirskifer med kalk	-	-
4by	Nakkholmen	-	Leirskifer	Leirskifer med knoller av pyritt i nedre del.	-
4bβ	Frognerkilen	-	Knollekalk	-	-
4bα	Arnestad	-	Leirskifer	-	> 50 m
4aβ	Vollen	-	Knollekalk	Kalkrik skifer	-
4aα	Elnes	-	Leirskifer. Grå-svart til grå farge. Rød-brunt forvittringslag.	Kalkrik. Inneholder noe sulfider, men svært lavt potensial for syredannelse.	> 80 m
3c	Huk		Tredelt med kalkstein i topp og bunn og en kalkrik leirskifer i midtparti.	Kalkrik. Vurderes ikke til å ha potensial for syredannelse.	Ca. 30 m
3bβ	Tøyen	Galgeberg	Svart til grå-svart farge. Rustbrunt forvittringslag. Innslag av gult.	Moderat til lavt potensial for syredannelse, varierende innhold av sporstoffer.	10 – 20 m
3bα	Tøyen	Hagaberg	Grønn-svart til grå-svart farge. Rød-brunt forvittringslag.	Mulig potensial for syredannelse, varierende innhold av sporstoffer.	5 – 10 m
3ay	Alunskifer	Bjørkåsholmen	Grå farge.	Kalkrik, ofte massiv etasje.	1 – 4 m
3aα, 3aβ	Alunskifer	Alunskifer etasje 3	Svart farge med gult, rød-brunt og hvitt forvittringslag.	Høyt potensial for syredannelse, høyt til moderat innhold av sporstoffer, mulig innhold av radionuklider.	5 – 20 m
2a-2e	Alunskifer	Alunskifer etasje 2	Svart farge med gult og hvitt forvittringslag.	Høyest potensial for syredannelse i lagrekken, høyt innhold av sporstoffer, mulig innhold av radionuklider.	60 – 80 m
1	Alunskifer	Alunskifer etasje 1	Sandstein, leirskifer	Ingen potensial for syredannelse.	-



Figur 4 Kart over Oslofeltet (Ramberg m. fl., 2013). Områder med svarte leirskifre forekommer i de grønne områdene.

Norgeskartet i Figur 5 viser de viktigste enhetene i norsk berggrunn. I de mørkegrønne områdene ligger mange av de samme skifertypene som er omtalt for Oslofeltet. De fleste ble dannet samtidig med skiferen i Oslofeltet, men er i ulik grad omdannet av påfølgende hendelser. Som oftest skjedde dette ved at store skyvedekker har sklidd over skiferen, omdannet bergarten og tilført den nye egenskaper. Det vanlige er at den er omdannet til fyllitt eller glimmerskifer. Ulik grad av omdanning (metamorfose) vil kunne gi ulike syredannende egenskaper. Erfaringsmessig er svartskiferen i Oslofeltet mer reaktiv enn i andre deler av landet (NGI, 1957).



Figur 5 Norgeskart som viser de viktigste enhetene i norsk berggrunn. Det er arealer med lilla farge som utgjør leirskiferområdene i Oslofeltet. De mørkegrønne arealene viser områder der det kan forekomme svarte leirskifre. Kartet er hentet fra www.ngu.no

1.5 Relevant regelverk og anbefalinger

Forurensningsforskriftens kapittel 2 omhandler opprydding i forurenset grunn ved bygge- og gravearbeider. I henhold til § 2-3a regnes *grunn som danner syre eller andre stoffer som kan medføre forurensning i kontakt med vann og/eller luft, som forurenset grunn dersom ikke annet blir dokumentert*. Dette blir først aktuelt når det graves i grunnen, og gjelder ikke urørt, naturlig grunn.

Avfallsforskriften sier at før masser som kan inneholde syredannende bergarter kan tas imot ved et avfallsdeponi, må det foreligge en basiskarakterisering i henhold til avfallsforskriften kapittel 9 (vedlegg II, pkt. 1.1). Som det framgår av bokstav j, skal basiskarakteriseringen også gi opplysninger om det vil være behov for særskilte forholdsregler i forbindelse med deponeringen. For masser som kan inneholde syredannende bergarter, vil dette i praksis innebære at massenes netto syredannende potensial og mulig risiko for avrenning med radionuklider, må være avklart i forkant av deponeringen. Kravene omtales i avfallsforskriftens kapittel 11 (farlig avfall) og kapittel 16 (radioaktivt avfall). For masser som kan inneholde syredannende bergarter, men som skal disponeres på andre måter enn deponering, legges tilsvarende vurderinger til grunn.

Tabell 3 gir en oversikt over relevant regelverk som omhandler radioaktivitet ved håndtering av svartskifer. Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA) kan sette krav i tillatelsene, jf. forurensningslovens § 16.

Tabell 3 Oversikt over regelverk som gjelder radioaktivitet som er relevant ved håndtering av potensielt syredannende svartskifer.

Forskrift	Reguleringsområde	Grenseverdier
Strålevernforskriften § 6, 6. ledd	Radonkonsentrasjoner bør holdes så lave som praktisk mulig og innenfor anbefalte grenser. Grensene gjelder for innendørs rom for varig opphold.	Tiltaksgrense 100 Bq/m ³ Øvre grenseverdi 200 Bq/m ³
Byggteknisk forskrift (TEK17)	Ivaretar radonkravene fra DSA. Krever at bygning med rom for varig opphold skal bygges med radonsperre mot grunnen og være tilrettelagt for trykkreduserende tiltak i grunnen under bygningen, som kan aktiveres når radonkonsentrasjonen i inneluften overstiger 100 Bq/m ³ .	
Forskrift om radioaktiv forurensning og avfall, Vedlegg I a, vedlegg I b, vedlegg II	Deponi for farlig avfall kan ta imot radioaktivt avfall som har en total aktivitet <10 Bq/g (≈800 mg U/kg) uten spesielle tillatelser. Deponi for ordinært avfall som ønsker mottak og håndtering av svartskifer, må alltid søke DSA. For utslipp over grenseverdiene må det søkes om utslippstillatelse fra DSA.	Radioaktivt avfall: 1 Bq/g U-nat* Deponipliktig radioaktivt avfall: 10 Bq/g U-nat* Utslippsgrense U-nat*: 100 Bq pr år Utslippsgrense ²³⁸ U: 1000 Bq pr år

** U-nat er i forskrift om radioaktiv forurensning og avfall (2010) definert som ²³⁸U i likevekt med gitte datternuklider.*

For anleggsarbeid i svartskifer vil det i mange tilfeller være nødvendig å søke tillatelse fra forurensningsmyndighet i henhold til forurensningsforskriften, samt utslippstillatelse fra DSA.

Ettersom det alltid er fare for utlekking av radionuklider fra syredannende svartskifer, må denne type avfall i praksis gå til deponi som har tillatelse fra DSA.

2 Identifisering og karakterisering av svartskifer og avfallstype

I dette kapittelet presenteres framgangsmåte for hvordan man går fram om det er mistanke om syredannende svartskifer på et tiltaksområde, samt karakterisering av skiferen og klassifisering av avfallstype som styrer videre håndtering.

Identifisering av bergartstype, som beskrevet i kapitlene 2.4, 2.5 og 2.6, er en svært viktig del av avfallskarakteriseringen for syredannende bergarter. Dette fordi de forurensende egenskapene i stor grad vil være de samme for alle forekomster av en bestemt bergartstype innenfor geografiske områder. De forurensende egenskapene til ulike typer svartskifre (bergartstyper) er godt kjent. Hvis en har identifisert etasjen skifermassene tilhører, vil en kunne gjøre en vurdering av hvilke deponialternativer som er aktuelle.

2.1 Informasjon fra geologiske kart

Geologiske kart gir informasjon om det kan forventes syredannende bergarter i et område. NGUs kartserier danner grunnlaget for en digital innsynsløsning som er offentlig tilgjengelig (www.ngu.no).

Kartmaterialet vil ikke direkte opplyse om det er en syredannende bergart til stede. Det vil bare være angitt som alunskifer, svart skifer, mørk skifer, sulfidførende bergarter, grafittholdige bergarter og liknende betegnelser, i tillegg til mer direkte betegnelser som alunskiferformasjonen, Tøyenformasjonen og tilsvarende. I tillegg kan kartene bruke lokale navn på bergarter som kompliserer tolkning.

Presisjonen i slike kart er avhengig av målestokk og ikke alltid detaljert nok. Bergartsgrenser er forbundet med usikkerhet. Videre vil geologiske kart vise kun den øverste bergarten, og det kan være syredannende bergarter lengre ned i grunnen. Det er derfor viktig å ta hensyn til lagrekken vist i Tabell 2 ved vurdering av informasjon fra geologiske kart. Lagrekken viser de ulike etasjene og sannsynligheten for at de er syredannende. Om det er leirskifre eller andre syredannende bergarter i nærliggende områder, eller om kartet viser en etasje i den kambrosiluriske lagrekken som ikke skaper problemer, kan det fortsatt være nødvendig å gjøre undersøkelser for å kartlegge muligheten for å støte på syredannende skifer dypere under overflaten. Slike undersøkelser bør gjøres til underkant av planlagt tiltak, inkludert grunnvannsnivåendring.

2.2 Geofysiske metoder for å identifisere svartskifer

Sulfidmineralene i bergartene har en høy ledningsevne og dette lar seg registrere med geofysiske metoder. Dette kan være å sette sonder ned i bakken eller skanning fra helikopter (electrical resistivity tomography, ERT). Ofte er det nødvendig å indusere et elektromagnetisk felt i det området som skal undersøkes og målinger av resistiviteten på stedet avslører hvor bergarter med høy ledningsevne befinner seg.

Geofysiske metoder er velegnet til en oversiktskartlegging for et større område som er dårlig geologisk kartlagt eller har stor geologisk variasjon. En slik måling vil derfor være et utgangspunkt for å finne områder som bør undersøkes nærmere. De geofysiske målingene vil ikke kunne avgjøre om bergarten er syredannende eller ikke, og prøver av skiferen må fortsatt tas ut og analyseres for å avklare dette.

2.3 Geologisk kartlegging med prøvetaking i felt

Geologisk kartlegging i felt eller på byggeplass er ofte nødvendig for å treffe de rette beslutningene. Hensikten med slik kartlegging er å avdekke om det er potensielt syredannende skifer til stede, samt å avklare hvor prøver skal tas. Slik kartlegging bør derfor utføres av en geolog eller andre med særskilt kompetanse, og tidlig i planfasen.

Ved behov for uttak av store mengder berggrunn, som for eksempel i tunnelprosjekter, kan det utføres kjerneboringer for å kartlegge bergartsfordelingen i mer detalj. Dette kan følges opp ved å grave striper eller grøfter på tvers av skiferlagenes orientering, for å få en profil som kan gi et representativt prøvegrunnlag.

Behovet for kartlegging vil henge sammen med forventet omfang og volum på uttak av svarte leirskifer. En god kartlegging tidlig i prosjektet bidrar til større forutsigbarhet i byggeperioden og bedre økonomisk oversikt.

2.3.1 Representativ prøvetaking på gravetomta

Dersom kartlegging eller eksisterende kunnskap viser innhold av svartskifer med syredannende potensial, er det nødvendig å ta ut bergartsprøver. Prøvetaking skal sikre et tilstrekkelig antall prøver for identifisering av bergartstypen og overskuddsmasser i alle deler av et bygge- eller anleggsprosjekt. For skifer er forståelsen av hvordan lagene er orientert i grunnen avgjørende for hvordan prøveprogrammet utarbeides. Det vil derfor være en fordel at prøvetakingen utføres av en person med geologisk kompetanse.

Det anbefales at det tas minimum fire prøver fra et anleggsområde som kan inneholde svartskifer, og det bør minimum tas to prøver fra alle adskilte lag som kan inneholde svartskifer. Det er viktig å ikke blande lagene eller prøvene, de bør derfor samles inn, oppbevares og analyseres hver for seg. Hver prøve bør være på minimum 200 g materiale for å sikre at det er nok til nødvendige analyser. Det er avgjørende at prøvematerialet er representativt for bergarten. Tas det små prøver, er det vanskeligere å få en representativ prøve. Prøvene bør merkes nøye med lag og dato, samt sted eller koordinater. Det er viktig at prøvematerialet ikke består av eller inneholder kalkrike lag eller knoller, dersom det er svartskifer som skal prøvetas og klassifiseres som syredannende eller ikke. Dette vil kunne gi misvisende resultater i den kjemiske analysen. Slike lag kan eventuelt prøvetas for seg selv. Prøvene bør tas som enkeltprøver, ikke blandprøver. Prøvene knuses og homogeniseres (knuses) i lab før analyse.

Dersom en svartskifer eller annen bergart som mistenkes å være syredannende, er dominerende på en lokalitet, er det viktig at den prøvetas og at nærliggende, men avvikende bergarter også blir prøvetatt, for vurdering og sammenligning mot den dominerende bergarten. Prøvetaking bør gjøres av uforvitret berg, ettersom forvitrede masser kan ha en annerledes sammensetning og gi misvisende svar.



Figur 6 Prøver fra kjerneboring. De øverste fire kjernene er galgebergskifer (3b6) og de nederste seks kjernene er fra Hukformasjonen (3c). Se tabell 2 for nærmere forklaring av etasjene. Foto: Erik Endre

2.3.2 Tunneler og undergrunnsanlegg

For tunneler og haller i berg er det viktig å avklare hvilke leirskifertyper som kan påtreffes nedover i grunnen. I slike prosjekter vil det derfor bli boret fra overflaten og ned til underkant av tunneltraséens nivå. Her er det viktig å bruke den geologiske forståelsen til å velge ut punkter i overflaten ned til traséens nivå. Borkjernene logges, noe som gir godt grunnlag til å forutsi hvor de aktuelle bergartene kan påtreffes under tunneldrivingen. Borkjernene lagres for videre undersøkelser og prøvetaking (Figur 6).

2.4 Bestemmelse av etasje ved hjelp av indeksfossiler

Egenskapene til svartskifer er sterkt påvirket av etasjen bergmassen tilhører i den kambrosiluriske lagrekken. Etasjene bestemmes med størst sikkerhet ved å undersøke hvilke fossiler prøven inneholder. Ettersom metoden er tidkrevende og må gjøres av

eksperter, er det utviklet andre og raskere metoder for å fastslå etasjetilhørighet. Dette beskrives i kapittel 2.5, 2.6 og i vedlegg B.

2.5 Geokjemiske analyser

2.5.1 Laboratorieanalyser

Når prøver er samlet inn, skal de sendes til et laboratorium for kjemisk analyse. Analysen bør inkludere hovedelement (HE) og sporstoffer (SS) (inkludert uran (U) og thorium (Th)), totalt uorganisk karbon (TIC) og totalt organisk karbon (TOC). Tabell 4 gir en oversikt over grunnstoffer og andre forbindelser som bør analyseres for å kunne identifisere etasjen ved hjelp av trekantdiagram som beskrevet i kapittel 2.6.4. Det er ikke nødvendig å analysere absolutt alt i tabellen, men har man for få parametere kan geokjemisk identifisering av etasje bli vanskelig. Det er spesielt viktig med resultater for Fe, S, TIC/Ca og U for den videre evalueringen. Flere laboratorier har standardiserte pakker de tilbyr for analyse av potensielt syredannende skifer.

Analysene gir grunnlag for å karakterisere ulike typer leirskifer og vurdere det syredannende potensialet, samt innholdet av radionuklider/uran og dermed potensiell forurensningsfare og radonfare.

Tabell 4 Kjemisk analyse av bergarter med hoved- (HE) og sporstoffer (SS), totalt uorganisk karbon (TIC) og totalt organisk karbon (TOC).

Parameter	Forkortelse	Hovedelement (HE), Sporstoff (SS)
Tørrstoff	-	-
Totalt uorganisk karbon	TIC	-
Totalt organisk karbon	TOC	-
Glødetap	LOI	-
Silisium	Si	HE
Aluminium	Al	HE
Kalsium	Ca	HE
Jern	Fe	HE
Magnesium	Mg	HE
Natrium	Na	HE
Kalium	K	HE
Svovel	S	HE
Titan	Ti	HE
Mangan	Mn	HE
Fosfor	P	HE
Arsen	As	SS
Barium	Ba	SS
Beryllium	Be	SS
Kadmium	Cd	SS
Kobolt	Co	SS
Krom	Cr	SS
Kobber	Cu	SS
Kvikksølv	Hg	SS
Molybden	Mo	SS
Niob	Nb	SS
Nikkel	Ni	SS
Bly	Pb	SS
Scandium	Sc	SS
Tinn	Sn	SS
Strontium	Sr	SS
Vanadium	V	SS
Wolfram	W	SS
Yttrium	Y	SS
Sink	Zn	SS
Zirkonium	Zr	SS
Uran	U	SS
Thorium	Th	SS

2.5.2 Håndholdt XRF

Håndholdte røntgen fluorescens instrumenter (XRF) gjør det mulig å bestemme grunnstoffinnhold i prøvematerialet i felt. Håndholdte XRF-instrumenter har ulike spesifikasjoner og eksisterer i flere modeller og fra ulike produsenter. Ved riktig bruk kan de gi kvantitative analyser av innhold av flere grunnstoffer, med unntak av bl. a. karbon. XRF-instrumenter vil heller ikke kunne måle total uorganisk karbon (TIC), som trengs for å anslå nøytraliserende potensial (NP). Dersom det antas at Ca (kalsium) hovedsakelig stammer fra kalsiumkarbonat (CaCO_3), kan karbonater (TIC) estimeres fra Ca-konsentrasjonen. Dette er imidlertid beheftet med usikkerheter fordi andre mineraler også bidrar til Ca-innholdet. For leirskifre i den kambrosiluriske lagrekken vil dette ofte være et godt estimat, men det anbefales å bruke en sikkerhetsfaktor på 20 %, det vil si at 80 % av innholdet av Ca antas å representere CaCO_3 , og TIC beregnes fra dette. I tillegg anbefales det at man supplerer med enkelte laboratorieanalyser av TIC og/eller røntgendiffraksjon (XRD, brukes for å måle mineraler) for sammenligning.

Dersom håndholdte XRF-instrumenter skal brukes til kvantitative analyser, må det enkelte instrument være kalibrert for bergartene som finnes i et prosjekt. Dette gjøres ved at resultater fra XRF-målinger sammenlignes med laboratorieanalyser av de samme prøvene i henhold til analyseparametere i Tabell 4. Dette hindrer systematiske feil som skyldes at ulike bergarter vil gi noe varierende signaler for det samme innholdet av et grunnstoff.

2.6 Tolkning av analyseresultatene: er massene syredannende?

2.6.1 Generelt om metode for identifisering og klassifisering

For å kunne identifisere og karakterisere svartskifre uten å måtte identifisere aldersbestemte fossiler, er det utviklet en metode basert på å gjenkjenne det kjemiske fingeravtrykket til de ulike etasjene (NGU, 2009, Pabst m. fl., 2017). Det er fokusert på en tolkningsmetode som gjør det mulig å skille mellom skifer som er syredannende og skifer som ikke er syredannende, i den kambrosiluriske lagrekken. De neste underkapitlene beskriver vurderingspunktene som er nødvendige for å identifisere syredannende svartskifer. Tolkningen av de kjemiske analysene består av følgende ledd:

1. Forholdet mellom AP og NP (syredannende og nøytraliserende potensial) gir et bilde av bergartens syredannende potensial (kapittel 2.6.2).
2. Forholdet mellom jern (Fe) og svovel (S). Dette forholdet sier blant annet noe som hvor sannsynlig det er at S foreligger som sulfider (kapittel 2.6.3 og vedlegg B).
3. Identifisering av hvilken geologisk etasje skiferen tilhører ved bruk av trekantdiagram (kapittel 2.6.4).

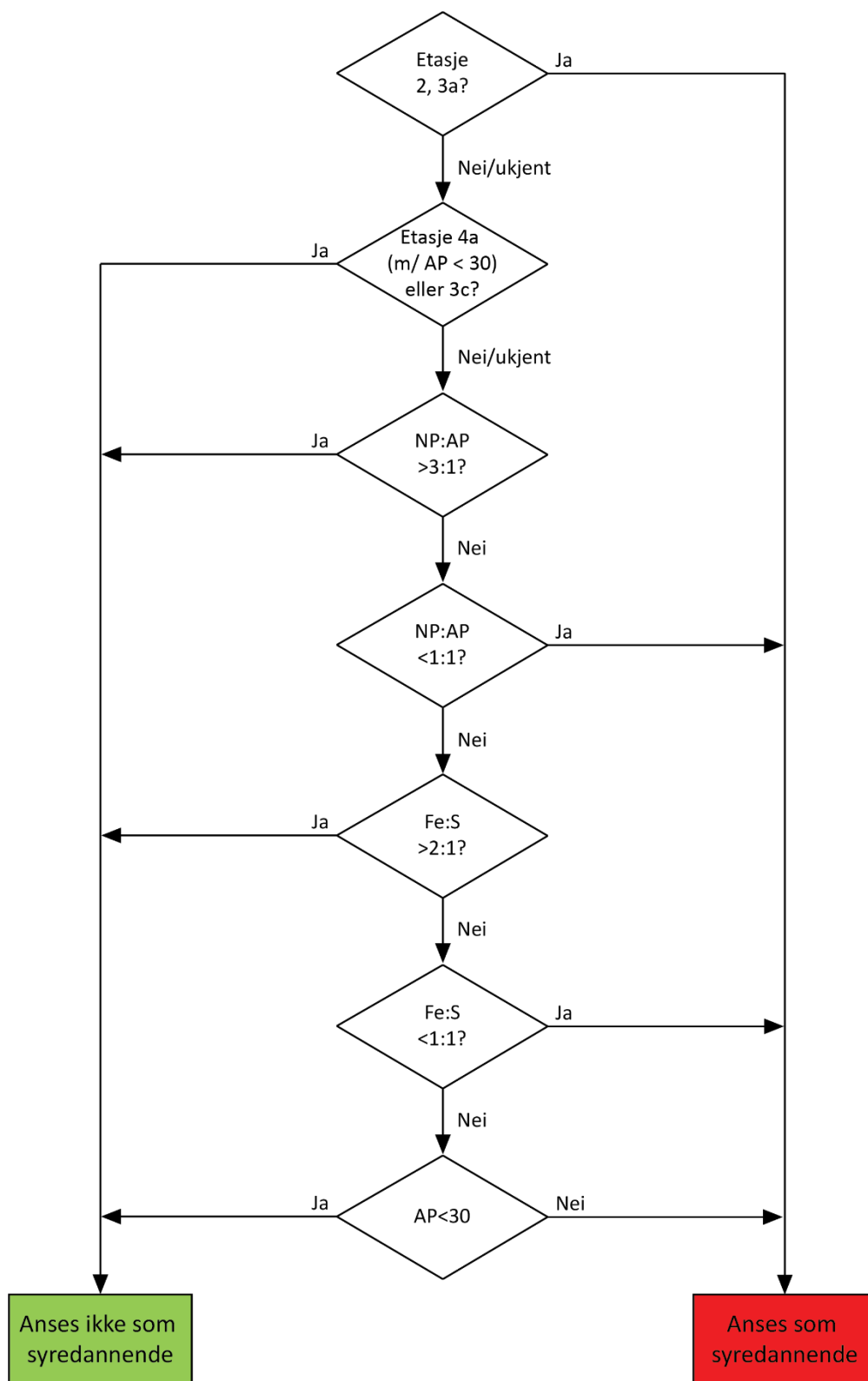
Vurdering av syredannende potensial kan også gjøres uten å identifisere hvilken etasje skiferen tilhører (punkt 3), men etasjeidentifisering gir et bredere vurderingsgrunnlag.

Vær oppmerksom på at enkelte sporstoffer (As, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, Sb, U og Zn) kan frigjøres ved nøytrale pH-forhold, også kalt NRD (neutral rock drainage).

Flytdiagrammet i figur 7 summerer opp alle vurderingspunktene. I enkelte tilfeller kan det være nødvendig med en nærmere identifisering av skiferens plassering og hvilken etasje den tilhører. I tilfeller der dette ikke lar seg gjøre, eller er praktisk umulig, kan en forenkling være å anta at dersom AP er over 30 (kg CaO₃ eq/t), anses skiferen å være potensielt syredannende. Det er da ikke nødvendig å identifisere eller vite hvilken etasje skiferen tilhører. Denne antagelsen gjelder kun for leirskifre som har gått gjennom alle steg i flytdiagrammet i Figur 7, og dermed har fått evaluert NP:AP og Fe:S forhold. Det gjelder generelt ikke for andre bergarter.

Flytdiagrammet er veiledende, og har man annen dokumentasjon som viser at massene ikke er syredannende (f. eks. mineralkarakterisering med XRD) kan man vurdere annen behandling av massene. Bruken av totalt svovel for å estimere AP er en forenkling, og hvis man kan dokumentere at svovel ikke foreligger som sulfider, skal ikke massene klassifiseres som syredannende.

Se også vedlegg B for flere detaljer samt eksempler på tolkning av analysedata for svartskifer.



Figur 7 Flytdiagram som sammenfatter beslutningsprosessen for karakteriseringen av leirskifer i den kambrosiluriske lagrekken.

2.6.2 Syredannende potensial: AP-NP diagram

Det syredannende potensialet AP (Acidification Potential) vurderes i forhold til nøytraliseringspotensialet NP (Neutralisation Potential). Metoden baserer seg på målte konsentrasjoner av TIC (total uorganisk karbon) og S (svovel) i bergarten (Lawrence og Wang, 1996; MEND, 2009). Konsentrasjonene av TIC og S regnes om til ekvivalente mengder kalsiumkarbonat (CaCO_3) i kg/tonn. For S representerer dette hvor mye kalsiumkarbonat som er nødvendig for å nøytralisere den potensielle mengden syre som kan dannes. Alt uorganisk karbon (TIC) antas å stamme fra karbonater og all svovel antas å stamme fra sulfider. Metoden kan derfor føre til en overestimering av både det nøytraliserende og syredannende potensialet. Metoden bør kun brukes for bergarter der det finnes informasjon om innholdet av mineraler, ettersom dette sier noe om sannsynligheten for at S foreligger som sulfider og TIC som CaCO_3 . Man kan også analysere mineralinnholdet for å få informasjon om mineralogien. Et høyt nøytraliseringspotensial i forhold til syredannende potensial (NP:AP), gir en indikasjon på at prøven sannsynligvis ikke er syredannende og et lavt NP:AP indikerer at prøven kan være syredannende.

I vurderingen av forholdet mellom det syredannende og nøytraliserende potensialet er det viktig å ta i betraktning at forvittringsreaksjoner som er nøytraliserende og forvittringsreaksjoner som er syredannende, ikke er like raske. Karbonatmineralene (særlig CaCO_3) kan forvitte raskere enn sulfidene. I et slikt tilfelle kan bufferkapasiteten være brukt opp tidligere enn de syredannende mineralreaksjonene. I tillegg er det en del usikkerhet i metoden. Derfor bør det nøytraliserende potensialet være tre ganger høyere enn det syredannende potensialet for at man uten andre vurderinger kan anta at skiferen ikke er syredannende.

Det nøytraliserende potensialet (NP) kan beregnes ved hjelp av følgende formel:

$$NP = 83,33 \times \% TIC$$

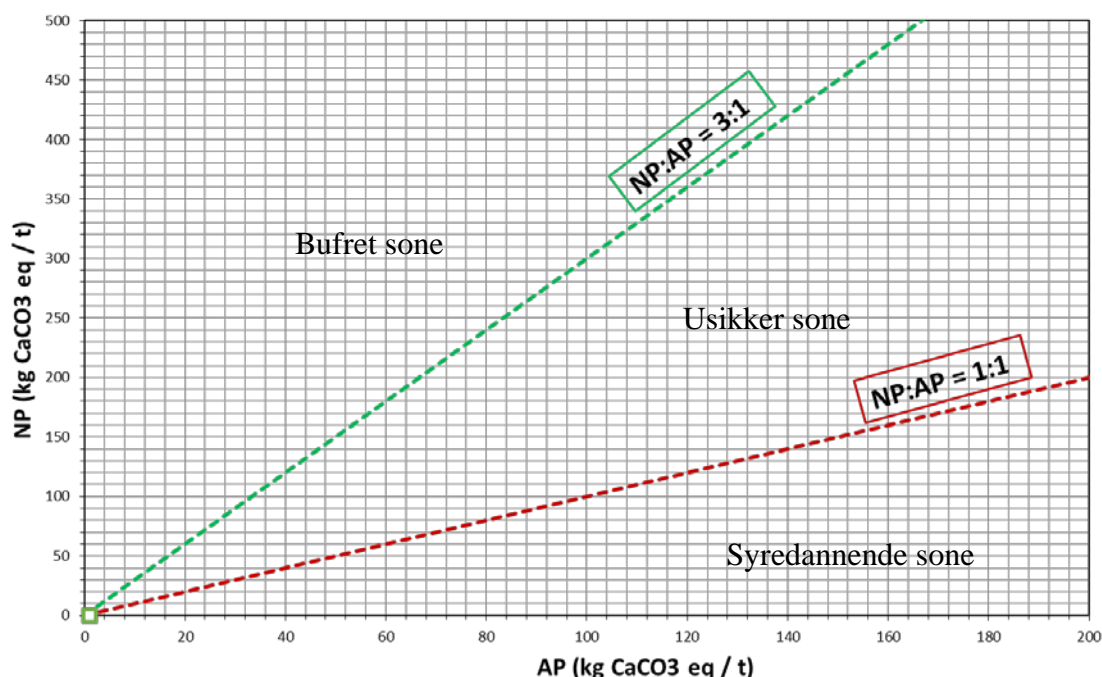
Hvor NP er nøytraliserende potensial av karbonater (gitt i kg CaCO_3/t) og % TIC er innhold av uorganisk karbon i prosent.

Det syredannende potensialet (AP) kan beregnes fra formelen:

$$AP = 31,25 \times \% S_{\text{sulfider}} \approx 31,25 \times \% S$$

Hvor AP er syredannende potensial av sulfider (gitt i kg CaCO_3/t), % S_{sulfider} er sulfidinnhold i prosent og % S er svovelinnhold i prosent.

Figur 8 viser et diagram med forholdet mellom AP og NP (begge angitt i kg CaCO_3 per tonn). Det er i diagrammet lagt inn linjer som viser NP:AP forhold på 1:1 og 3:1. En prøve vil, basert på analyseresultatene, bli plassert i en av tre soner: 1) syredannende, 2) usikker, og 3) bufret.



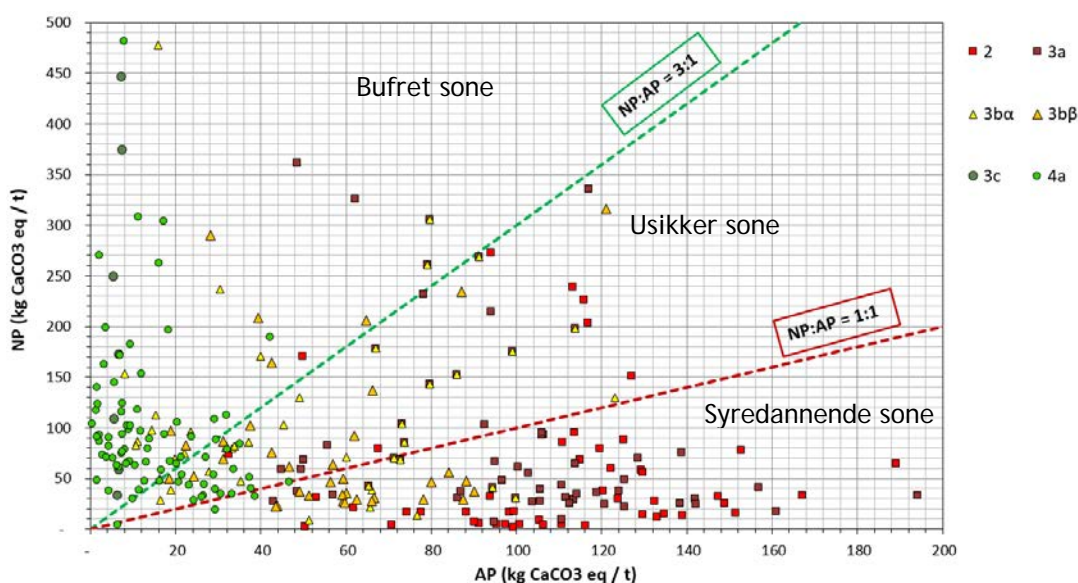
Figur 8 Nøytraliserende potensial (NP) plottet mot syredannende potensial (AP) for leirskifer. Tre soner vises: bufret sone ($NP:AP > 3:1$), usikker sone ($1:1 < NP:AP < 3:1$) og syredannende sone ($NP:AP < 1:1$).

For at en prøve skal anses som ikke syredannende, anbefales det at det nøytraliserende potensialet (NP) er mer enn tre ganger høyere enn det syredannende potensialet (AP).

Dersom det syredannende potensialet er like stort som nøytraliseringspotensialet ($NP:AP = 1:1$), vil prøven betraktes som potensielt syredannende. Bakgrunnen for dette er at de nøytraliserende bestanddelene (karbonatene) da er forventet å være akkurat tilstrekkelig til å nøytralisere det syredannende potensialet. I tillegg kan karbonatene vaskes ut før syredannelsesprosessen er ferdig, ettersom de forvitrer lettere enn sulfidene, samt at det er en del usikkerheter i antagelsene som ligger til grunn for beregningene. Dette gir et potensielt syreoverskudd.

I enkelte sammenhenger opereres det med en nedre grense på 1 % S (tilsvarer AP på ca. 30 kg CaCO₃ per tonn) for hvorvidt bergmassene er syredannende/reaktive eller ikke. NGI mener at dette ikke kan brukes som eneste kriterium ved karakterisering av svartskifer. Se også Figur 7 og Figur 12.

Figur 9 viser hvordan Oslofeltets skiferetasjer fordeler seg i ulike soner i NP-AP diagrammet. Etasje 2 og 3a tilhører alunskiferformasjonen. Prøver fra ulike skiferetasjer grupperer seg i ulike deler av diagrammet, men det er også overlapp mellom etasjer.

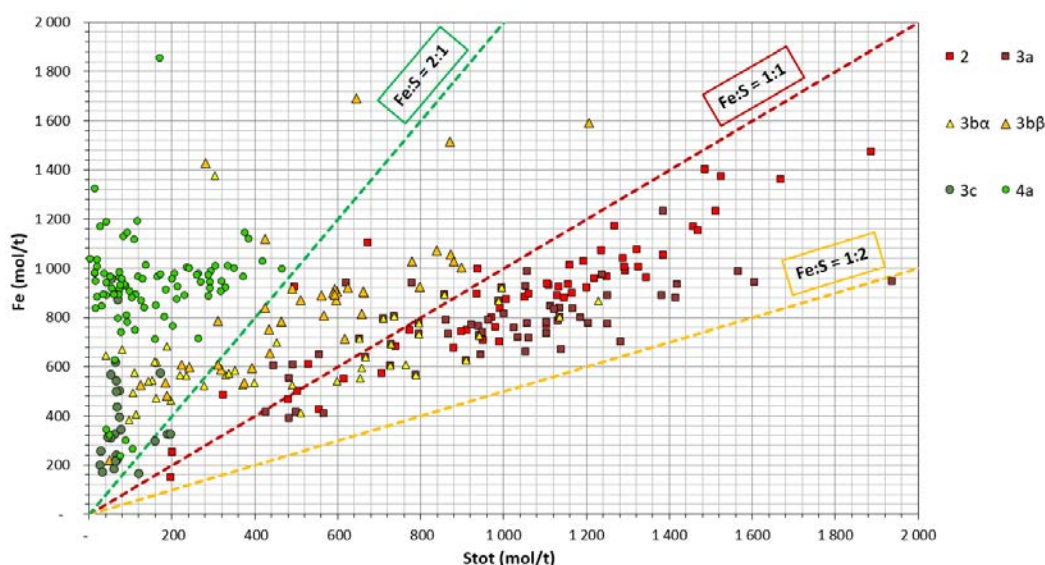


Figur 9 NP-AP diagram med referanseprøver fra ulike etasjer plottet inn: Alunskiferformasjonen (2 og 3a), Hagabergformasjonen (3bα), Galgebergledet (3bβ), Hukformasjonen (3c) og Elnesformasjonen (4a). Fargene på referanseprøvene indikerer sannsynligheten for at etasjen er syredannende i NP:AP-diagrammet (rødt=syredannende, gul=usikker, grønn=ikke syredannende).

2.6.3 Fe-S diagram

Forholdet mellom jern (Fe) og svovel (S) indikerer hvor lett sporstoffer kan frigjøres fra svartskifer, samt sannsynligheten for at svartskiferen er syredannende. For mer informasjon om dette, se Vedlegg D.

Figur 10 viser forholdet mellom Fe og total S (S_{tot}) for referanseprøver fra ulike etasjer i leirskiferrekken fra Oslofeltet. Som man ser av figuren plasserer hovedmengden av alunskifer (etasjer 2 og 3a) seg i feltet mellom $Fe:S = 1:1$ og $Fe:S = 1:2$. Dersom forholdet mellom $Fe:S$ er mindre enn 1:1 vil massene antas å ha et syredannende potensial. Er dette forholdet større en 1:1 er det fortsatt knyttet en usikkerhet til hvorvidt bergarten er syredannende eller ikke, og videre vurdering kan være nødvendig. Et $Fe:S$ forhold større enn 2:1 indikerer at deler av Fe og sporstoffer er bundet i silikater og oksider, og vil være mindre tilgjengelige enn slike grunnstoffer bundet i sulfider.



Figur 10 Forholdet mellom Fe og S. Denne figuren indikerer i hvilke grupper av mineraler, jern og svovel er bundet. Plasseringen av referanseprøver fra Alunskiferformasjonen (2 og 3a), Hagabergformasjonen (3b α), Galgebergledet (3b β), Hukformasjonen (3c) og Elnesformasjonen (4a) er også vist. Fargene på referanseprøvene indikerer sannsynligheten for at etasjen er syredannende i NP:AP-diagrammet i figur 8 (rødt=syredannende, gul=usikker, grønn=ikke syredannende).

2.6.4 Identifisering av etasje ved bruk av trekantdiagram

Trekantdiagrammer kan benyttes for å identifisere hvilken etasje i den kambrosiluriske lagrekken (Tabell 2) en svartskiferprøve tilhører. Det er ikke alltid nødvendig å bestemme etasje, men det er et nyttig verktøy for å hjelpe med avgjørelsen om hvorvidt massene er syredannende (Figur 7) og hvordan massene skal behandles videre (Figur 12). Dette skyldes at geokjemiske egenskaper, slik som syredannende potensial, henger nøye sammen med perioden som berggrunnen ble dannet og dermed etasje. I det følgende gis en oversikt over metoden. Se vedlegg B for flere detaljer. I vedlegget gis også eksempler på tolkning av analysedata fra svartskifer.

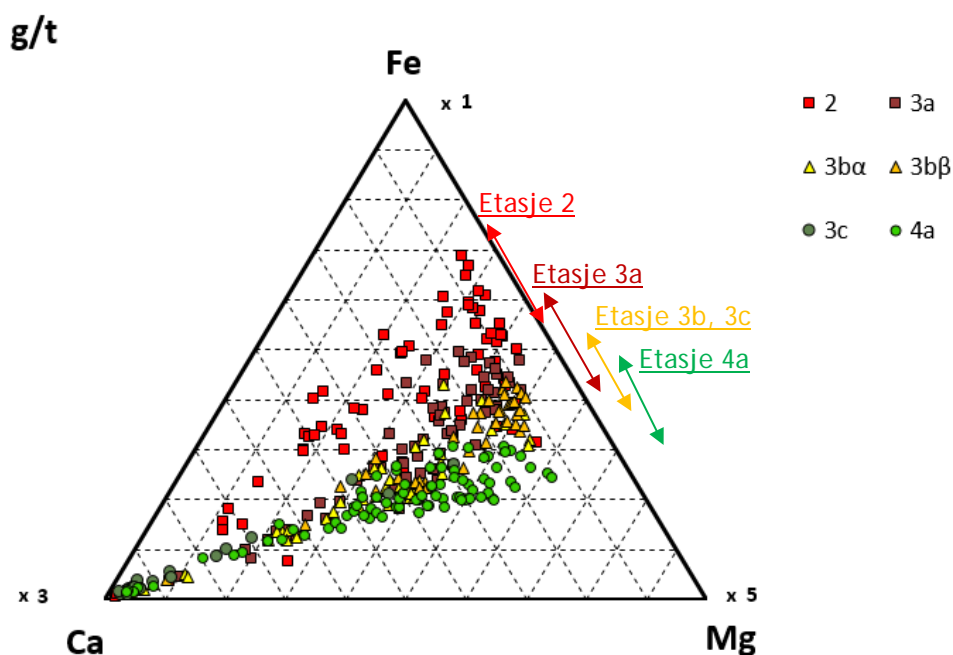
Bruk av trekantdiagrammer er en relativt avansert tolkningsmetode som krever et godt datagrunnlag for å gi pålitelige resultater. Datagrunnlaget for Figur 9 og Figur 10 kan finnes i Vedlegg C og i Excel-filen som tilhører dette dokumentet (<https://www.ngi.no/Prosjekter/Haandtering-av-syredannende-bergarter>). Tolkninger er bare mulig å gjennomføre med prøver av skiferbergarter i den kambrosiluriske lagrekken. Dette fordi metoden er basert på referansemateriale av skifer med kjent opprinnelse (bestemt ved hjelp av indeksfossiler).

Trekantdiagrammene brukes for å finne mønstre i hvordan referanseprøvene fra de ulike etasjene fordeler seg, og dette kan brukes til å identifisere hvilken etasje en ukjent prøve tilhører. Merk at det er noe skjønn involvert i vurderingen av etasje med denne metoden,

og at det er nødvendig å bruke et større antall trekantdiagrammer med ulike parametere for å fastslå hvilken etasje en prøve tilhører. Etasje 3b er erfaringsmessig vanskelig å skille fra andre etasjer, og her kan man trenge enda flere trekantdiagrammer.

Et eksempel med referansedataene er vist i Figur 11. Her er konsentrasjonen av Ca og Mg vektet henholdsvis 3 og 5 ganger før konsentrasjonen summeres. Grunnen til at én eller to parametere vektet i et trekantdiagram er for å få en passe spredning i datapunktene for å skille ulike grupper fra hverandre.

Det vil være noe overlapp mellom trendene til de ulike leirskiferformasjoner (Figur 11). En pålitelig identifisering krever derfor en kombinasjon av resultater fra flere trekantdiagrammer med ulike sammensetninger av grunnstoffer eller andre parametere. I vedlegg B er det brukt åtte ulike diagrammer til å identifisere prøvene.



Figur 11 Eksempel på et trekantdiagram der grunnstoffene Fe, Mg og Ca sammenlignes for å se på sammenfallende egenskaper i prøvene. Konsentrasjonen av Ca og Mg er vektet henholdsvis 3 og 5 ganger før konsentrasjonen summeres. Diagrammet viser forenklede utviklingstrender for prøver fra Alunskiferformasjonen (2 og 3a), Tøyenformasjonen (3b), Hukformasjonen (3c) og Elnesformasjonen (4a). Fargene på referanseprøvene indikerer sannsynligheten for at etasjen er syredannende i NP:AP-diagrammet (rødt=syredannende, gul=usikker, grønn=ikke syredannende).

2.7 Klassifisering av avfallstype

Hvis man har identifisert hvilken etasje svartskifermasser tilhører, som beskrevet i kapittel 2.6, kan man gjøre en vurdering av aktuelle deponialternativer. Videre er det flere andre forhold man bør vurdere, som er beskrevet i dette delkapittelet.

Før masser som kan inneholde syredannende bergarter kan tas imot ved et avfallsdeponi, må det foreligge en basiskarakterisering i henhold til avfallsforskriften kapittel 9 (vedlegg II, pkt. 1.1). Som det framgår av bokstav j, skal basiskarakteriseringen også gi opplysninger om det vil være behov for særskilte forholdsregler i forbindelse med deponeringen. For masser som kan inneholde syredannende bergarter, vil dette i praksis innebære at massenes netto syredannende potensial og mulig risiko for avrenning med radionuklider, må være avklart i forkant av deponeringen.

Det er avfallsprodusenten eller avfallsbesitter som skal sørge for basiskarakteriseringen. I saker som dette vil det vanligvis være tiltakshaver på gravetomta eller tiltakshavers entreprenør som har dette ansvaret. Omfanget av karakteriseringen av massene avhenger av hvilken kartlegging berggrunnen på gravetomta har gjennomgått og om massene har blitt blandet.

I dette kapittelet er det gitt en kort beskrivelse av aktuelle metoder for karakterisering og klassifisering.

2.7.1 Utlekkingspotensial

Resultatene fra tradisjonelle riste- og kolonnetester vil gi begrenset informasjon om utlekkingspotensialet til syredannende svartskifer på sikt. Testene vil vise utlekking for den tilstanden massene er i ved testøyeblikket. Dette vil blant annet avhenge av forvitningsgrad, som også kan observeres: farger på utfellinger/sekundærmineraller, oppsmuldring av steinmasser etc. Hva som lekker ut vil være avhengig av omfang av forvitningsreaksjoner i bergarten; en uforvitret prøve vil ha begrenset utlekking av de stoffene som frigjøres som følge av syredannende prosesser. Noen stoffer vil lekke ut også fra uforvitrede prøver, som uran og molybden. Utlekkingspotensial kan vurderes ved å sammenligne utlekkingsresultater fra synlig uforvitrede og forvitrede prøver av en syredannende bergart. Dette kan gi en antydning på hva som kan skje på lengre sikt ved deponering av masser som per i dag betegnes som uforvitret.

En ristetest går ut på at en avfallsprøve ristes med vann i ett døgn og vannkjemien analyseres deretter. I en kolonnetest pumpes vann gjennom en avfallsprøve og det kan tas ut prøver av utlekkingsvannet ved ulike tidspunkt, som blir analysert for vannkjemi.

Det anbefales at det gjøres utlekkingstester for alle masser av potensielt syredannende svartskifer, for å avgjøre akutt utlekkingsrisiko og forvitningsomfang. I Tabell 5 beskrives to utlekkingstester som kan brukes til å vurdere utlekkingsrisiko og forvitningsomfang.

Tabell 5 Oversikt over metoder for utlekkingstester.

Type test	Beskrivelse	Informasjon/ begrensninger	Standard/ referanse
Ristettest	Prøven, i fast fase (S), blandes med vann (L) i et forhold på L/S = 10 og ristes så over en periode på 24 timer. Det tas så en prøve av vannet som filtreres på 0,45 µm og analyseres for pH og metaller.	Gir informasjon om hva som kan lekke ut når et materiale kommer i kontakt med store mengder vann. Surheten på vannet og mengden metaller vil kunne si noe om forvittringsgraden av et materiale.	NS-EN 12457-1,2,3 og 4: 2003
Kolonnetest	Prøven, i fast fase (S) pakkes i en kolonne som en lar vann (L) strømme igjennom. Når en bestemt mengde vann i forhold til fast stoff har strømmet gjennom prøven, tas det prøver av eluatet som filtreres på 0,45 µm og analyseres for pH og metaller. Det tas som regel ut eluater ved L/S = 0,1, 2 og 10.	Gir informasjon hva som kan lekke ut når et materiale kommer i kontakt med vann over tid. L/S = 0,1 gir informasjon om hva som vil bli løst i en første utskylning av materialet. Surheten på vannet og mengden metaller vil kunne si noe om forvittringsgraden av et materiale.	CEN/TS 14405: 2006

Det vil også være behov for analyse av radioaktive stoffer for å undersøke om det er potensial for utlekking som overskrider grenseverdier i forskrift om forurensningslovens anvendelse på radioaktivt avfall og forurensning, vedlegg II. Dersom dette er tilfelle, vil det kreves tillatelse til utslipp fra DSA.

2.7.2 Vurdering av radioaktivitet

Relevant regelverk er omtalt i kapittel 1.5 og for radioaktivitet oppsummert i Tabell 3. Her nevnes likevel noen nøkkelpunkter.

Utgravde masser med en total aktivitet på ≥ 1 Bq/g (≈ 80 mg/kg ^{238}U i likevekt med datternuklider) defineres etter forskrift om radioaktiv forurensning og avfall vedlegg I a som radioaktivt avfall og skal håndteres i henhold til avfallsforskriftens kapittel 16. Dette kan være tilfelle for en del syredannende leirskifre.

Selv om massene kommer under grenseverdier for radioaktivt avfall, kan syredannende svartskifer ha et potensial for utlekking av radioaktive stoffer. Det vil derfor i noen tilfeller være nødvendig med utslippstillatelse fra DSA for virksomheter som gjør tiltak i syredannende svartskifer. Dette kan for eksempel være i store samferdselsprosjekter som håndterer svartskifer. På grunn av utlekkingspotensialet stilles det også krav til at deponiet som skal ta imot disse massene, har tillatelse til radioaktivt utslipp fra DSA.

Urørte, naturlige løsmasser eller urørt berggrunn regnes ikke som radioaktivt avfall før det graves ut/flyttes.

2.7.3 Vurdering av sporstoffinnhold

Svartskifre kan inneholde relativt høye konsentrasjoner av potensielt giftige sporstoffer ("tungmetaller"). Analysene som beskrives her gjøres for å estimere det syredannende potensialet til en bergart, samt for å utelukke at skiferen inneholder nivåer av grunnstoffer over grensene for farlig avfall. Sporstoffene i syredannende svartskifer er naturlig forekommende og vil hovedsakelig kunne bli mobile i betydelig grad som en direkte følge av sulfidforvitring. Det vil ikke være korrekt å sammenligne disse verdiene med tilstandsklassene i Miljødirektoratets veileder *Helsebaserte tilstandsklasser for forurensset grunn*, TA-2553 (SFT, 2009). Disse tilstandsklassene gjelder for jord og menneskeskapte forurensningskilder.

Grenseverdiene for farlig avfall er dog gjeldende, men vil erfaringsmessig ikke overskrides i svarte leirskifre (vedlegg C).

2.7.4 Uttak av masser med innhold av svartskifer

Det er viktig at masser av syredannende svartskifer, så langt det er mulig, skilles fra andre masser. Dersom massene ikke sorteres, kan resultatet være at all masse må behandles som syredannende, noe som vil gi betydelig større volum til deponi. Blandete masser kan oppstå ved uttak av masser, spesielt i sammenheng med tunneldriving. Håndtering av blandmasser med innhold av syredannende svartskifer byr på utfordringer.

I tvilstilfeller, hvor det ikke lar seg gjøre å skille massene og andelen syredannende svartskifer synes å være lav, kan det gjøres en særskilt vurdering av massenes totale potensial for syredannelse. Da må forurensning og mulig bufferkapasitet i omkringliggende masser kartlegges, sammen med volumandel syredannende svartskifer, syredannende potensial og utlekkingspotensial for de samlede massene. Total mengde masser bør også vurderes ettersom store mengder masser har et større skadepotensial enn mindre mengder. Disponeringsløsning vil så bestemmes etter en vurdering av de samlede egenskapene til blandmassene.

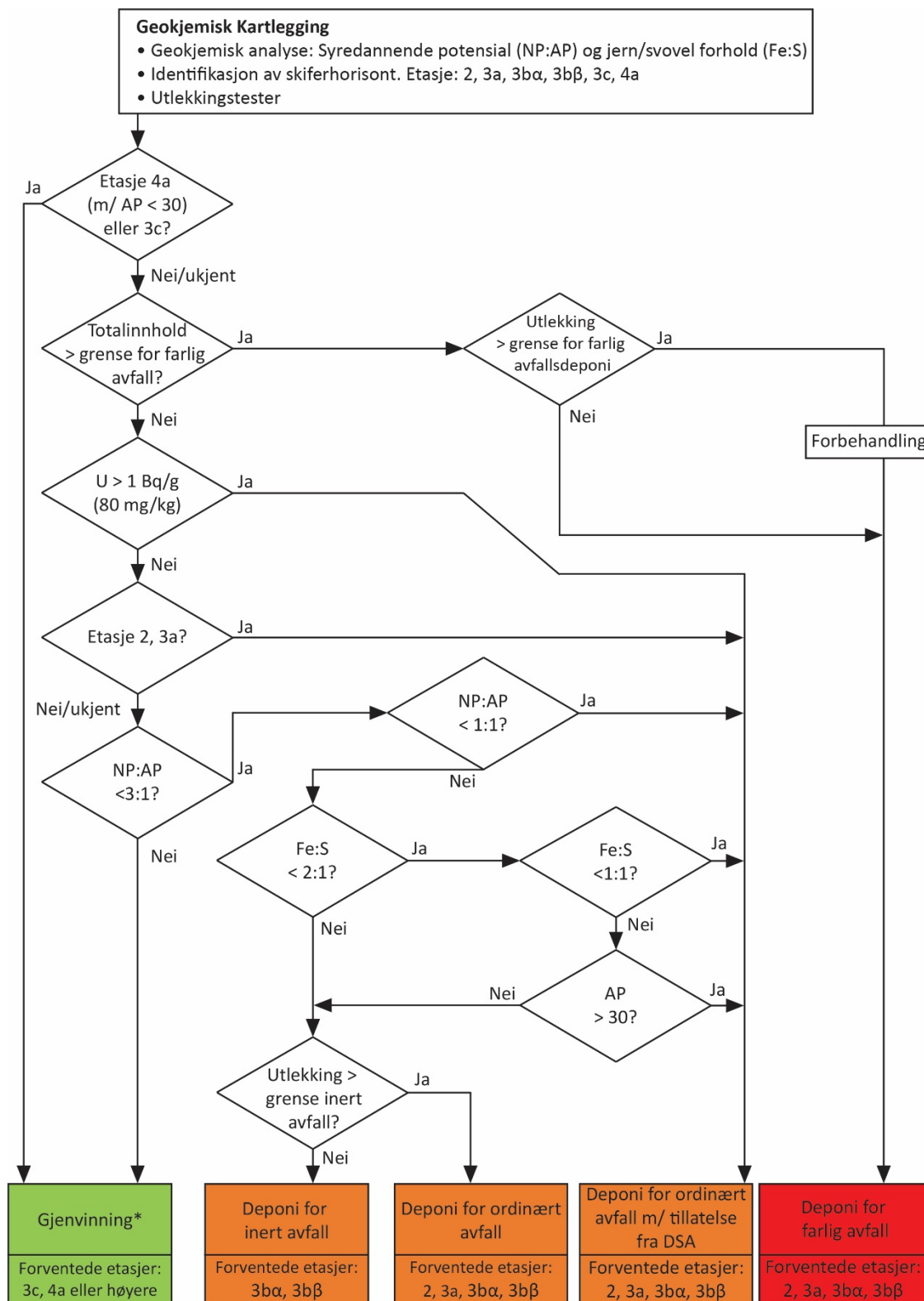
Merk at volumandel svartskifer i en steinhaug lett kan underestimeres ved visuell vurdering, ettersom svartskifer er en svak bergart og lettere knuses til mindre deler enn andre, omkringliggende bergarter. Dermed kan svartskifer bli skjult av større fraksjoner av annet materiale og det kan se ut som om andelen er mindre enn den faktisk er.

2.7.5 Valg av disponeringsløsning

Flytskjemaet i Figur 12 beskriver hvordan resultatene fra den geokjemiske kartleggingen kan brukes til avfallsskarakterisering av syredannende svartskifer og valg av disponeringsløsning. Ved bruk av flytskjemaet forutsettes det at den geokjemiske kartleggingen er gjort på forhånd. Skjemaet viser hvordan en skal tolke resultatene, ved å ta stilling til spørsmålene ett etter ett. Når en har konkludert med en disponeringsløsning, bør resultatet kryssjekkes med identifisert skiferetasje, ettersom disponeringsalternativ i stor

grad er forutbestemt av de ulike leirskiferetasjene. Dersom resulterende disponeringsalternativ ikke stemmer overens med identifisert skiferetasje, bør det gjøres en ekstra gjennomgang av prøvenes representativitet og tolkning av analysedata.

I tilfeller der etasjetilhørighet ikke kan bestemmes, kan en forenkling være å anta at dersom AP er over 30 kg CaO_3 eq/t (ca. 1 % svovelinnhold), anses skiferen å være potensielt syredannende. Det er da ikke nødvendig å identifisere eller vite hvilken etasje skiferen tilhører. Denne antagelsen gjelder kun for leirskifre som har gått gjennom alle steg i flytdiagrammet i Figur 12, og dermed har fått evaluert NP:AP og Fe:S forhold. Det er ikke en generell regel som kan brukes uten nærmere analyse.



Figur 12 Flytskjema for avfallskarakterisering av leirskifer i den kambrosiluriske lagrekken. Husk å sjekke at resultatet av vurderingen (deponialternativet) passer med etasjen til skiferen. *DSA anbefaler < 0,15 Bq/g radium-226 (≈ 12 mg/kg uran) for tilkjørte steinmasser som skal benyttes under eller rundt bygninger med oppholdsrom (Statens strålevern, 2015).

3 Graving i og mellomlagring av svartskifer

Den beste håndteringen av syredannende berggrunn er å la den ligge urørt. Dersom fordelene ved et inngrep likevel overskygger ulemper og risiko ved å grave ut syredannende masser, må utgravde masser håndteres forsvarlig, både på kort og lang sikt. Dette kapitlet omhandler graving i syredannende masser og den umiddelbare disponeringen som foregår rett etter oppgravingen. For informasjon om permanent deponering, se kapittel 4.

For anleggsarbeid i svartskifer vil det i mange tilfeller være nødvendig å søke tillatelse fra forurensningsmyndighet i henhold til forurensningsforskriften, samt utslippstillatelse for radionuklider fra DSA, se også kapittel 1.5 og 2.7.2.

Ved utgraving av potensielt syredannende masser er det viktig å ta ut og lagre ulike typer masser hver for seg, i den grad det er praktisk mulig. Ulike etasjer i den kambrosiluriske lagrekken (se kapittel 1.4) bør håndteres hver for seg og separat fra andre typer stein. Karakterisering av blandede masser er vanskelig, og konsekvensen av at massene har blitt blandet, kan være at alt må på deponi for syredannende masser, selv om det i utgangspunktet var en mindre andel som var syredannende og måtte deponeres.

3.1 Forarbeid før graving

Syredannende bergarter regnes som forurenset grunn når det graves i dem. Ved graving i forurenset grunn skal det utarbeides tiltaksplan i henhold til forurensningsforskriften kapittel 2. Tiltak kan ikke gjennomføres før tiltaksplanen er godkjent av forurensningsmyndigheten. Det er kommunen som er forurensningsmyndighet etter forurensningsforskriften kapittel 2. Miljødirektoratet kan imidlertid i det enkelte tilfelle bestemme at forurensningsforskriften kapittel 2 ikke gjelder for en lokalitet. I slike tilfeller behandles saken etter forurensningsloven. Miljødirektoratet kan selv behandle saken, eller delegere myndigheten til å behandle den til statsforvalteren. Dette kan typisk være aktuelt i store og/eller kompliserte gravetiltak som strekker seg over flere kommuner. Hvis tiltaket kan medføre utslipp av radioaktive stoffer, må DSA involveres samtidig som de andre miljømyndighetene.

I et gravetiltak med syredannende bergarter, er det viktig at disponeringen av de syredannende overskuddsmassene er avklart før anleggsarbeidene starter. Alle avtaler om disponeringen bør være inngått på forhånd. Det betyr også at alle tillatelser fra rette myndigheter bør foreligge før anleggsarbeidets oppstart.

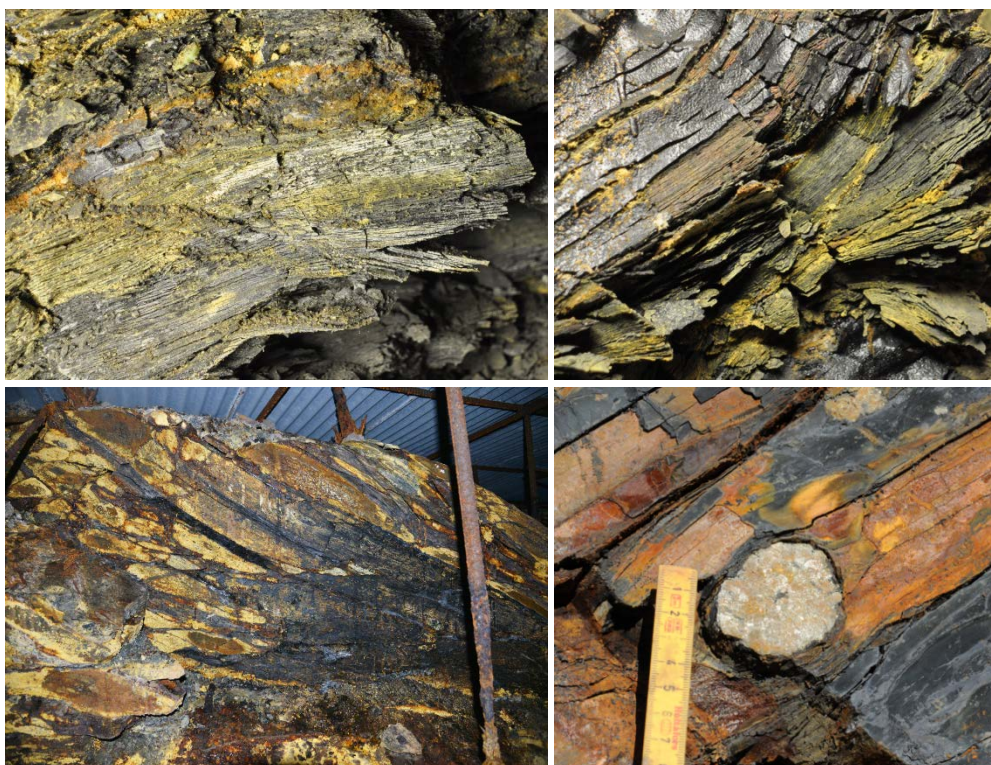
I store graveprosjekter vil det være omfattende saksbehandling. Saksbehandlingen vil kunne gå hurtigere dersom alle opplysningene myndigheten trenger, er inkludert i tiltaksplanen, og det ikke er nødvendig å spørre etter flere opplysninger underveis i behandlingsforløpet. Det lønner seg å være ferdig med alt kartleggingsarbeid, slik at forekomst og utbredelse av de syredannede bergartene er kjent. Hvordan prosjektet potensielt kommer til å påvirke miljø- og forurensningstilstanden i hele området som påvirkes av prosjektet, må redegjøres for gjennom en miljørisikovurdering. Dette

inkluderer påvirkning på det biologiske mangfold; dyre- og planteliv, eventuelle verneområder og nærliggende resipienter. Sårbarhet for avrenning for syredannende bergarter er avhengig av blant annet naturtype, sårbare arter, undergrunnens bufferevne, allerede eksisterende forurensning, og andre faktorer som belaster miljøet.

Selv om masser av syredannende svartskifer ikke defineres som radioaktivt avfall, kan en risikere avrenning fra utgraving eller mellomlagring av masser. Grenseverdier for utslipp er fastsatt i forskrift om radioaktiv forurensning og avfall (2010) vedlegg II. Utslippsgrenser fastsettes i en tillatelse etter forurensningsloven fra DSA.

3.2 Forvitrede masser, tidligere oppgravde masser og løsmasser

Med "kjemisk forvitrede masser" menes for eksempel oppfliset materiale med et øvre forvittringslag på overflaten, som vist i Figur 13. Bergmasser kan også være mekanisk forvitret, men fremstår da mer som oppknust materiale og uten forvittringslag med utfelling på overflaten. Det er viktig at kjemisk forvitrede masser håndteres separat fra uforvitrede masser, ettersom de umiddelbart kan gi sur avrenning med høye konsentrasjoner av sporstoffer og radionuklider ved kontakt med vann. Det er vanlig å regne den totale mengden masser som forvitret, dersom den totale mengden utgravde masser av syredannende svartskifer inneholder mer enn 20 – 30 % forvitret materiale.



Figur 13 Forvittringslag på svarte leirskifre. Alunskifer fra etasje 2 (øverst) med gult forvittringslag av jernsulfatforbindelser ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). Alunskifer fra etasje 3a (nederst t.v.) og Galgebergskifer fra etasje 3bβ (nederst t.h.) med rustbrunt forvittringslag av jernhydroksider.
Foto: Erik Endre

Hvis det skal tas ut store volum av berg med syredannende svartskifer, som har et tydelig forvitret sjikt, kan det være hensiktsmessig å fjerne det øverste sjiktet og håndtere det separat. Forvittringslaget vil vanligvis ikke trenge dypere ned enn 0,2 – 1 m i berggrunnen.

Karakterisering av forvitrede masser kan være mer utfordrende enn karakterisering av uforvitret svartskifer. Dette skyldes at forholdet mellom grunnstoffer kan ha endret seg, og trekantdiagrammene (kapittel 2.6.4) ikke lenger er relevante. Videre vil mineralinnholdet ha endret seg, og det kan være feil å anta at S foreligger som sulfider. For å estimere nøytraliserende potensial (kapittel 2.6.2) kan man *ikke* anta at Ca representerer karbonater, men man bør måle direkte på TIC. Det beste vil være å gjøre analyser av mineralinnholdet med for eksempel XRD for å se om syredannende og nøytraliserende mineraler er til stede. Dersom man har pågående sur avrenning, er det ikke nødvendig med analyser for å avgjøre hvorvidt massene er syredannende.

Det finnes en rekke massefyllinger som inneholder syredannende bergarter som skriver seg fra tiltak som fant sted før syredannende bergarter begynte å bli regnet som forurenset grunn. Avhengig av tiden som er gått siden disponeringen av syredannende

leirskifre og forholdene de har vært lagret under, kan det være sur avrenning med høyt innhold av sporstoffer og radionuklider fra slike fyllinger. Massene kan komme fra flere steder, og derfor kan det være vanskelig å bestemme etasjetilhørighet. Representativ prøvetaking kan også være utfordrende.

Der gamle, syredannende masser er lagret eller brukt til konstruksjon bør man være forsiktig med å gjøre endringer, ettersom endringer på overflaten, nivået av grunnvannsspeilet eller lignende, kan føre til endrede forhold for de syredannende massene og potensiell akselerasjon av forvitningsprosesser. I mange tilfeller er det likevel nødvendig med tiltak for å stanse pågående forurensning fra gamle masser, eller for å hindre at det blir et problem i fremtiden.

For naturlige løsmasser dannet av svartskifer (morene) kan man anta, ut fra en vurdering av tilstanden i resipienter i området, at syredannende prosesser ikke vil akselerere dersom massene lagres under lignende forhold som da de var uforstyrret. Komprimering av massene vil være nødvendig dersom de flyttes, for å redusere inntrengning av vann og oksygen. Effekten av komprimering vil sterkt avhenge av massenes kornstørrelse og finstoffinnhold. Det kan derfor være nødvendig å måle kjemisk innhold, kornfordeling, permeabilitet og komprimeringsegenskaper før man vurderer disponeringsalternativer.

3.3 Disponering av massene

Når arbeidet med å avklare om det foreligger syredannende svartskifer er slutført, bør det lages et overslag over den totale mengden masser som er syredannende i forhold til mengden som ikke er det. I denne sammenheng er det viktig å undersøke om noe av massene inneholder radionuklider og om den overskrider grensen for hva som er radioaktivt avfall eller medfører fare for utslipp av radioaktiv forurensning, se kapittel 1.5 og 2.7.2.

Selv om massene ikke er syredannende, kan det være begrensninger på gjenbruk. DSA anbefaler en grense på 0,15 Bq/g for innholdet av radium-226 (^{226}Ra , en urandatter, se Vedlegg D) for tilkjørte steinmasser som skal benyttes under eller rundt bygninger med oppholdsrom (Statens strålevern, 2015). Dette tilsvarer 12 mg/kg uran.

De delene av massene som ikke er syredannende, inneholder radioaktivitet eller medfører risiko for eksponering av radon over grenseverdiene, kan brukes internt eller eksternt i henhold til gjeldende lovverk (se f.eks. faktaark M-1243 om disponering av jord- og steinmasser som ikke er forurenset, for mer informasjon (Miljødirektoratet, 2018)). Intern bruk er avhengig av interne, tekniske kvalitetskrav. Husk også at visse leirskiferetasjer som ikke er syredannende, fortsatt kan utvikle svelletrykk og forårsake skader på bygninger (se kapittel 1.2).

3.4 Mellomlagring før transport til deponi

I bygge- og anleggsprosjekter kan det være hensiktsmessig eller nødvendig å mellomlagre masser i forbindelse med uttak og utkjøring, siden logistikken ikke alltid

tillater direkte levering til deponi. Det kan også oppstå situasjoner der det påtreffes masser som ikke var ventet, eller i større volum. Grundig kartlegging tidlig i prosjektet vil redusere sannsynligheten for driftsstans og uforutsette kostnader.

I en graveplan bør det legges stor vekt på å reservere tilstrekkelig areal til mellomlagring av utgravde masser i de ulike kategoriene. Generelt bør mellomlagringstiden minimeres. Dette er spesielt viktig for allerede forvitrede masser som umiddelbart kan produsere sur og metallholdig avrenning (se kapittel 3.2). Uforvitrede svartskifermasser bruker lenger tid på å bli syredannende. Uansett er det viktig at massene forvitrer så lite som mulig før endelig deponering, for å redusere risiko for senere syreproduksjon. Det er viktig at tiltakshaver/entreprenør oppretter klare og entydige rutiner for hvor lenge massene kan mellomlagres før levering til godkjent deponi.

Det er viktig at syredannende svartskifer ikke mellomlagres mer enn totalt 6 måneder fra massene blir gravd ut til de er endelig deponert (NGI, i arbeid). Dersom massene også planlegges mellomlagret på deponi, er det viktig at total mellomlagring hos tiltakshaver og deponi ikke overstiger 6 måneder. Dette bør avklares mellom tiltakshaver og deponi.. Dette gjelder for ferske, uforvitrede masser. Forvitret, syredannende svartskifer bør ikke mellomlagres, med mindre dette gjøres tørt og tildekket.

Det er viktig at alt overvann ledes utenom mellomlageret. Ved behov gjøres tiltak for å hindre eventuell nedbørspåvirket utvasking fra massene og spredning av radionuklider og metaller til sårbare resipienter. Dette kan eksempelvis være lagring under presenning eller i telt. Dette vurderes ved hver enkelt lokalitet. Det hindrer imidlertid ikke at forvitningsprosesser starter, og mellomlagringstiden bør fortsatt begrenses. I akutte tilfeller eller ved uhell hvor sur avrenning oppstår kan en midlertidig løsning være å tilføre kalkstein eller et grovt kalkgranulat som hindrer utlekking av surt, metallholdig vann. Slike masser bør kjøres bort så snart som mulig.

Det er viktig at mellomlager etableres slik at masser bestående av syredannende svartskifer lagres separat fra andre masser. Forvitrede masser bør tydelig skilles fra uforvitrede masser. Dersom det skulle påtreffes mulig syredannede svartskifer som ikke har blitt kartlagt på forhånd, er det viktig at disse skilles ved mellomlagring inntil karakterisering er gjennomført og deponialternativer kan avgjøres.

3.5 Mottak av masser på deponi

Deponier som har tillatelse til deponering av syredannende masser, har krav til hvordan massene skal håndteres ved mottak og deponering. Dette kan f. eks. være krav om at massene skal lagres separat og slik at en har kontroll på avrenningen inntil kontrollrutiner har blitt gjennomført, eller krav til at nødvendig dokumentasjon skal fremvises og kontrolleres. Analyser og karakterisering av stikkprøver bør følge prinsippene som er beskrevet i kapittel 2.

På deponier som har tillatelse til å ta imot svartskifer, er det krav til kontroll på avrenningen, og effekter av mellomlagring av syredannende masser ivaretas derfor av

det. Det er imidlertid viktig å ikke lagre massene så lenge at forvittringsprosessene får et akselerert forløp. Jo raskere massene kan komprimeres (kapittel 4.7), tilsettes pH-regulerende materialer (kapittel 4.3) og tildekket (kapittel 4.5 og 4.9), desto mindre forvitring vil oppstå. Av samme årsak som beskrevet for mellomlagring før deponering (kapittel 1.2 og 3.2), er det viktig med en raskere håndtering av forvitrede masser enn for uforvitrede masser.

3.6 Temperaturøkning og risiko for selvantenning

Dersom forvittringsreaksjonene får forløpe uhindret, kan det i noen tilfeller, under ugunstige forhold, være risiko for varmeutvikling. I ytterste konsekvens kan varmeutviklingen føre til selvantenning og brann i de deponerte massene. Tiltakene som er beskrevet i kapittel 4 vil sterkt redusere muligheten for slik selvantenning. Videre vil lav mektighet av massehauger av svartskifer ha lavere sannsynlighet for selvantenning enn store hauger, siden de ikke i like stor grad bygger opp varme.

4 Tiltak og sluttdeponering

Overskuddsmasser av oppgravde, syredannende masser er avfall som krever tilpassede deponiløsninger. Svartskifer kan leveres til deponi for farlig avfall, men også til deponier for ordinært avfall som har gjort tiltak for å deponere syredannende bergarter. Dette er tilrettelagte deponier som har særskilte prosedyrer for å ta imot disse avfallskategoriene. Masser som er klassifisert som radioaktivt avfall eller med potensial for å føre til utslipp av radioaktiv forurensning skal til avfallsdeponi med tillatelse fra DSA, se kapittel 1.5 og kapittel 2.7.2. For svartskifer skyldes dette ofte innholdet av uran,

I dette kapittelet beskrives først generelle tiltak for å hindre syredannende reaksjoner, som kan brukes både ved mellomlagring og deponering av svartskifer for å redusere risiko for sur avrenning. Deretter beskrives forhold knyttet til sluttdeponering av svartskifer, og til slutt forhold å ta i betraktning dersom det vurderes å søke om lokal disponering av svartskifermasser i stedet for å sende massene til godkjent deponi.

4.1 Tiltak for å begrense syredannende reaksjoner

Ulike tiltak kan gjøres for å begrense syredannende reaksjoner i svartskifer som er mellomlagret, lagret i åpen deponicelle før avslutning eller i sluttdeponering. Disse inkluderer:

- Hindre inntrengning av oksygen (se kapittel 4.5 og 4.9).
- Hindre inntrengning av vann (se kapittel 4.5 og 4.9).
- Tilsats av pH-regulerende materialer som kalk eller alkaliske avfallsmaterialer (se kapittel 4.3).
- Redusere overflaten til deponerte/lagrede masser (se kapittel 4.6).
- Komprimering av deponerte/lagrede masser (se kapittel 4.7).

Vann er en av faktorene som bidrar til syredannende reaksjoner (kapittel 1.2), men oksygen er den begrensende faktoren. Tilførsel av vann til deponerte masser av syredannende bergarter må reguleres slik at massene enten ligger tørt, eller slik at de er mettet med stillestående vann som hindrer oksygentilførsel til massene.

Dersom tiltak for å hindre syredannende reaksjoner ikke fungerer, må sigevann samles opp og renses, som beskrevet i kapittel 4.8.

4.2 Etablering av deponiceller for svartskifer

4.2.1 Fordelaktige forhold ved etablering av nye deponier

Dersom en velger å etablere et nytt deponi for syredannende bergarter, står en fritt til å velge løsninger og design som er tilpasset både lokale forhold og særkravene som stilles til deponering av syredannende bergarter. En rekke forhold vil kunne avgjøre om en lokalitet er egnet for etablering av et nytt deponi for syredannende bergarter. Her oppsummeres kort forhold som må tas i betraktning ved valg av lokalitet for etablering av et nytt deponi.

Geografi

Det kan være aktuelt å vurdere deponiets beliggenhet opp mot hvor hovedkildene til syredannende bergarter befinner seg. Dette av både miljømessige og samfunnsøkonomiske hensyn, for å redusere transport.

Svartskifer finnes særlig på Østlandet, hvor det også vil være mange store bygge- og samferdselsprosjekter som potensielt kan produsere store mengder deponipliktige masser av syredannende, svarte leirskifre i fremtiden.

Det vil også være en fordel om det ligger grustak, miljøparker eller andre kilder til masser som trengs i de områdene avfallet genereres, slik at ikke transport tilbake fra deponiet skjer med tomme lastebiler.

Geologiske forhold

Naturlig berggrunn eller naturlige avsatte løsmasser kan utgjøre den geologiske barrieren som kreves i bunn- og sidetetting (kapittel 4.4), forutsatt at kravene til hydraulisk konduktivitet og mektighet oppfylles (hydraulisk konduktivitet $K \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s, mektighet > 1 m for deponi for ordinært avfall).

Topografi og hydrologi

Det er en forutsetning at deponiet etableres på en lokalitet hvor det lar seg gjøre å kontrollere sigevannet fra deponiet. Videre er det viktig at overflatevann kan avskjæres samt at det er mulig å hindre inntrengning av grunnvann i deponiet.

Spesielle tilpasninger

NOAH Langøya, deponi for farlig avfall, er et eksempel på god utnyttelse av lokale forhold for å etablere en sikker deponiløsning. Deponiet ble etablert i et nedlagt kalksteinsbrudd, hvor berggrunnen består av kalkstein med svært lav permeabilitet. I tillegg tetter oppsprekninger i berggrunnen seg selv ved innsig av sjøvann når mineraler fra kalksteinen løser seg opp og felles ut igjen. Selv om svartskifer ikke er definert som farlig avfall, deponeres dette på Langøya og kalksteinen er en god barriere mot utlekking av surt vann.

Omgivelsenes motstandsdyktighet mot syre

Det kan være en ekstra sikkerhet å etablere deponier for syredannende bergarter i områder med naturlig bufferevne mot sur avrenning, slik som områder med kalkrik undergrunn. Dette styres i stor grad av berggrunnen i området. I svartskiferområder er det ofte kalkrike bergarter, hvor naturen kan ha en høyere bufferkapasitet mot sur avrenning.

4.2.2 Etablering av deponiceller for syredannende bergarter i eksisterende deponier

Dersom et eksisterende deponi ønsker å ta imot syredannende bergarter, forutsetter det at det opprettes separate celler for dette. Det anbefales ikke å deponere masser av syredannende bergarter over annet avfall. Særkrav til drift, avslutning og overvåking vil gjelde for disse cellene i forhold til avfall i resten av deponiet.

Krav til bunn- og sidetetting i cellene er angitt i kapittel 4.4. Det vil også kreves separat sigevannsoppsamling og –rensing som beskrevet i kapittel 4.8. I praksis vil dette ofte bety at en må lage separat oppsamling og rensing av sigevann fra deponiceller for syredannende bergarter, med mindre eksisterende renseanlegg oppfyller prinsippene beskrevet i kapittel 4.8, eller kan tilpasses i tilfredsstillende grad. Krav til overvåking av cellene er beskrevet i kapittel 4.10.

Samdeponering av annet avfall i celler for syredannende bergarter kan tillates dersom det samdeponerte avfallet bidrar til å bedre pH-forholdene i cellen og/eller til å redusere permeabiliteten i massene. Det forutsetter at avfallet har en dokumentert nøytraliserende effekt (kapittel 4.3). Det forutsettes videre at mengden samdeponert avfall tilpasses mengden syredannende bergarter, slik at syredannende potensial og nøytraliserende kapasitet som minimum utligner hverandre.

4.3 Tilsats av pH-regulerende materialer

En del potensielt giftige sporstoffer er særlig mobile ved lav pH. Hvis pH øker, reduseres løseligheten av en rekke metaller. Ved pH <3 vil syredannende reaksjoner og utslipp av sporstoffer foregå raskere, og det er derfor viktig å regulere pH-forholdene i lagrede/deponerte masser. Det optimale er at pH ligger rundt nøytral (pH 7), siden

mange metaller (som for eksempel As og Sb) er mobile ved enten svært høye (pH >11) eller lave pH-forhold (Stumm & Morgan, 1996).

Regulering av pH vil hovedsakelig være viktig i driftsfasen, når deponiet er åpent og massene er i kontakt med luft og kan bli tilført nedbør. Det kan også brukes som strakstiltak dersom syredannelse oppstår i masser som er lagret uten tilstrekkelige tiltak, for å hindre syredanning.

Fra et driftsmessig og samfunnsøkonomisk perspektiv, vil det være fordelaktig å benytte avfallsmaterialer til pH-regulerende tiltak. Det vil være kostnadsreduserende, samtidig som en ikke fyller opp deponier unødvendig. Tabell 6 oppsummerer aktuelle avfallsmaterialer som er lett tilgjengelig. Andre typer alkalisk avfall kan også være egnet til innblanding. Dette må vurderes særskilt i hvert enkelt tilfelle. Det forutsettes at mengden pH-regulerende midler tilpasses mengden syredannende bergarter, slik at syredannende potensial og nøytraliserende kapasitet som minimum utligner hverandre. I tillegg må reaksjonshastigheten vurderes slik at syredannelsesreaksjonen samsvarer med nøytraliseringsreaksjonen. Alkaliske materialer bør derfor ikke reagere for raskt.

Det kan kun benyttes avfallsfraksjoner som deponiet har tillatelse til å ta imot.

Tabell 6 Eksempler på alkaliske avfallsmaterialer som egner seg for pH-regulering i deponier for syredannende bergarter

Avfallsmateriale	Nøytraliserende bestanddel
Bunnaske fra avfallsforbrenning	Karbonater, (kalsiumhydroksider/-silikater)
Bioaske fra forbrenning av biologisk materiale	Kalsiumhydroksider/-silikater, karbonater
Betong	Kalsiumhydroksid, karbonater

Dersom det ikke er alkaliske avfallsmaterialer tilgjengelig, kan det benyttes kalkholdige bergarter som inneholder kalsitt eller dolomitt. Det er viktig at kalkholdige masser knuses før de benyttes til nøytralisering av sur avrenning, for å hindre at gips og jernhydroksider felles ut på overflaten og hindrer effektiv syrenøytralisering.

I byggeprosjekter kan kalkrike lag påtreffes i samme område som syredannende svartskifre. I slike tilfeller kan det være hensiktsmessig å benytte utgravde masser av slike kalkrike lag i behandlingen av de syredannende, svarte leirskifrene på deponiet. De nøytraliserende karbonatene utgjør kun en andel av disse bergartene og de har derfor ikke det samme nøytraliserende potensialet som ren kalkstein eller dolomitt. I tillegg er karbonatene i slike leirskifre mindre tilgjengelige. Masser av kalkrike lag vil derfor ha bedre virkning i et langtidsperspektiv enn til rask regulering av sure forhold.

4.4 Bunn- og sidetetting

I avfallsforskriften kapittel 9 stilles det krav til dobbel bunn- og sidetetting i deponier for å beskytte jord og vann i deponiets lokalmiljø mot forurensende avrenning. Kravene til bunn- og sidetetting avhenger av deponikategori (deponi for inert, ordinært, farlig avfall). For deponi for ordinært avfall gjelder kravet om dobbel bunn- og sidetetting. Dette omfatter en geologisk barriere med hydraulisk konduktivitet $K \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s og mektighet > 1 m og en kunstig tetningsmembran. For detaljert informasjon vises det til TA-1951/2003 Veileder til deponiforskriften.

En bentonittmembran brukes ofte som tetningslag i en bunn- og sidetetting. En slik membran vil kunne få svekket holdbarhet i kontakt med sur avrenning, grunnet ionebytting med H^+ i vannet og kationer i leirmineralene.

Det anbefales at det brukes en syntetisk tetningsmembran som er bestandig mot sur avrenning (lav pH), for eksempel en polyetylen- eller polypropylenmembran.

4.5 Tildekking i driftsfasen

Midlertidige former for tildekking vil ikke kunne stoppe oksygeninntrengning fullstendig. En midlertidig tildekking vil likevel kunne begrense inntrengningen av både oksygen og vann, noe som kan redusere forvitningsreaksjonene. En deponicelle bør utformes slik at cellen fylles opp relativt raskt. Dermed blir driftstiden per celle kort og en midlertidig tildekking kan legges så snart cellen er fylt. En deponicelle bør ikke stå åpen lengre enn 3 måneder før midlertidig tildekking legges.

Det anbefales at en midlertidig tildekking konstrueres av et tetningslag med 0,3 – 0,5 m av et komprimert materiale med $K < 10^{-8}$ m/s (for eksempel leire). Det kan være nødvendig med et beskyttelseslag over den midlertidige tildekkingen, dersom det er lang tid før permanent tildekning etableres.

4.6 Redusere overflate

Overflaten til deponerte masser vil danne hovedkontaktflaten med luft og vann. Det er om å gjøre å begrense kontakten med luft og vann for å hindre syredannende reaksjoner (kapittel 1). Begrensning av overflaten i en deponicelle er derfor et viktig tiltak for å hindre syredannende reaksjoner, spesielt i driftsfasen. Det anbefales derfor å etablere dype deponiceller fremfor deponiceller med stor utstrekning.

4.7 Komprimering

Komprimering av deponerte masser vil være fordelaktig av flere grunner. Volumreduksjon er positivt for å kunne øke den totale mengden deponerte masser i en celle, og medvirker samtidig til å redusere porer med luft og vann i massene. Forvitningsreaksjonene drives av oksygen og vann (kapittel 1). Minimering av transportveier og hulrom for luft og vann vil derfor bremse forvitningsreaksjonene. I tillegg vil kompri-

mering redusere risiko for setninger. Dette vil bidra til å holde toppdekket, som legges ved avslutning, stabilt over tid.

På den andre siden vil komprimering redusere kornstørrelsen til massene. Dette vil øke den totale overflaten til massene og dermed gjøre sulfidkorn mer tilgjengelig for oksidasjon. Det er likevel trolig at den totale effekten vil være positiv, ettersom komprimeringen vil redusere inntrengning av luft i massene. Det anbefales at komprimering av massene gjøres sammen med tilsats av pH-justerende materialer.

4.8 Sige vann

Selv om det gjøres tiltak basert på de prinsippene som beskrives her, må det regnes med at sige vann fra deponimasser av syredannende bergarter kan ha lav pH og inneholde forhøyede konsentrasjoner av løste metaller. Det er viktig å etablere gode løsninger for sige vannsoppsamling. Disse må ta høyde for at sige vannet fra deponerte masser av syredannende bergarter vil kunne være svært surt ($\text{pH} < 3$). Derfor bør det brukes syrebestandige materialer i drenerings- og avløpsrør, som plast eller syrefast stål.

4.8.1 Sige vannrensing

Det er krav om at sige vann fra deponier for ordinært avfall skal samles opp og behandles. Det er viktig å designe renseanlegget slik at det er optimalisert for rensing av surt sige vann. Surt sige vann kan være en belastning for kommunale renseanlegg, så det må vurderes om det er behov for forbehandling før eventuelt utslipp til kommunalt spillvannsnett. Påslipp til kommunalt nett fordrer relativt nøytral pH 6 – 9. I tillegg kreves det egen tillatelse fra DSA for påslipp av sige vann med radioaktive nuklider til kommunalt nett.

Tabell 7 oppsummerer vanlig brukte rensemetoder på deponier og deres egnethet for rensing av sige vann fra syredannende bergarter. Oversikten viser at det kun er kjemisk felling som vil være egnet til å behandle surt sige vann. For de andre metodene vil det være behov for at surt, metallholdig sige vann forbehandles før det det ledes til lokalt anlegg.

Tabell 7 Renseanleggs egnethet for behandling av sigevann fra syredannende bergarter.

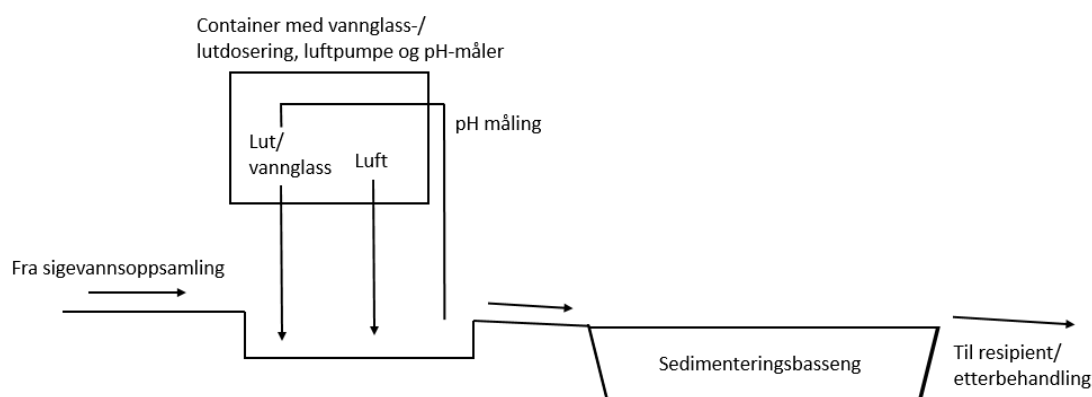
Type renseanlegg	Renseprinsipp	Egnethet
Luftet lagune	Dam med lufting og omrøring. Tilført oksygen oksiderer vannløselig Fe^{2+} til Fe^{3+} for å felle ut sporstoffer i jernhydroksider, og hjelper mikroorganismer med nedbrytning. Tilført CO_2 forskyver karbonatlikevekten og feller ut metaller som karbonater.	Uegnet ved lav pH i sigevannet da dette vil kunne hindre/reducere utfelling av metaller. Metoden vil virke best sammen med forbehandling/justering av pH.
Våtmarksfilter	Sigevann ledes inn i naturlig eller tillaget våtmarksområde. Biologiske prosesser bryter ned, feller ut, binder opp eller omdanner forurensning.	Uegnet ved lav pH og høye konsentrasjoner av sporstoffer vil kunne ha negativ naturpåvirkning i våtmarksområdet.
SBR (Sequential Batch Reactor). Aktivt slam anlegg	Dam med trinnvis lufting og utfelling. Lufting holder aktivt slam og partikler suspendert. Utfelling følger av lufting. Aktivt slam av heterotrofe organismer bryter ned organiske forbindelser. Utfelling fjernes og slam resirkuleres.	Uegnet/delvis egnet. Lav pH vil kunne hindre/reducere utfelling av metaller og i tillegg skape problematiske forhold for mikroorganismene i det aktive slammet.
Kjemisk felling	Tilsats av spesifikke kjemikalier som forandrer pH, setter i gang fellings- eller flokkuleringsreaksjoner, oksiderer eller adsorberer forurensning i sigevannet.	Egnet. Særlig ved tilsats av pH-regulerende kjemikalier og flokkulenter i kombinasjon med en luftet lagune.
Membranfiltrering/omvendt osmose	Sigevann presses igjennom en semipermeabel membran som filtrerer ut partikler, salter, metaller og organiske forbindelser. Filtrert materiale fjernes og etterbehandles/deponeres.	Delvis egnet. Vil kunne fjerne mange problematiske komponenter fra sigevannet, men vil ikke regulere pH. Tilslamming av filteret vil også kunne bli et problem. Best egnet som etterbehandling før utslipp til resipient.

Renseprosessen for surt, metallholdig vann fra svartskifer bør omfatte pH-justering og fjerning av jern, aluminium og sporstoffer (inkludert uran) fra sigevannet. Dette kan gjøres ved å tilsette et basisk tilsatsmiddel under omrøring/pumping av luft inn i sigevannet. Metallhydroksider som ikke er løselige under nøytrale pH-forhold, vil da kunne felles ut i et sedimenteringsbasseng. Lufting bidrar til å oksidere toverdig jern, som er vannløselig, til treverdig jern som ikke er vannløselig. Utfelling av jernhydroksider bidrar for øvrig også til sedimenteringen av andre metallhydroksider. Dersom jern ikke fjernes i renseanlegget, vil renseeffekten for andre metaller sterkt reduseres og en vil få oksidering og utfelling av et rustfritt slam nedstrøms renseanlegget.

Ved bruk av kalksteinsfilter (eller annet basisk materiale) til pH-justering, er det en fare for at metallhydroksider og gips (CaSO_4) feller ut på overflaten til kalksteinen. Dette reduserer utløsning av nøytraliserende kalsiumkarbonat (CaCO_3), som igjen vil redusere effekten av kalksteinen betydelig. Sigevannet fra syredannende svartskifer vil kunne inneholde relativt store mengder sulfat og derfor vil muligheten for gipsutfelling være stor. I tillegg har uran økt løselighet i vann med høyt innhold av karbonater.

En pH-styrt dosering av lut eller vannglass (natriumsilikat) er et godt alternativ til bruk av kalkstein, som vil gi en kontrollert og effektiv pH-justering. Vannglass er å foretrekke av disse to, siden lut må oppbevares ved temperatur på ca. 20 °C, mens vannglass bør oppbevares og doseres ved temperatur over ca. 10 °C. I tillegg opptrer vannglass som en flokkulent og øker utfellingen ved å binde sammen metallhydroksider og andre salter til større aggregater.

En løsning med lufting, pH-justering og sedimentering i en lagune som vist i Figur 14, anbefales.



Figur 14 Prinsippskisse for sigevannrensing med lufting og pH-justering fulgt av sedimentering i lagune.

Sedimenteringsbassenget må dimensjoneres slik at vannet får tilstrekkelig oppholdstid til at partikler (fnokker)sedimenteres. Sedimentert slam må fjernes regelmessig fra bassenget, og derfor er det fordelaktig med et hardt dekke i bunnen. Slammet må prøvetas, karakteriseres i henhold til avfallsforskriften kapittel 9 og deponeres på godkjent mottak.

Dersom det planlegges å slippe sigevannet videre direkte ut til resipient, vil det sannsynligvis være nødvendig med etterbehandling av vannet. Dette vil avhenge av renhetsgraden til sigevannet etter forbehandling og grenseverdier for utslipp til resipient. En slik etterbehandling vil for eksempel kunne være våtmarksfilter.

Ved planlegging for mottak av syredannende svartskifer på deponi, er det viktig at vurderinger og planlegging knyttet til sigevannshåndtering og behandling inngår tidlig i arbeidet. Sentrale momenter i vurderingene er:

- Forventet sigevannssammensetning og mengder fra deponerte svartskifermasser.
- Egnethet av lokalt renseanlegg på deponiet og behov for forbehandling.
- Påslippskrav fra kommunalt renseanlegg og behov for forbehandling.

- Lokale resipientforhold ved direkte utslipp til resipient og eventuelle krav til utslipp.

Selv om det gjennomføres tiltak for å redusere syredannelse og mengde sigevann, må man i planleggingen av sigevannsbehandling fra deponert svartskifer ta høyde for ekstremsituasjoner med mye nedbør og redusert effekt av tiltak (tetting, pH justering).

4.8.2 Overvåking av sigevann

For beskrivelse av overvåking av sigevann fra deponier/deponiceller for syredannende bergarter, henvises det til *Veileder om overvåking av sigevann fra avfallsdeponier* (TA-2077/2005). Analyseparametere i deponier/deponiceller som kun mottar syredannende bergarter er vist i Tabell 8. Metaller markert med ** inngår ikke i TA-2077/2005. Disse bør imidlertid vurderes å ha med, ettersom de vil kunne lekke ut under nøytrale forhold. Utslippstillatelse for radionuklider gis av DSA.

Lave pH-verdier (pH<4) og høye konsentrasjoner av sulfat, jern, aluminium og sporstoffer i sigevann fra deponiceller, kan indikere at det foregår aktiv forvitring i de deponerte massene. Sur avrenning med høyt metallinnhold kan også forekomme dersom en har deponert store mengder forvitrede masser i en deponicelle.

Tabell 8 Overvåkingsparametere for sigevann fra deponier/deponiceller med kun syredannende bergarter (utdrag fra TA-2077/2005 med tillegg).

Parameter	Enhet	Bestemmelsesgrense*
Surhetsgrad	pH	-
Suspendert stoff (SS)	mg/l	-
Ledningsevne	mS/m	-
Løst organisk karbon (DOC)**	mg/l	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)**	mg/l	-
Aluminium (Al)**	mg/l	-
Antimon (Sb)**	µg/l	-
Arsen (As)	µg/l	2
Bly (Pb)	µg/l	1
Jern (Fe)	mg/l	1
Kadmium (Cd)	µg/l	0,1
Kobber (Cu)	µg/l	1,5
Kobolt (Co)**	µg/l	-
Krom (Cr)	µg/l	1
Kvikksølv (Hg)	µg/l	0,01
Mangan (Mn)	mg/l	0,1
Molybden (Mo)**	µg/l	-
Nikkel (Ni)	µg/l	5
Sink (Zn)	µg/l	3
Uran (U)**	µg/l	-
Thorium (Th)**	µg/l	-

**Bestemmelsesgrense = kvantifiseringsgrensen ved analyse, definert som 10 ganger standardavvik til en blindprøve. Tabellen viser maksimum deteksjonsgrense for metode som benyttes for analyse av visse grunnstoffer.*

***Parametere som ikke er inkludert i TA-2077/2005*

4.9 Toppdekke ved ulike deponiløsninger

Valg av toppdekke gjøres ut fra en stedsspesifikk vurdering av hvert deponi/deponicelle. Design av toppdekke må foreligge allerede ved etablering av deponi/deponicelle, ettersom deponeringsløsning henger tett sammen med valg av toppdekke.

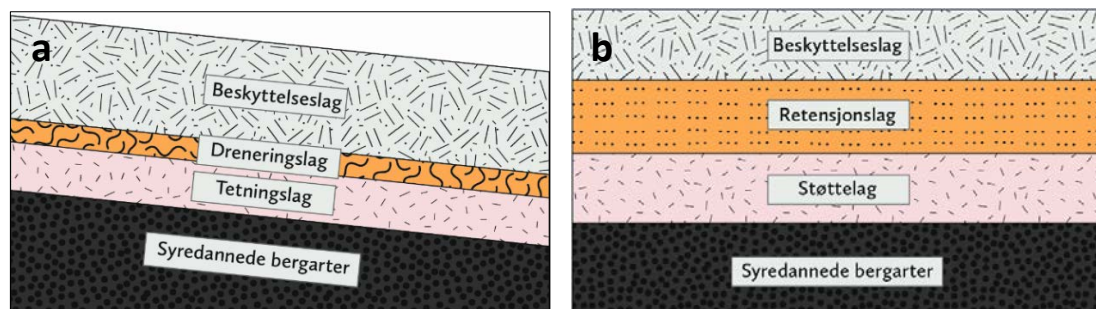
Toppdekke som beskrives her er utprøvde metoder som har dokumentert effekt på reduksjon av inntrengning av oksygen og vann. Alternative løsninger kan benyttes så lenge hindring av oksygeninntrengning og kontroll på innsig av vann kan dokumenteres for en slik løsning. Løsningene gjelder for avslutning av deponi. For deponiceller som vil bli liggende under et endelig toppdekke, kan kravene være mindre strenge.

4.9.1 Løsninger for tørr deponering

I en tørr løsning forutsettes det at massene skjermes fra inntrengning av vann. Det vil aldri være realistisk å fullstendig hindre inntrengning av vann, men hvis en følger kravene til bunn- og sidetetting (kapittel 4.4) og tildekking (kapittel 4.9) vil den begrensede tilførselen av vann til massene ha svært liten effekt på de syredannende

reaksjonene. Følgene av tilførsel av nedbør i driftsfasen vil kunne motvirkes ved tilsats av pH-regulerende materialer (kapittel 4.3).

En oversikt over ulike design for toppdekke på deponier med syredannende svartskifer med tørr løsning er vist i Figur 15.



Figur 15 Prinsippskisser for ulike alternativer for avsluttende toppdekke av syredannende svartskifer. a) Tradisjonelt toppdekke, Compacted Clay Liner (CCL); b) Multilagstildekking (CCBE)

Tradisjonelt toppdekke

Formålet med et tradisjonelt toppdekke er å hindre inntrengning av vann i de deponerte massene. Et slikt toppdekke vil typisk bestå av et tredelt lag som vist i Figur 15a. Her legges det et tetningslag med lav hydraulisk konduktivitet ($K \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s) over de deponerte massene. Over tetningslaget etableres det først et dreneringslag av grovere masser og deretter et beskyttelseslag med stor mektighet. Det er også vanlig å legge et vekstlag med vegetasjon på toppen. Med denne løsningen vil overflatevann som trenger gjennom beskyttelseslaget på toppen, penetrere tetningslaget i svært liten grad og heller dreneres bort gjennom dreneringslaget.

Løsningens evne til å hindre inntrengning av oksygen vil avhenge av vannmetningen i tetningslaget og om tetningslaget holdes intakt over tid. Leire vil ved tørking eller frost kunne sprekke opp og slippe til oksygen. Derfor bør beskyttelseslaget konstrueres slik at det hindrer fordamping av vann og med en slik mektighet at tele ikke når ned til tetningslaget (frostsikkert/telesikkert). Dersom denne tildekkingen konstrueres riktig, vil tetningslaget holde en høy vannmetningsgrad (>85 %) og hindre inntrengning av oksygen.

Multilagstoppdekke (Cover with Capillary Barrier Effect, CCBE)

Oppbygningen av en multilagstoppdekke er vist i Figur 15b. Den har vært brukt for tildekking av store deponier med syredannende gruveavfall. Hvilke masser som benyttes til tildekkingslagene og mektigheten av de respektive lagene, vurderes spesifikt for en deponilokalitet. Det midtre retensjonslaget konstrueres vanligvis av 0,5 – 1 m av et finkornet materiale, for eksempel silt, som holdes mettet med vann. Vannmetningen og

mektigheten av dette laget hindrer inntrengning av oksygen ned i de deponerte massene under, slik at retensjonslaget virker som et sperresjikt.

Det øvre beskyttelseslaget konstrueres ofte av rundt 0,3 – 0,5 m av et grovere materiale enn retensjonslaget, for eksempel sand. Dette laget skal beskytte og hindre fordamping av vann fra retensjonslaget, samtidig som det skal tillate transport av noe overflatevann ned til retensjonslaget.

Små mengder vann vil dreneres nedover fra retensjonslaget dersom støttelaget under består av rundt 0,5 m av et mer grovkornet materiale enn retensjonslaget. Dette materialet kan for eksempel komponeres av alkaliske avfallsmaterialer (kapittel 4.3), forutsatt at massene har riktig kornstørrelse. Vann som dreneres nedover fra retensjonslaget vil erstattes av overflatevann, slik at retensjonslaget holder seg vannmettet. Vann som dreneres gjennom de deponerte massene samles opp som sigevann.

Denne løsningen forutsetter et relativt fuktig klima, og virkningen av retensjonslaget kan være utfordrende ved kommende klimaendringer. Tørke i 2 – 3 måneder vil kunne ødelegge retensjonslaget.

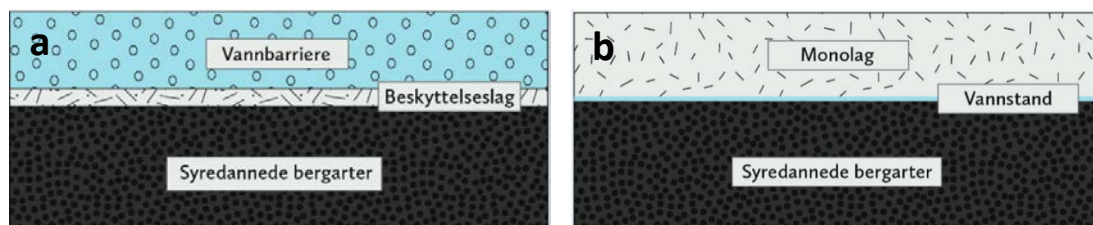
Denne løsningen er utviklet og dokumentert av Aubertin m. fl. (1995, 1997 og 1999). Virkningen av denne løsningen er blant annet dokumentert ved et deponi for syredannende gruveavfall i Canada (Bussière et al, 2006).

4.9.2 Løsninger for vannmettede masser med vannbarriere eller monolag som toppdekke

Syredannende bergarter deponert under vann i et basseng eller en dam av stillestående vann, utgjør teoretisk sett en god løsning for å hindre syredannende reaksjoner. For at en slik løsning skal virke, må vannet være stillestående, dvs. ingen gjennomstrømning av vann i massene. Vannsig gjennom en vannmettet løsning vil nemlig tilføre oksygen som kan bidra til syredannende reaksjoner og spredning av forurensning. Masser mettet med stillestående vann vil ha lav oksygentilførsel, noe som sterkt vil redusere de syredannende reaksjonene. En annen fordel med en slik løsning er at en vil kunne ha en lengre driftstid på en slik deponicelle. Så lenge massene ligger under en vannbarriere vil en kunne deponere masser kontinuerlig, samtidig som massene er sikkert skjermet mot oksygeninntrengning i en grad som tilsvarer et endelig toppdekke i effektivitet. I oppstart- og driftsfasen vil det være oksygen løst i vannet og det vil tilføres noe oksygen via overflatevann. Det vil derfor være fordelaktig å regulere pH-forholdene i vannet med tilsats av alkaliske materiale (kapittel 4.3).

En deponicelle med en vannmettet løsning krever en tett bunn- og sidetetting, som tilfredsstiller kravene omtalt i kapittel 4.4. Toppdekket kan f. eks. bestå av en vannsøyle på >1 m over de deponerte massene (Figur 16a). Løsningen er dokumentert av blant annet Awoh m. fl. (2013). Dersom det deponerte materialet er finkornet, kan det være en risiko for oppvirvling av partikler. I et slikt tilfelle kan det legges et beskyttelseslag av mer grovkornede, rene masser over de deponerte massene. Et overvannssystem

konstrueres i toppen av cellen for å kontrollere at vannstanden ikke blir for høy. Her bør også vannkvaliteten overvåkes.



Figur 16 Prinsippskisser for ulike alternativer for avsluttende toppdekke av syredannende svartskifer med vannmettede løsninger. a) Vannbarriere; b) Monolag med høy vannstand

En åpen, vannmettet løsning vil kun være relevant dersom en oppretter et nytt deponi. I praksis er imidlertid slike løsninger svært utfordrende, særlig i et langtidsperspektiv. Det vil for eksempel være vanskelig å sikre den geotekniske stabiliteten til store basseng eller dammer og hindre utlekking på lang sikt.

Alternativt kan toppdekket i en vannmettet deponicelle bestå av et monolag dersom en ikke ønsker et åpent vannspeil i deponicellen (Figur 16b). Løsningen er dokumentert av blant annet Orava m. fl. (1997) og Ouangrawa m. fl. (2010). Det deponeres masser til like over vannspeilet i deponicellen. Kapillærkrefter i massene vil sørge for at vann suges opp og metter en del av massene over vannspeilet. Over de deponerte massene konstrueres så et monolag av et grovt materiale, som for eksempel sand, som har i oppgave å beskytte og forhindre fordamping av vann fra de deponerte massene. Mektigheten av dette laget vurderes i forhold til tildekkingsmaterialet og lokale, klimatiske forhold. Et overvannssystem konstrueres for å holde vannstanden stabil. En slik løsning krever god kontroll på vannmetningen i deponerte masser.

4.10 Overvåking og etterdrift

Teoretisk sett vil sigevann fra deponerte masser av syredannende bergarter ha et lavt innhold av forurensende stoffer, så lenge oksygeninntrengning unngås. Ved å hindre forvitring vil massenes forurensende potensial ikke aktiveres. I praksis vil dette være avhengig av virkningen av tildekking og oksygenbarriere i et langtidsperspektiv. Det må derfor stilles krav til overvåking i ettertid av både toppdekkets stabilitet, samt sigevannsmengde og -kvalitet. Det må stilles krav til etterbruk av arealet for å sikre at toppdekket forblir intakt. Det må for eksempel ikke plantes større vekster med rotsystemer som kan trenge ned i og forstyrre beskyttelseslag (Figur 15a) eller retensjonslag (Figur 15b).

Byggteknisk forskrift (TEK17) stiller krav til tiltak for å holde radonkonsentrasjonen nede i rom for varig opphold, noe som vil være relevant ved bygging på deponert svartskifer.

4.11 Lokal disponering av svartskifer

Lokal disponering av syredannende svartskifer kan være gunstig med tanke på både økonomi, deponikapasitet og klimapåvirkning (reduisert transport). Det krever imidlertid en grundig vurdering i henhold til kriteriene som skal hindre syredannelse. Det er viktig å hindre tilgang til oksygen og innsig av vann (se kapitlene 4.5, 4.6, 4.7 og 4.9) som kan medføre syredannelse og spredning av sivevannet. En søknad om lokal disponering må sendes til Miljødirektoratet og DSA. Det er viktig at det gjennom en vurdering av miljørisiko synliggjøres at dette er en miljømessig akseptabel løsning.

Man bør vurdere egenskapene til skifermassene som omsøkes lokalt disponert. Skifer-masser med ulik opprinnelse kan ha ulikt innhold av syredannende (sulfider) og nøytraliserende (karbonater) komponenter, og dermed ulik reaktivitet. Innhold av pyrrhotitt (magnetkis) kan også gi økt reaktivitet, men vil ikke nødvendigvis komme fram av analyser. Ved deponering av allerede forvitrede masser, vil det være vanskeligere å unngå framtidig syredannelse og slike masser bør fraktes til deponi.

Det er også relevant hvor store mengder svartskifer som skal disponeres lokalt, da store mengder masser utgjør en større risiko enn små mengder masser.

Miljømyndighetene legger prinsippene i avfallsforskriften kapittel 9 til grunn ved vurdering av disse sakene. De har fokus på å unngå lokal miljøpåvirkning, og det forventes at dette er gjort rede for i søknaden. Dette gjelder for eksempel naturlige og konstruerte geologiske barrierer (bunn/sidetetting, toppdekke) og kontroll på sivevann. Stedets egnethet (kapittel 4.2.1) er spesielt viktig dersom man vurderer lokal disponering av syredannende svartskifer. Gunstige geologiske forhold kan gjøre det enklere å unngå omfattende etterdrift og rensing av sivevann. Videre bør man vurdere en eventuell resipientes sårbarhet, deriblant bufferkapasitet og sårbare arter. Overvåking må påregnes i lengre tid etter disponering. Det er også viktig å sørge for at ingen bygger eller graver i området hvor massene er disponert, inkludert tiltak som kan endre grunnvannsstanden slik at det kan påvirke masselageret.

5 Oppsummering og anbefalinger

For å identifisere og karakterisere leirskifre som kan ha syredannende potensial, foreslås en trinnvis prosedyre som består av tre hovedelementer:

1. Sammenstilling av geologisk informasjon.
2. Geologisk kartlegging i felt.
3. Kjemisk karakterisering av massene.

Denne metoden for å identifisere bergartene gir et godt vurderingsgrunnlag og gjør identifiseringen sikrere. Ved å følge denne metoden, er det mulig å vurdere massene man påtreffer i et bygg- eller anleggsprosjekt og ta hensyn til håndteringskrav og deponeringsmuligheter. Mellomlagring bør begrenses til et minimum der det foreligger masser med syredannende potensial.

Ved deponering av syredannende svartskifer, er det kritisk at oksygentilførsel til massene hindres, slik at forvittringsreaksjonene stoppes og forurensningspotensialet minimeres. For å oppnå sikker deponering anbefales følgende:

- Massene legges i tette celler hvor det benyttes en tildekking som hindrer inntrengning av oksygen. Ulike utforminger er presentert i denne rapporten.
- Driftsfasen, med mellomlagring og åpne celler, er den mest kritiske perioden i deponeringsprosessen, siden massene da har kontakt med luft og vann. Det anbefales at denne fasen gjøres så kort som mulig for å begrense forvittringsreaksjonene.
- Samdeponering med alkaliske avfallsmaterialer og komprimering av massene anbefales for å regulere pH-forholdene i deponicellene og begrense infiltrasjon.
- Håndtering og behandling av sigevann må tilpasses lokale forhold, avhengig av om vannet ledes til lokalt renseanlegg, kommunalt renseanlegg eller direkte til resipient. En behandling av sigevann fra svartskifer vil normalt omfatte justering av pH og utfelling av løste metaller med etterfølgende sedimentering.

6 Referanser/Leseliste

- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2010). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.): CRC press.
- Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M., Bussière, B., Richard, J.F. og Tremblay, L. (1995). Evaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. Ecole Polytechnique de Montréal, NEDEM/MEND Projet 2.22.2a.
- Aubertin, M., Aachib, M., Monzon, M., Joanes, A.M., Bussière, B. og Chapuis, R. (1997). Etude de laboratoire sur l'efficacité des barrières de recouvrement construites à partir de résidus miniers. Canadian Mine Environment Neutral Drainage, MEND Report 2.22.2b.
- Aubertin, M., Bussière, B., Monzon, M., Joanes, A.M., Gagnon, D., Barbera, J.M., Aachib, M., Bédard, C., Chapuis, R.P. og Bernier, L. (1999). Etude sur les barrières sèches construites à partir des résidus miniers. Phase II, Essais en place. Rapport de Recherche, Projet CDT P1899. NEDEM/MEND 2.22.2c.
- Awoh, A.S., Mbonimpa, M. og Bussière, B. (2013). Field study of the chemical and physical stability of highly sulphide-rich tailings stored under a shallow water cover at the Don Rouyn site. *Mine Water and the Environment* 32(1): 42-55.
- Bjørlykke, K. (1974). Depositional History and Geochemical Composition of Lower Palaeozoic Epicontinental Sediments from the Oslo Region. *NGU Bulletin* 24.
- Braunschweig, J., Bosch, J., & Meckenstock, R. U. (2013). Iron oxide nanoparticles in geomicrobiology: from biogeochemistry to bioremediation. *New Biotechnology*, 30(6), 793-802. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.03.008>
- Bussière, B., Maqsoud, A., Aubertin, M., Martschuk, J. og McMullen, J. (2006). Performance of the oxygen limiting cover at the LTA site, Malartic, Quebec. *CIM Bulletin*, 1 (6), 1-11.
- Chandra, A. P., & Gerson, A. R. (2010). The mechanisms of pyrite oxidation and leaching: A fundamental perspective. *Surface Science Reports*, 65(9), 293-315. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfrep.2010.08.003>
- Evangelou, V.P. og Zhang, Y.L. (1995). A review, pyrite-oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.*, 25, 141-199.
- Forskrift om radioaktiv forurensning og avfall (2010). Forskrift om forurensningslovens anvendelse på radioaktiv forurensning og radioaktivt avfall. Klima- og miljødepartementet, <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-11-01-1394>.
- Forurensningsforskriften (2019). Forskrift om begrensning av forurensning. Klima- og miljødepartementet, <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-931?q=forurensningsforskriften>.
- Hall, G.E.M., Vaive, J.E., Beer, R. og Hoashi, M. (1996a). Selective leaches revisited, with emphasis on the amorphous Fe oxyhydroxide phase extraction. *Journal of Geochemical Exploration*, 56, 59-78.
- Hall, G.E.M., Vaive, J.E. og MacLaurin, I. (1996b). Analytical aspects of the application of sodium pyrophosphate reagent in the specific extraction of the labile organic component of humus soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 56, 23-36.
- IAEA 2003. Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. IAEA-TECDOC-1363
- IAEA. (2014). The environmental behaviour of radium: Revised edition (476).Vienna: Retrieved from <https://www-pub.iaea.org/books/iaea-books/series/80/Technical-Reports-Series>
- Johnson, C.A., Brandenberger, S. og Baccini, P. (1995). Acid Neutralizing Capacity of Municipal Waste Incinerator Bottom Ash. *Environmental Science and Technology* 29, 142-147.
- Lawrence, R. W., og Wang, Y. (1996). Determination of Neutralization Potential for Acid Rock Drainage Prediction (MEND Project 1.16.3). Hentet fra: <http://mend-nedem.org/mend-report/determination-of-neutralization-potential-for-acid-rockdrainage-prediction/>.

- McKelvey (1955). Uranium in the Upper Cambrian Black Shale of Sweden. Trace elements investigations report 495. United States Department of the Interior Geological survey.
- Miljødirektoratet (2018). M-1243 Mellomlagring og sluttdisponering av jord- og steinmasser som ikke er forurenset. Faktaark fra Miljødirektoratet.
- MEND (2009). Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. MEND Report 1.20.1. December 2009.
- NGI (1957). Bidrag til belysning av visse bygningstekniske problemer ved Oslo-området alunskifere. NGI-publikasjon nr. 22. Oslo.
- NGI (2015a). Karakterisering og identifisering av syredannende bergarter. Veileder for miljødirektoratet, M-310. Norges geotekniske institutt, Rapport 20120842-01-R.
- NGI (2015b). Deponering av syredannende bergarter. Grunnlag for veileder M-385. Norges Geotekniske Institutt. Rapport 20140693-01-R.
- NGI (i arbeid). Under Oslo WP1 – Temporary storage of black shales – a collection of case studies and overall conclusions. Norges Geotekniske Institutt, rapport 20200436-03-R.
- NGU (Norges geologiske undersøkelse): Berggrunnsgeologiske kart i målestokk 1:250000 og 1:50000.
- NGU (2009). A compilation of previously published geochemical data on the lower Cambro-Silurian sedimentary sequence, including the alum shales in the Oslo region. Report no. 2009.053. ISSN 0800-3416.
- NGU (2018). Norske Bergarter. <https://www.ngu.no/emne/norske-bergarter>, sist endret 25. mars 2020.
- Orava, A.D., Tremblay, G.A., Tibble, A., og Nicholson, R. (1997). Prevention of acid rock drainage through the application of in-pit disposal and elevated water table concepts. In Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Vancouver, 3: 973-983.
- Ouangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J.W., Bussiere, B. og Zagury, G.J. (2010). Preventing acid mine drainage with an elevated water table: Long-term column experiments and parameter analysis. Water, Air and Soil Pollution 213, 437.
- Owen, A.W., Bruton, D. L., Bockelie, F. J. & Bockelie, T. G. (1990). The Ordovician successions of the Oslo Region, Norway. NGU Special Publication 4.
- Pabst, T., Sørmo, E., & Endre, E. (2017). Geochemical characterisation of Norwegian Cambro-Ordovician black mudrocks for building and construction use. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76(4), 1577-1592. doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0941-z>.
- Ramberg, I.B., Bryhni, I., Nøttvedt, A. og Rangnes, K. (2013). Landet blir til - Norges geologi. Norsk Geologisk Forening, Trondheim.
- Schovsbo (2002). Uranium enrichment shorewards in black shales: A case study from the Scandinavian Alum Shale. GFF, vol. 124, pp. 107-116
- SFT (2003a). Veileder om miljørisikovurdering av bunntetting og oppsamling av sigevann ved deponier. Statens forurensningstilsyn. TA-1995/2003.
- SFT (2003b). Veileder til deponiforskriften. Statens forurensningstilsyn. TA-1951/2003.
- SFT (2005). Veileder om overvåking av sigevann fra avfallsdeponier. Statens forurensningstilsyn. TA-2077/2005.
- SFT (2009). Helsebaserte tilstandsklasser for forurenset grunn. Statens forurensningstilsyn (SFT). TA-2553/2009.
- Sigmond, E. M., Bryhni, I. og Jorde, K. (2013). Norsk geologisk ordbok. Fagbokforlaget.
- Singer, P. C., & Stumm, W. (1970). Acidic Mine Drainage: The Rate-Determining Step. *Science*, 167(3921), 1121-1123. doi:10.2307/1728684

- Statens strålevern (2013). Måleprosedyre for radon i boliger. 22.11.2013.
- Statens strålevern (2014). Radon i vann. Hentet 08.04.2015 fra: <http://www.nrpa.no/fakta/90036/radon-i-vann>.
- Statens strålevern (2011). Alunskiferkart for vurdering av hensynssoner for radon i henhold til plan- og bygningsloven.
- Statens strålevern (2012). Alunskifer – Kilde til radioaktivt avfall og radioaktiv forurensning. StrålevernInfo 7-12.
- Statens strålevern (2015). Radon fra tilkjørte masser under bygg – anbefalt grenseverdi. StrålevernInfo 6-15.
- Strålevernforskriften (2016). Forskrift om strålevern og bruk av stråling. Helse- og omsorgsdepartementet, <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2016-12-16-1659?q=str%C3%A5levernforskrifte>.
- Stumm & Morgan (1996). Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters 3rd ed. John Wiley and Sons Inc.
- SVV (2007). Miljøpåvirkning fra gjenbruksmaterialer i veg – Sementbaserte materialer. Gjenbruksprosjektet 2002-2005. Statens vegvesen, Teknologirapport nr. 2433.
- SVV (2017). Utlekkingsforsøk med svartskifer fra Rv. 4, Hadeland. Statens vegvesens rapporter (665). Hentet fra www.vegvesen.no.
- TEK17. Byggeteknisk forskrift (TEK17) med veiledning. <https://dibk.no/regelverk/byggeteknisk-forskrift-tek17/>.
- Vriens, B., Skierszkan, E. K., St-Arnault, M., Salzsauler, K., Aranda, C., Mayer, K. U., & Beckie, R. D. (2019). Mobilization of metal (oid) oxyanions through circumneutral mine waste-rock drainage. ACS omega, 4(6), 10205-10215.
- Worsley D., Aarhus N., Bassett M. G., Howe, A., Mørk A. og Olaussen S. (1983). The Silurian succession of the Oslo Region. NGU Bulletin 72.

Vedlegg A

ORDFORKLARINGER

Ord	Definisjon / forklaring
Alunskifer	Svartskifer i alunskiferformasjonen
AP	Syredannelsespotensialet, potensialet (stein)masser har til å danne syre. For skifer i den kambrosiluriske lagrekken er dette hovedsakelig innhold av sulfider, estimert av S.
Etasje	Oslofeltets kambro-silurlagrekke inneholder 10 etasjer med sedimentære bergarter som er definert av geologer, der etasje 1 stammer fra tidlig kambrium og etasje 10 fra sen silur.
Forkastning	Bruddflate hvor det har foregått synlig forskyvning av bergartene på den ene siden av bruddflaten i forhold til den andre
Formasjon	En naturlig tilhørende sekvens av skiferbergarter
Forvitring	Naturlig prosess som fører til nedbryting av fast fjell. Det skilles mellom kjemisk forvitring og mekanisk forvitring (f. eks. frostsprengning)
Forvittringspotensial	Bergartens potensial til forvitring i forhold til dagens tilstand
Fossiler	Bevarte rester eller spor av organismer fra fjern fortid. Finnes i størst grad i sedimentære bergarter
Geokjemisk karakterisering	Undersøke kjemisk innhold i bergarter / jord og identifisere kjemiske prosesser som kan oppstå ved forvitring
Grunnfjell	Bergarter fra jordens urtid (eldre enn 570 millioner år) som danner kjernen på landjorda
Grunnvann	Vann som fyller porer og sprekker i løsmasser og berggrunn
Gruppe	Innen stratigrafi, gruppe består av en eller flere formasjoner Røyken, Hedmark, Oslo
Kaledon	Epoke for ca. 400 millioner år siden da fjellkjeden ble dannet
Kalsitt	Mineral bestående av kalsiumkarbonat, CaCO_3 . Er et av de vanligste mineralene i jordskorpen. Kalsitt kan være bergartsdannende og kalles da kalkstein eller marmor.
Kambrium	Geologisk periode fra 542 til 596 millioner år siden
Lagdeling	Struktur i sedimentære bergarter som kjennetegnes av primære forandringer i vertikal retning, eller i en hvilket som helst bergart som består av flere lag.
Ledd	Underinndeling av formasjon, en formasjon kan bestå av flere ledd
Leirmineral	Sjiktisilikat som dannes ved lave trykk og temperaturer
Leirskifer	Sedimentær bergart dannet ved avsetning (sedimentering) av leire, på bunnen av vann (innsjøer eller hav)
Magnetkis	Se Pyrrhotitt .
Metamorfose	Proessen der bergarter omdannes til nye bergarter: Varme, trykk Metamorfosegrad påvirker reaktivitet
Mineral	Homogene, naturlig forekommende, faste, uorganiske stoffer med en definert krystallstruktur av atomer av bestemte grunnstoffer. Mineraler dannes gjennom geologiske og biologiske prosesser. Berggrunnen og løsmassene som dekker berggrunnen (de organiske komponentene unntatt) er bygd opp av mineraler.
NP	Nøytraliseringspotensialet; potensialet (stein)masser har til å nøytralisere syre. For skifer i den kambrosiluriske lagrekken er dette hovedsakelig innhold av karbonater, estimert av TIC.
Ordovicium	Geologisk tidsavsnitt eller periode som ligger 488–444 millioner år tilbake.
Oslofeltet	Innsunket del av jordskorpen (paleorift) som strekker seg fra Langesund i sør til Brumunddal i nord, og har bergarter som skiller det fra områdene omkring.
Pyrrhotitt	FeS . Vanlig sulfidmineral. Kalles også magnetkis..
Pyritt	FeS_2 , vanlig sulfidmineral, ofte terningformet. Kalles også svovelkis
Radon	Naturlig forekommende edelgass som siver gjennom berggrunnen og løsmasser og utgjør en helserisiko for mange nordmenn.

Reaktiv bergart	Grunn som danner syre eller andre stoffer som kan medføre forurensning i kontakt med vann og / eller luft
Redoksreaksjon	Kjemisk reaksjon hvor ett stoff blir redusert (tilført elektroner) og et annet oksidert (mister elektroner).
Sediment	Løsmasse som består av partikler eller bruddstykker av bergarter eller mineraler som er avsatt i lag etter å ha vært transportert av vann, luft eller is, eller utfelt av løsninger.
Sedimentær bergart	Består av konsoliderte sedimenter. Den kan være en lagdelt bergart (som skifer), homogen (som sandstein og kalkstein) eller inneholde boller av bergarter, innstøpt i en sement som konglomerater
Silur	Geologisk periode 444 – 472 millioner år siden
Skifer	Bergart som lett lar seg spalte i tynne flak eller skiver pga. konsentrasjon av mineraler som glimmer og kloritt i bestemte lag.
Skyvedekke	Deler av jordskorpen som brytes opp og skyves opp over andre deler av jordskorpen. Sekvenser av bergarter kan da bli repetert og yngre bergarter kan bli skjøvet over eldre bergarter. Dette skjer ved store geologiske hendelser som dannelse av fjellkjede.
Stratigrafi	Læren innenfor geologi som omfatter lagdeling, alder, sammensetning og fordeling av lagdelte, geologiske avleiringer (sedimentære bergarter).
Sulfid	Mineraler der svovel utgjør det negativt ladde grunnstoffet (anionet). Eksempler er jernsulfidet pyritt (FeS_2)
Svartskifer	Leirskifer som er mørk i fargen pga. høyt innhold av organisk materiale
Svellepotensial	Potensial til å utvide seg på grunn av kjemiske / fysiske reaksjoner
Svovelkis	Se Pyritt
TIC	Total inorganic carbon – totalt uorganisk karbon.
TOC	Total organic carbon – totalt organisk karbon

Vedlegg B

EKSEMPEL PÅ TOLKNING AV ANALYSERTE DATA FRA SVARTSKIFER

Innhold

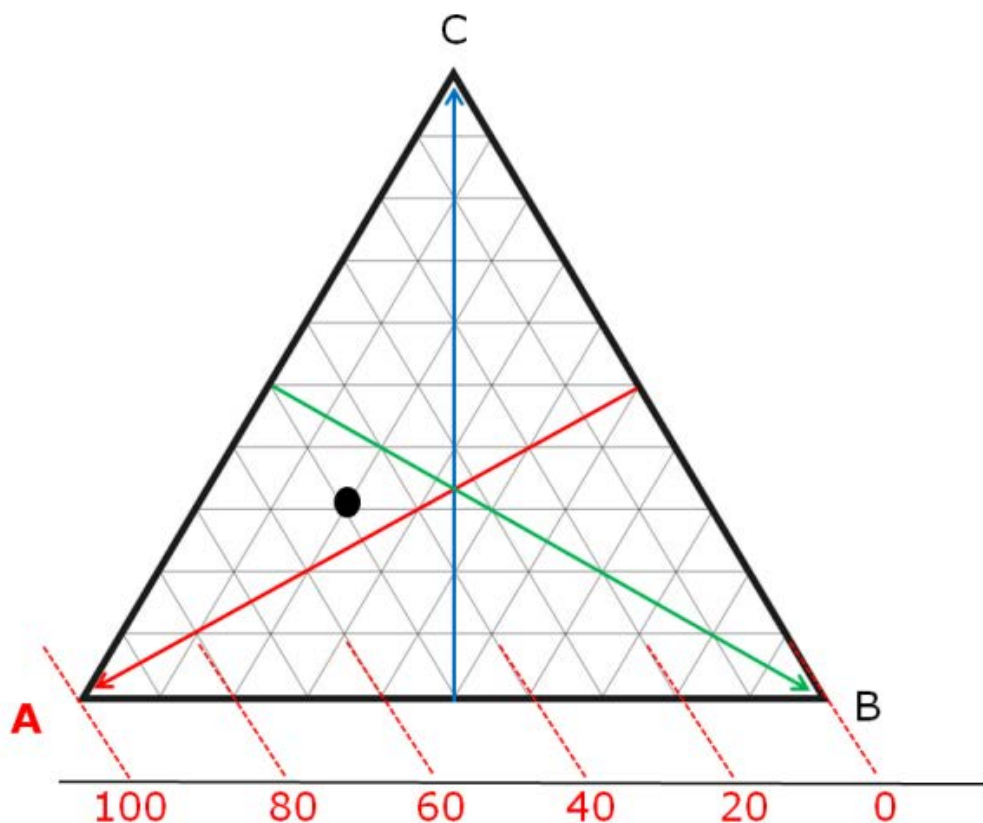
B1	Generelt om bruk av trekantdiagrammer for å fastslå etasje	2
B2	Eksempel på tolking av svartskiferdata	4
	B2.1 Enkel vurdering	7
	B2.2 Avansert vurdering: trekantdiagram	10
B3	Forslag til trekantdiagrammer for identifisering av etasje	18

B1 Generelt om bruk av trekantdiagrammer for å fastslå etasje

Bruk av trekantdiagrammer er en relativ avansert tolkningsmetode som krever et godt datagrunnlag for å gi pålitelige resultater. Datagrunnlaget brukt i figurene her kan finnes i Vedlegg C og i Excel-filen som tilhører dette dokumentet (<https://www.ngi.no/Prosjekter/Haandtering-av-syredannende-bergarter>). Tolkninger er bare mulig å gjennomføre med prøver av skiferbergarter i den kambrosiluriske lagrekken. Dette er fordi metoden er basert på referansemateriale av skifer med kjent opprinnelse.

Bruk av trekantdiagrammer gjør det mulig å foreta en sammenligning av tre grunnstoffer i ett og samme diagram. Summen av grunnstoffene skal alltid være 100 %. Trekantdiagrammene brukes for å finne mønstre i hvordan referanseprøvene fra de ulike etasjene fordeler seg, og dette kan brukes til å identifisere hvilken etasje en ukjent prøve tilhører. Hvilke sporstoffer som settes sammen i de ulike trekantdiagrammene kan bestemmes på grunnlag av kjennskap til skiferens dannelsesmiljø og øvrige geologiske og kjemiske egenskaper. Dette kan derfor sies å representere skiferens fingeravtrykk. Se eksemplene lenger ned.

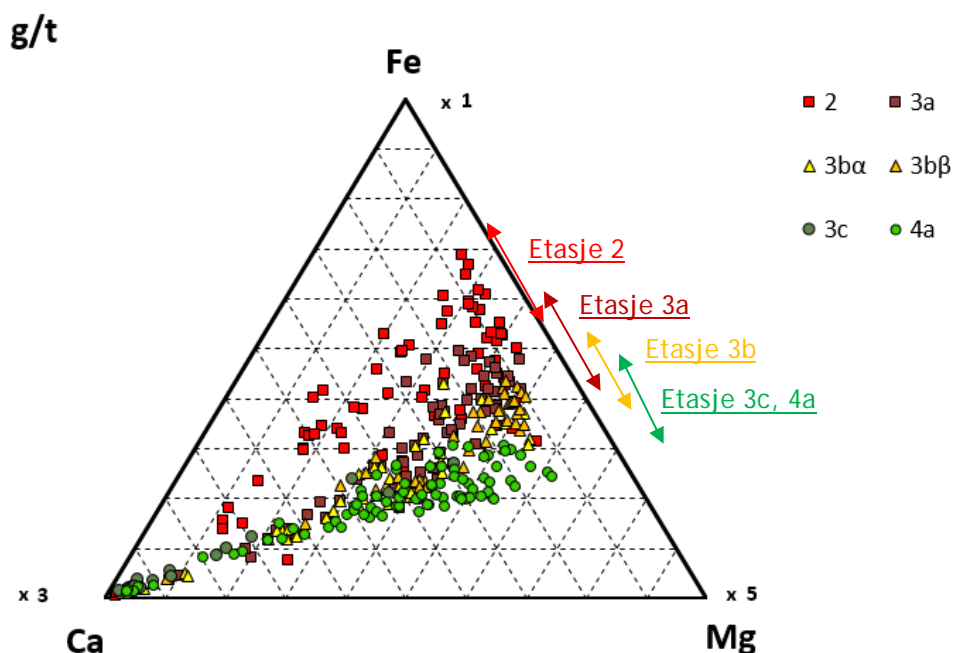
Trekantdiagrammer konstrueres på følgende måte (Figur 1): Konsentrasjoner fra tre grunnstoffer eller andre parametere summeres og summen settes til 100 %. Dersom grunnstoffene skal vektes forskjellig, må dette legges til. Etter dette tillegget settes summen til 100 %. Deretter regner en ut mengde i prosentvekt for hvert av de tre parameterne og plotter alt i et trekantdiagram.



Figur 1 Prinsipp for et trekantdiagram (ternary plot) med parameterne A, B og C. Verdien i hjørnet er 100 % og på den motsatte trekantside er den 0 %. Punktet representerer en prøve som har verdiene A= 50%, B= 20% og C=30%, til sammen 100 %.

Et eksempel med referansedataene er vist i Figur 2. Her er konsentrasjonen av Ca og Mg vektet henholdsvis 3 og 5 ganger før konsentrasjonen summeres. Grunnen til at én eller to parametere vektes i et trekantdiagram er for å få en passe spredning i datapunktene for å skille ulike grupper fra hverandre.

Det vil være noe overlapp mellom trendene til de ulike leirskiferformasjoner (Figur 2). En pålitelig identifisering krever derfor at en kombinasjon av resultater fra flere trekantdiagrammer med ulike sammensetninger av grunnstoffer eller andre parametere. I eksemplene nedenfor er det brukt åtte ulike diagrammer til å identifisere prøvene. Merk at det er noe skjønn involvert i etasjebestemmelse med denne metoden.



Figur 2 Eksempel på et trekantdiagram der grunnstoffene Fe, Mg og Ca sammenlignes for å se på sammenfallende egenskaper i prøvene. Diagrammet viser forenklete utviklingstrender for prøver fra Alunskiferformasjonen (2 og 3a), Tøyenformasjonen (3b), Hukformasjonen (3c) og Elnesformasjonen (4a). Fargene på referanseprøvene indikerer sannsynligheten for at etasjen er syredannende i AP:NP-diagrammet (rødt=syredannende, gul=usikker, grønn=ikke syredannende).

B2 Eksempel på tolking av svartskiferdata

Dette eksemplet beskriver en trinnvis tolkning av analyseresultater for prøver av potensielt syredannende svartskifer. Eksempelsamlingen inkluderer 6 prøver av svarte leirskifre som er hentet fra ulike lokaliteter i Oslofeltet. Oversikt over prøvene er vist i tabell B-1.

I den enkle vurderingen tolkes analyseresultatene ved hjelp av AP:NP diagram, Fe:S diagram og tilhørende flytskjema.

I den avanserte vurderingen vises en mer avansert tolkning av analyseresultatene for svarte leirskifre, hvor det brukes trekantdiagrammer i tillegg til AP:NP, Fe:S og tilhørende flytskjema. Konsentrasjonene av grunnstoffer i de ulike skiferprøvene er også vist og inkluderes for å styrke enkelte tolkninger.

Flytskjemaet i figur B-3 brukes altså i begge tolkningseksempler, men med ulik tilgang på informasjon.

Merk at resultater fra tolkning alltid burde kryssjekkes mot berggrunnsgeologiske kart, som også er første trinn i vurderingen av muligheten for å finne syredannende egenskaper i bergartene. Feltobservasjoner av noen med geologisk kompetanse bør også inngå i vurderingen. Prøvene må være representative og av uforvitret berg. Her beskrives bare tolkningen av kjemiske analysedata.

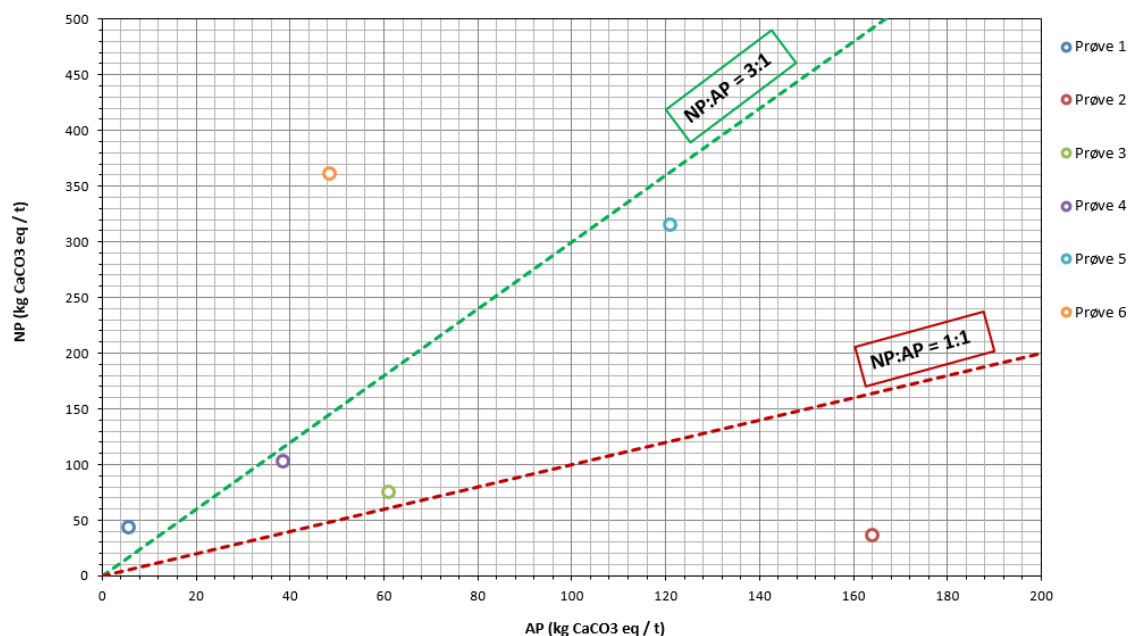
Tabell B-1 Oversikt over prøvene i eksempelsamlingen.

Prøve 1	Svart leirskifer Hamar
Prøve 2	Svart leirskifer Stange
Prøve 3	Svart leirskifer Ringerike
Prøve 4	Svart leirskifer Oslo
Prøve 5	Svart leirskifer Gran
Prøve 6	Svart leirskifer Gran

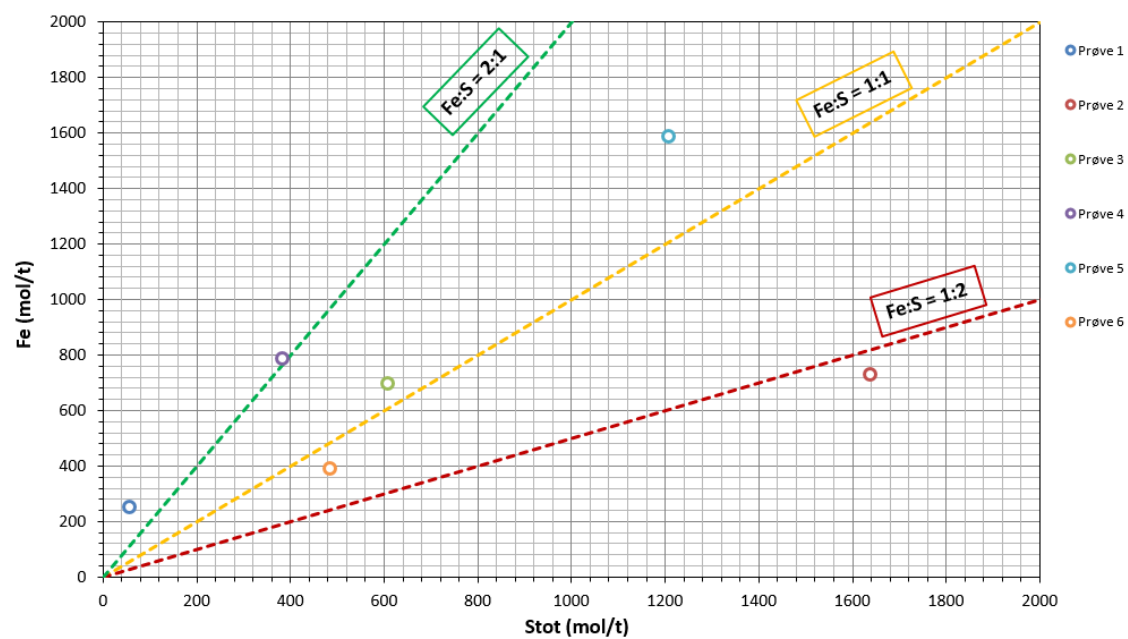
Tabell B-2 Analysedata for sporstoffer (mg/kg), hovedelementer (%), samt TOC og TIC (%) for alle prøvene.

Parameter	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 4	Prøve 5	Prøve 6
As (mg/kg)	-	73,4	39,5	13,1	42,6	56,2
Ba (mg/kg)	518	791	1 140	689	555	886
Cd (mg/kg)	-	3,80	1,96	0,11	1,17	3,80
Co (mg/kg)	6,82	27,8	14	22,2	31	9,24
Cr (mg/kg)	74,5	69,5	89	463	11,2	63
Cu (mg/kg)	14,2	103	68,7	53,8	84,1	67,2
Mo (mg/kg)	1,0	144,0	75,8	1,9	6,5	120,0
Nb (mg/kg)	7,07	11,5	16,4	11,8	53,5	9,12
Ni (mg/kg)	25,5	203	134	198	46,3	95,3
Pb (mg/kg)	12,3	36,1	27,9	13,4	38,4	32,7
S (mg/kg)	1780	52 500	19 500	12 300	38 700	15 500
Sc (mg/kg)	5,39	11,9	14,1	16,9	13,5	9,35
Sn (mg/kg)	1,26	2,69	3,19	2,46	1,92	2,63
Sr (mg/kg)	99,1	150	130	79,4	725	720
Th (mg/kg)	5,83	11,3	19,4	9,34	5,61	14,3
U (mg/kg)	1,33	86,2	2,95	3,85	3,44	244
V (mg/kg)	26	619	1020	124	254	981
Y (mg/kg)	17,1	33,4	41,0	30,4	30,2	133,0
Zn (mg/kg)	34,7	146	90,2	103	163	197
Zr (mg/kg)	196	120	124	198	203	79,2
Al ₂ O ₃ (%)	4,98	10,7	15,4	15,5	15,8	8,64
CaO (%)	2,03	2,66	2,35	2,42	8,95	19,1
Fe ₂ O ₃ (%)	2,03	5,82	5,58	6,28	12,7	3,12
K ₂ O (%)	1,73	3,66	5,1	4,28	2,59	2,88
MgO (%)	0,688	0,94	1,87	3,58	4,91	1,55
MnO (%)	0,0489	0,0259	0,0446	0,0355	0,211	0,132
Na ₂ O (%)	1,18	0,523	0,539	0,769	2,66	0,354
P ₂ O ₅ (%)	0,1	0,174	0,171	0,0873	0,507	1,37
SiO ₂ (%)	57,7	38,6	53,7	53,9	37,9	39,2
TiO ₂ (%)	0,322	0,727	0,787	0,673	2,73	0,469
TOC (%)	0,219	9,41	3,33	0,612	0,285	1,61
TIC (%)	0,53	0,444	0,906	1,24	3,79	4,34

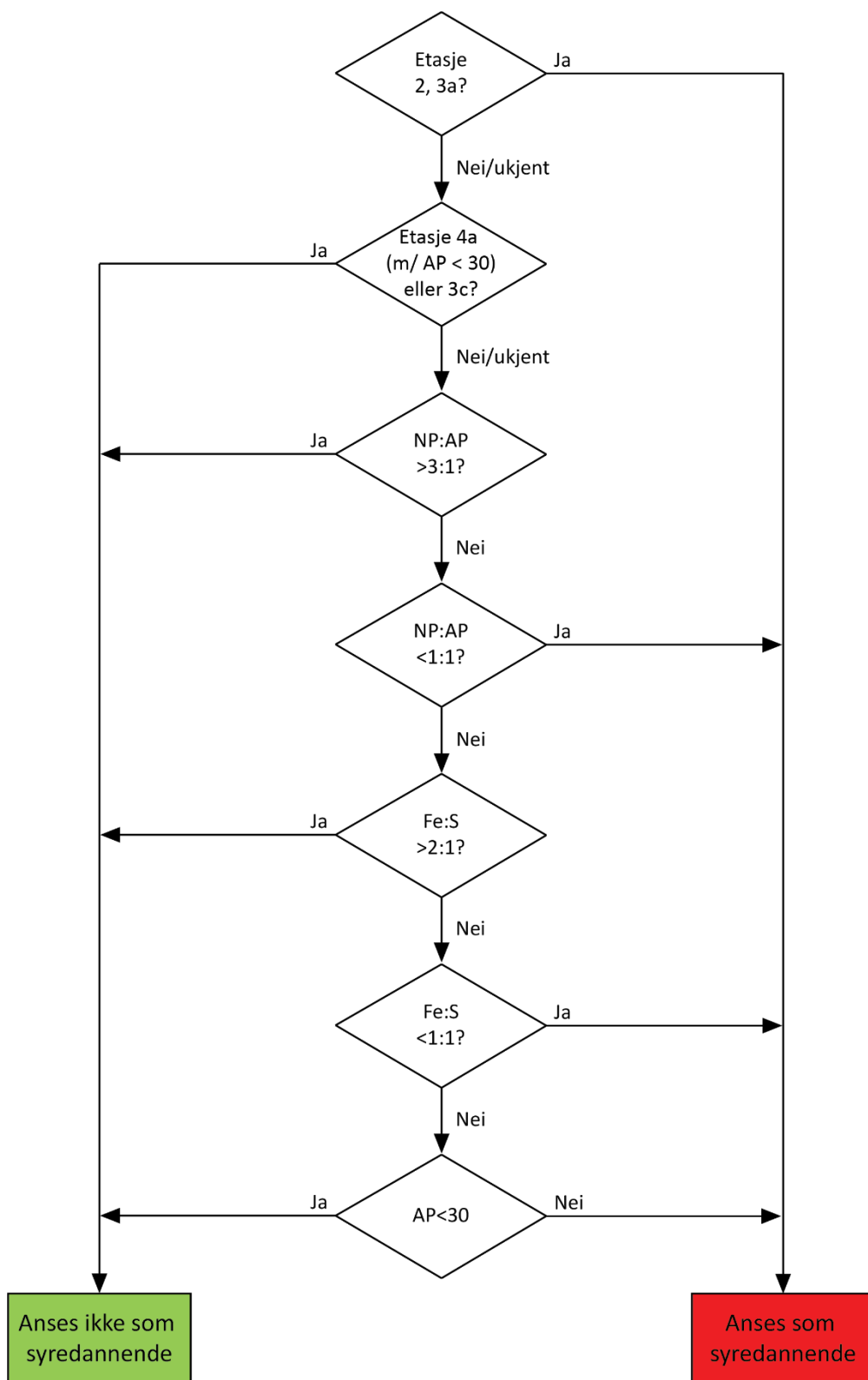
B2.1 Enkel vurdering



Figur B-1 AP:NP diagram for prøvene i tabell B-2.



Figur B-2 Fe:S diagram for prøvene i tabell B-2.



Figur 3 Flytdiagram som sammenfatter beslutningsprosessen for karakteriseringen av leirskifre i den kambrosiluriske lagrekken.

Prøvenes gang i flytskjemaet:

Prøve 1

- a) Etasje 2 eller 3a? → Ukjent.
- b) Etasje 4a (m/ AP < 30) eller 3c? → Ukjent
- c) NP:AP >3:1? → Ja
- d) Anses ikke som syredannende.

Prøve 2

- a) Etasje 2 eller 3a? → Ukjent.
- b) Etasje 4a (m/ AP < 30) eller 3c? → Ukjent
- c) NP:AP >3:1? → Nei
- d) NP:AP <1:1? → Ja
- e) Anses som syredannende.

Prøve 3

- a) Etasje 2 eller 3a? → Ukjent
- b) Etasje 4a (m/ AP < 30) eller 3c? → Ukjent
- c) NP:AP >3:1? → Nei
- d) NP:AP <1:1? → Nei
- e) Fe:S >2:1? → Nei
- f) Fe:S <1:1? → Nei
- g) AP<30? → Nei
- h) Anses som syredannende.

Prøve 4

- a) Etasje 2 eller 3a? → Ukjent
- b) Etasje 4a (m/ AP < 30) eller 3c? → Ukjent
- c) NP:AP >3:1? → Nei
- d) NP:AP <1:1? → Nei
- e) Fe:S >2:1? → Ja
- f) Anses ikke som syredannende.

Prøve 5

- a) Etasje 2 eller 3a? → Ukjent
- b) Etasje 4a (m/ AP < 30) eller 3c? → Ukjent
- c) NP:AP >3:1? → Nei
- d) NP:AP <1:1? → Nei
- e) Fe:S >2:1? → Nei
- f) Fe:S <1:1? → Nei
- g) AP<30? → Nei
- h) Anses som syredannende

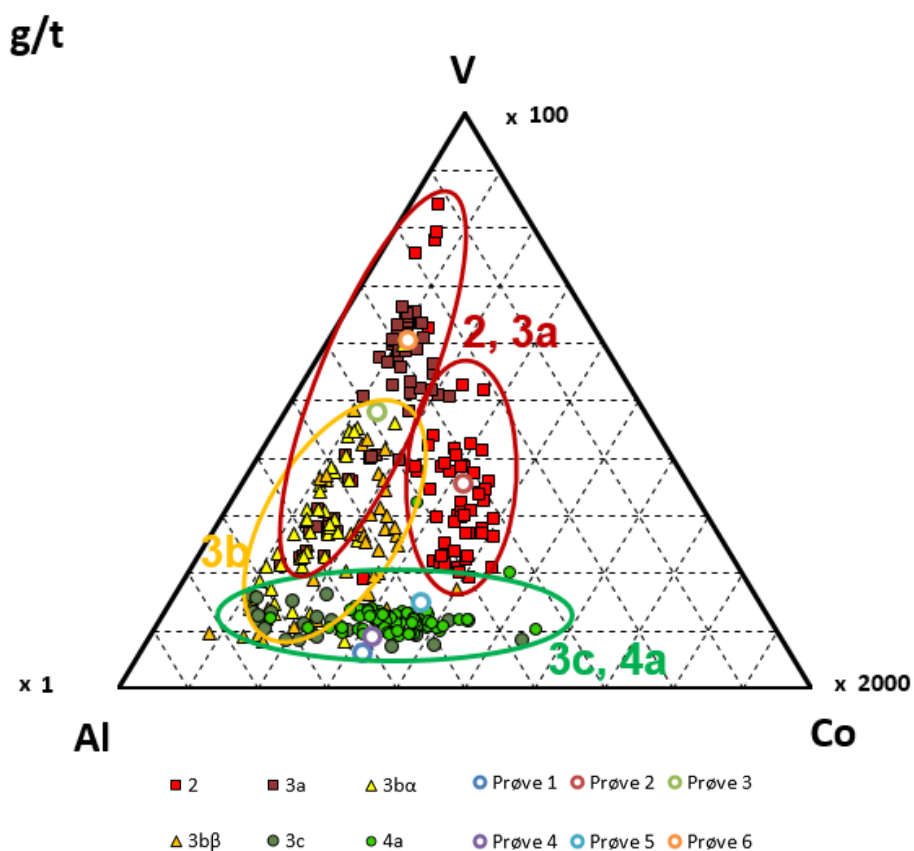
Prøve 6

- a) Etasje 2 eller 3a? → Ukjent
- b) Etasje 4a (m/ AP < 30) eller 3c? → Ukjent
- c) NP:AP >3:1? → Ja
- d) Anses som ikke syredannende

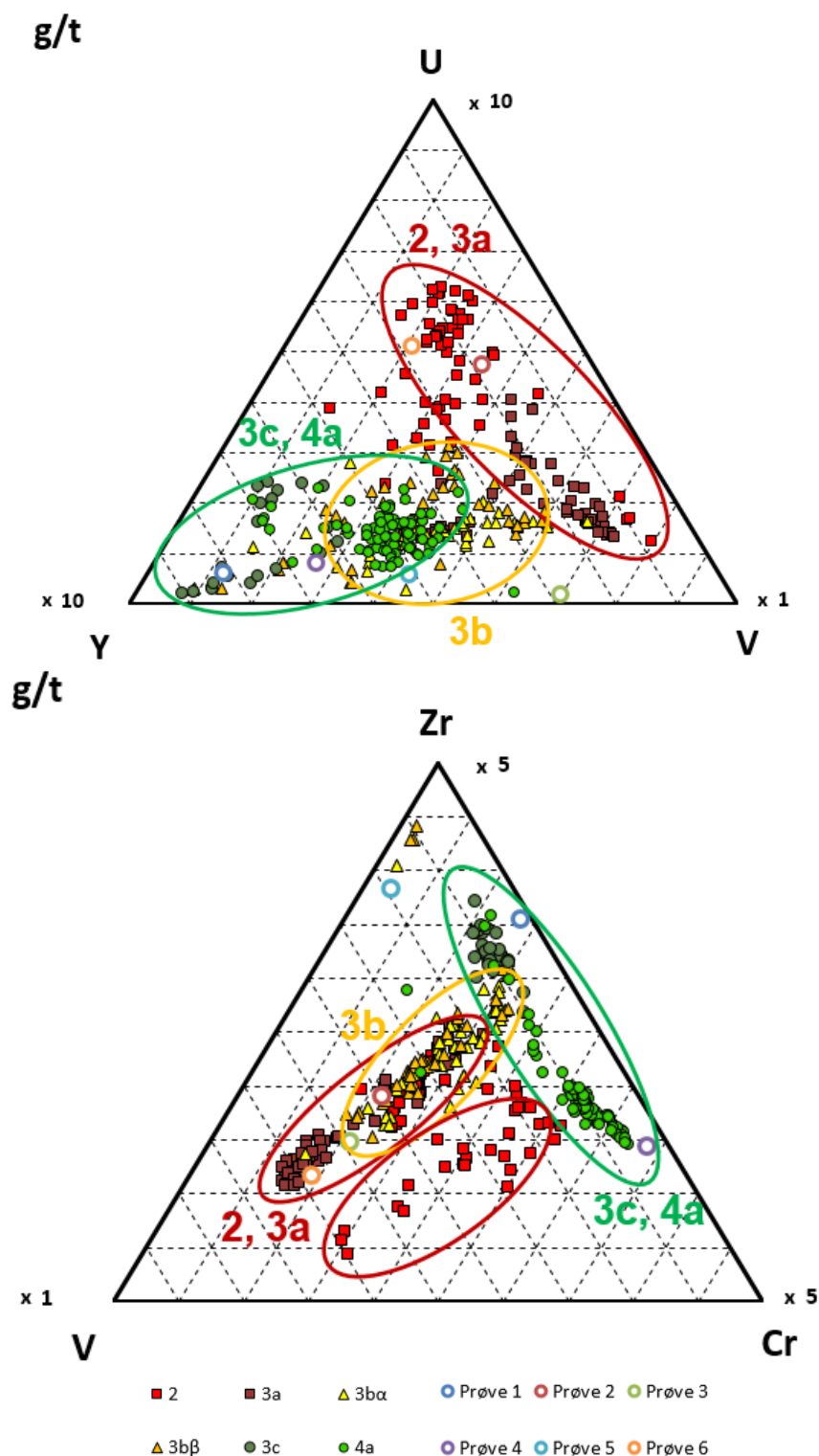
I figur B-1 kan en se at Prøve 6 ligger godt innenfor den nøytraliserende sonen av diagrammet. Samtidig har den en relativt høy AP-verdi, som følger av svovelinholdet (15 500 mg/kg, tabell B-1). Grunnen til at Prøve 6 ligger i den nøytraliserende sonen er fordi den også har et høyt TIC-innhold. Prøver som gir slike resultater må vies ekstra oppmerksomhet, ettersom de ofte kan representere et kalkrikt lag eller en kalkknoll i Alunskiferformasjonen. Prøven er dermed ikke representativ for bergmassen som skal klassifiseres, og i slike tilfeller bør man ha flere prøver for å sikre seg at man har fått resultater som er representative for hoveddelen av massene.

B2.2 Avansert vurdering: trekantdiagram

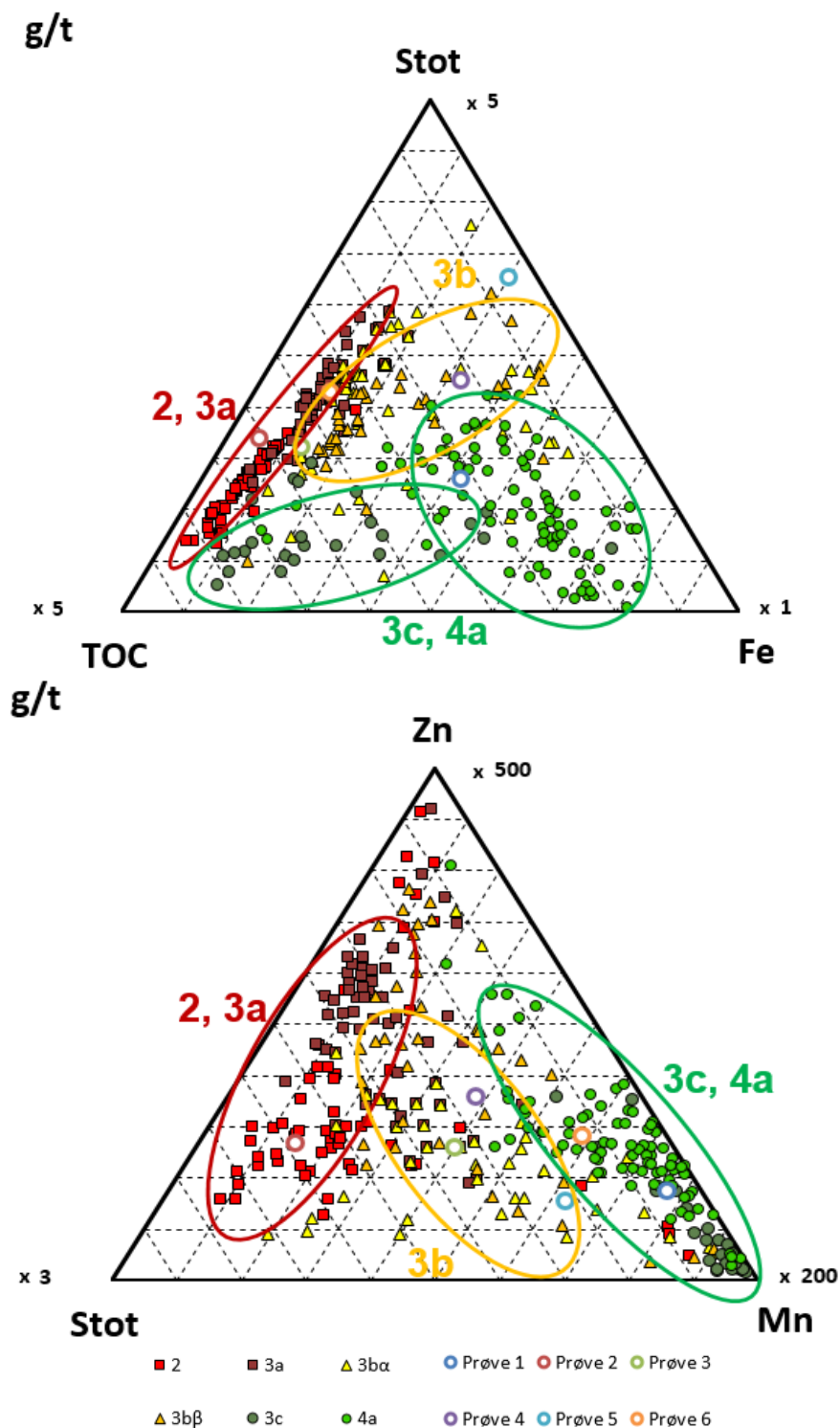
Trekantdiagrammer for de 6 skiferprøvene er vist i figur B-4 til figur B-8. Sirkler indikerer hvor hovedvekten av referanseprøvene fra de ulike etasjene ligger. Fargene på sirklene indikerer prøvenes mulige tilhørighet innenfor de ulike trendene i AP:NP-diagrammet (rødt = syredannende, gul = usikker, grønn = ikke syredannende). Merk at sirklene overlapper i enkelte diagrammer. Ved å undersøke hvor prøvene legger seg i samtlige diagrammer, vil en som regel kunne se en bestemt trend som viser hvilken etasje prøvene hører til. Dersom en prøve ikke følger en bestemt trend, kan dette enten bety at prøven er fra en sone mellom to etasjer, at prøven er en blanding av ulike skifertyper eller at prøven stammer fra en skiferhorisont lenger oppe i den kambrosiluriske lagrekken enn 4a. Bergarter over etasje 4a er det ikke samlet og systematisert grunnlagsdata for, ettersom man ikke har erfaring med at disse er syredannende.



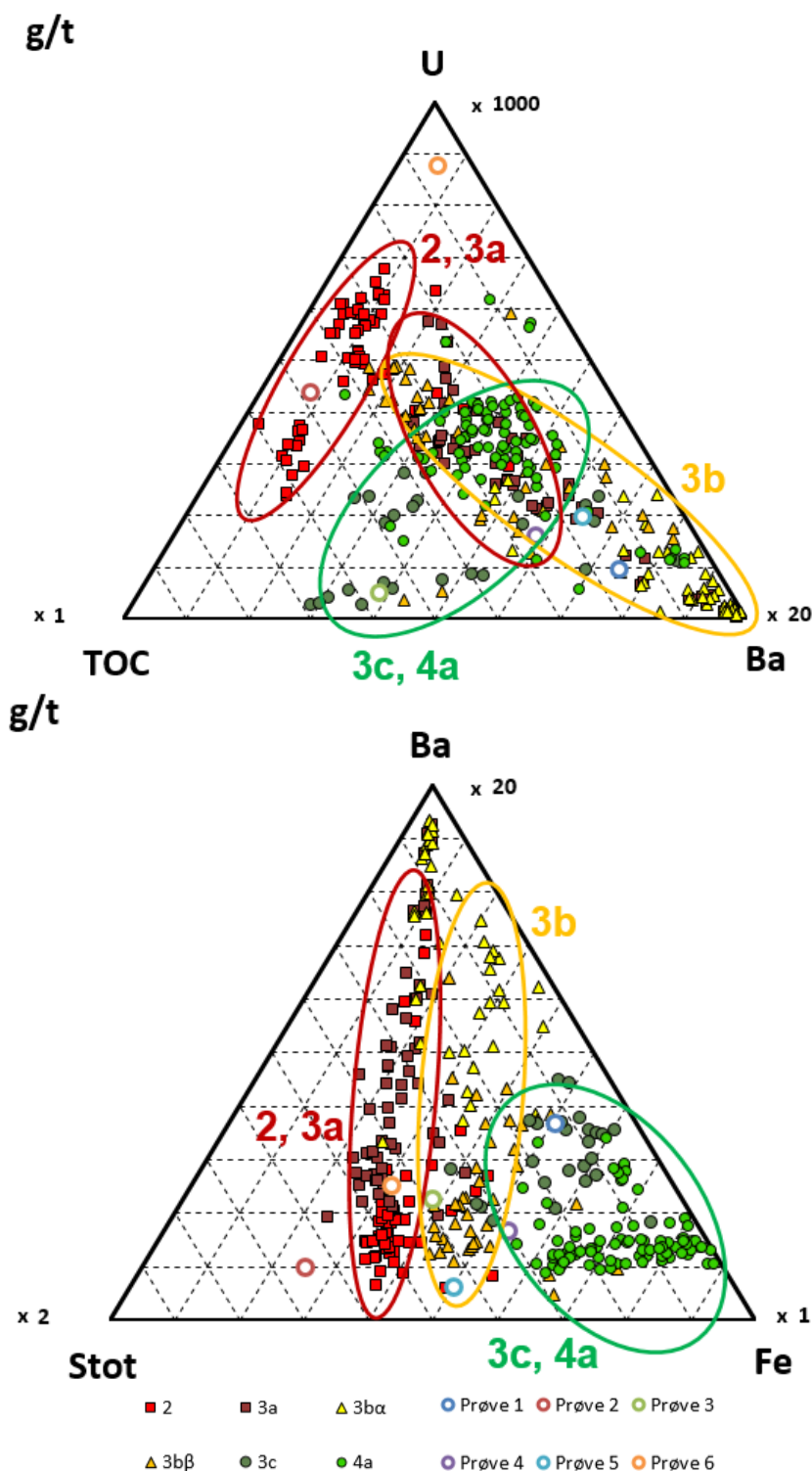
Figur B-4 Trekantdiagrammer som viser de 6 skiferprøvene brukt i eksemplet. Sirkler indikerer hvor hovedvekten av referanseprøvene fra de ulike etasjene ligger. Merk at sirklene overlapper i enkelte diagrammer. Ved å undersøke hvor prøvene legger seg i samtlige diagrammer vil en se en bestemt trend som viser hvilken etasje prøven hører til.



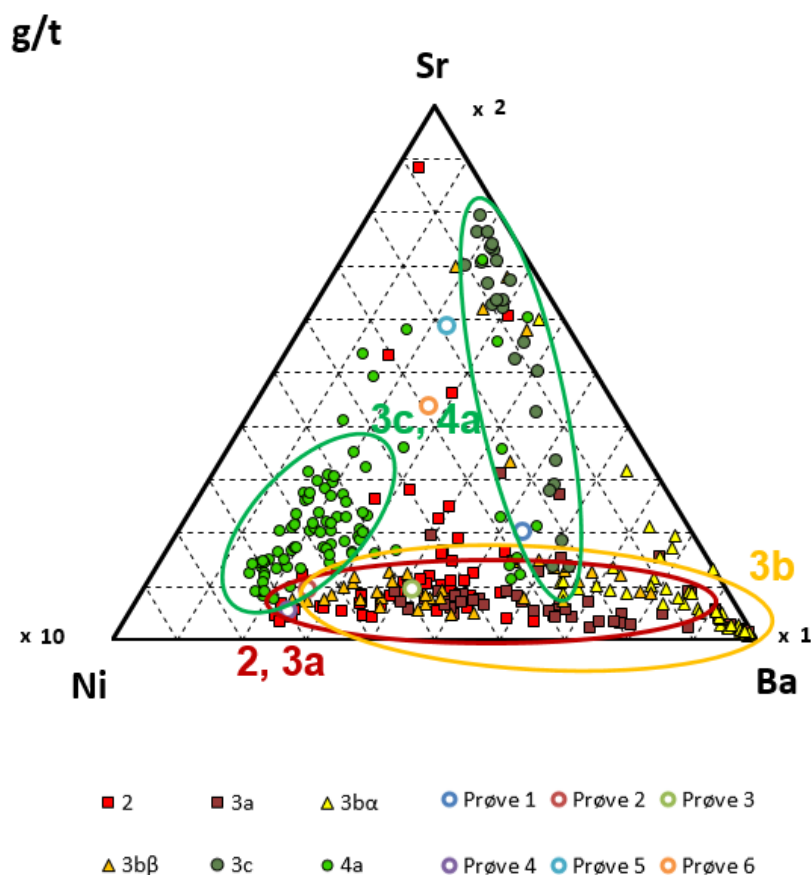
Figur B-5 Trekantdiagrammer som viser de 6 skiferprøvene brukt i eksemplet. Sirkler indikerer hvor hovedvekten av referanseprøvene fra de ulike etasjene ligger. Merk at sirklene overlapper i enkelte diagrammer. Ved å undersøke hvor prøvene legger seg i samtlige diagrammer vil en se en bestemt trend som viser hvilken etasje prøven hører til.



Figur B-6 Trekantdiagrammer som viser de 6 skiferprøvene brukt i eksemplet. Sirkler indikerer hvor hovedvekten av referanseprøvene fra de ulike etasjene ligger. Merk at sirklene overlapper i enkelte diagrammer. Ved å undersøke hvor prøvene legger seg i samtlige diagrammer vil en se en bestemt trend som viser hvilken etasje prøven hører til.



Figur B-7 Trekantdiagrammer som viser de 6 skiferprøvene brukt i eksemplet. Sirkler indikerer hvor hovedvekten av referanseprøvene fra de ulike etasjene ligger. Merk at sirklene overlapper i enkelte diagrammer. Ved å undersøke hvor prøvene legger seg i samtlige diagrammer vil en se en bestemt trend som viser hvilken etasje prøven hører til.



Figur B-8 Trekantdiagrammer som viser de 6 skiferprøvene brukt i eksemplet. Sirkler indikerer hvor hovedvekten av referanseprøvene fra de ulike etasjene ligger. Merk at sirklene overlapper i enkelte diagrammer. Ved å undersøke hvor prøvene legger seg i samtlige diagrammer vil en se en bestemt trend som viser hvilken etasje prøven hører til.

Detaljert forklaring på hvordan prøvene er vurdert og tankegangen bak:

I eksemplene nedenfor refererer de ulike punktene (a, b, c...) til forflytning mellom steg i flytskjemaet i figur B-3.

Prøve 1

I trekantdiagrammene legger prøven seg hovedsakelig i samme gruppe som 3c, men med noen unntak. Av tabell B-1 kan en se at prøven har svært lave konsentrasjoner av både svovel, uran og andre tungmetaller, noe som er typisk for etasje 3c. Prøve 1 tilhører sannsynligvis etasje 3c – Hukformasjonen.

- Etasje 2 eller 3a? → Nei
- Etasje 4a (m/ AP < 30) eller 3c? → Ja
- Anses ikke som syredannende

Prøve 2

I trekantdiagrammene legger prøve 2 seg nesten utelukkende sammen med referanseprøvene fra etasje 2. I tillegg kan en av tabell B-2 se at urankonsentrasjonen er 86 mg/kg og at svovelkonsentrasjonen er >50 000 mg/kg (>5 %). Disse høye konsentrasjonene er typiske for alunskiferformasjonen. Den høye urankonsentrasjonen betyr at prøven overskrider grenseverdien for radioaktivt avfall på 1 Bq/g. Prøven tilhører med all sannsynlighet etasje 2 – Alunskiferformasjonen.

- a) Etasje 2 eller 3a? → Ja.
- b) Anses som syredannende.

Prøve 3

Prøve 3 ser ut til å være et eksempel på en prøve som er litt vanskeligere å tolke. Prøven legger seg hovedsakelig sammen med referanseprøver fra etasje 3 i trekantdiagrammene. Videre kan en se at den ikke konsekvent følger hverken etasje 3a eller 3c og det ser heller ut til at den legger seg sammen med referanseprøvene fra etasje 3bβ. Etasje 3bβ – Galgebergskifer, er typisk vanskelig å identifisere og ligger ofte i den usikre sonen (figur B-1). Det kan også merkes at Prøve 3 har under halvparten av svovelinnholdet til Prøve 2 (alunskifer), 19 500 mg/kg (ca. 2%), og svært lav urankonsentrasjon, 2,95 mg/kg, sammenlignet med Prøve 2. Prøven hører derfor sannsynligvis til etasje 3bβ – Galgebergskifer.

- a) Etasje 2 eller 3a? → Nei
- b) Etasje 4a (m/ AP < 30) eller 3c? → Nei
- c) NP:AP >3:1? → Nei
- d) NP:AP <1:1? → Nei
- e) Fe:S >2:1? → Nei
- f) Fe:S <1:1? → Nei
- g) AP<30? → Nei
- h) Anses som syredannende

Prøve 4

I trekantdiagrammene ser det ut til at det er et relativt godt samsvar mellom prøve 4 og referanseprøvene fra etasje 4a, men med noen avvik. Når prøver ser ut til å følge etasje 4a, men med noe avvik, kan dette ofte skyldes at prøven tilhører en horisont innenfor etasje 4 som ligger lenger opp enn etasje 4a, som for eksempel Arnestadformasjonen eller Nakkholmenformasjonen. Dette har ingen praktisk betydning for håndteringen ettersom de andre horisontene med mørke leirskifre i etasje 4 har tilsvarende egenskaper som 4a. Prøve 4 tilhører med all sannsynlighet etasje 4 – Oslogruppen.

- a) Etasje 2 eller 3a? → Nei.
- b) Etasje 4a (m/ AP < 30) eller 3c? → Nei
- c) NP:AP >3:1? → Nei.
- d) NP:AP <1:1? → Nei.
- e) Fe:S >2:1? → Ja
- f) Anses ikke som syredannende.

Prøve 5

Prøve 5 ser også ut til å være en prøve som er vanskelig å tolke. I slike tilfeller kan en god strategi være først å vise at prøven ikke tilhører enten etasje 2 og 3a eller 3c og 4a. En kan se av trekantdiagrammene at prøve 5 ikke følger referanseprøvene fra noen av disse etasjene konsekvent. Videre kan en se en mulig trend som viser at Prøve 5 legger seg sammen med referanseprøvene fra etasje 3bβ. Som nevnt for Prøve 3, kan prøver fra etasje 3b være vanskelige å identifisere. I tabell B-2 kan en se at Prøve 5 har høyere svovel enn Prøve 3, men omtrent like lav konsentrasjon av uran. Relativ store variasjoner innen uran- og svovelkonsentrasjoner er vanlig for etasje 3bβ. Prøve 5 hører derfor sannsynligvis til etasje 3bβ – Galgebergskifer.

- a) Etasje 2 eller 3a? → Nei.
- b) Etasje 4a (m/ AP < 30) eller 3c? → Nei
- c) NP:AP > 3:1? → Nei
- d) NP:AP < 1:1? → Nei
- e) Fe:S > 2:1? → Nei
- f) Fe:S < 1:1? → Nei
- g) AP < 30? → Nei
- h) Anses som syredannende

Prøve 6

I figur B-1 kan en se at Prøve 6 ligger godt innenfor den nøytraliserende sonen av diagrammet. Samtidig har den en relativt høy AP-verdi, som følger av svovelinnholdet (15 500 mg/kg, tabell B-1). Grunnen til at Prøve 6 ligger i den nøytraliserende sonen, er fordi den også har et høyt TIC-innhold. Prøver som gir slike resultater må vies ekstra oppmerksomhet, ettersom de ofte kan representere et kalkrikt lag eller en kalkknoll i Alunskiferformasjonen. Trekantdiagrammene viser at prøve 6 hovedsakelig legger seg sammen med referanseprøvene fra etasje 3a. I de to trekantdiagrammene hvor uran er en av de tre grunnstoffene, legger imidlertid ikke prøve 6 seg sammen med etasje 3a. Dette skyldes at prøve 6 har et særdeles høyt innhold av uran (244 mg/kg, tabell B-2). Dette er unormalt høyt for etasje 3a, men kan forekomme i enkelte uranrike lag. Prøve 6 representerer et kalkrikt lag eller en kalkknoll fra etasje 3a – Alunskiferformasjonen. For den enkle vurderingen i B1.1 ble denne prøven regnet som ikke syredannende grunnet det høye NP:AP forholdet. Masser fra etasje 3a er stort sett syredannende, og denne prøven er sannsynligvis ikke representativ for en større andel av massene. Dette illustrerer hvor viktig det er med representativ prøvetaking, samt å ta minimum to prøver fra hvert lag som er synlig.

- a) Etasje 2 eller 3a? → Ja
- b) Anses som syredannende

B3 Forslag til trekantdiagrammer for identifisering av etasje

Pabst, Sørmo og Endre (2017) foreslår i sin artikkel noen trekantdiagrammer som kan være nyttige for å identifisere de ulike etasjene. Disse forslagene er summert i Tabell B 1. A, B og C viser til hjørnene i Figur 1. For beskrivelse av kjemisk sammensetning av etasjene vises til artikkelen publisert av Pabst, Sørmo og Endre (2017).

Tabell B 1 Foreslåtte trekantdiagrammer for identifisering av ulike etasjer hentet fra Pabst, Sørmo og Endre (2017). A, B og C viser til hjørnene i trekantdiagrammet som vist i Figur 1, samt vektning av hver parameter. Relativ mengde er i g/tonn. Stot er total svovel (S).

Ettasje	A		B		C	
	parameter	vektning	parameter	vektning	parameter	vektning
2, 3a, 3c, 4a	V	1	Y	10	U	15
	V	1	Cr	5	Zr	5
	Stot	2	Fe	1	Ba	20
	TIC	5	Stot	10	Si	1
	Cu	4	Zr	2	Co	15
	Th	10	Cr	1	Cu	2
3a, 3c, 4a	Cr	10	Sr	5	Ba	1
	Cr	1	Ni	1	Th	10
	V	3	Y	20	Cr	10
	Ni	10	V	3	Sr	1
2, 3a, 4a	Fe	1	Stot	3	Mg	3
	Ba	10	Y	300	Mg	1
	Al	1	V	100	Co	2 000
	V	1	Mn	1	Ni	5
2, 3a, 3c	Sr	1	As	5	Zr	2
	TOC	1	Ba	20	U	1 000
3aα, 3bβ	TOC	1	Ba	20	U	1 000
	Ni	10	Ba	1	Sr	2
	U	10	Co	5	Ni	1
	Sr	2	Cr	5	V	3

Vedlegg C

REFERANSEDATA FOR
TREKANTDIAGRAMMER

	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Pb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	U	Ba	S	As	Be	Cd	Hg	Mo	Sc	Sn	W	TC	TOC	TIC	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	BaO	L.O.I.	
Etasje 2	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
St13.1	2.122	313	23	279	217	398	166	49	345	158	156	20	22	306	4.423	19.739	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90.330	87.780	2.550	51.89	15.41	4.39	0.02	1.13	1.98	0.80	5.30	0.77	0.95	0.49	14.90
St14.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	84.570	82.950	1.620	55.01	16.45	4.16	0.01	1.18	0.44	0.89	5.45	0.86	0.21	0.27	13.50
St15.1	959	336	32	293	305	840	143	35	130	59	142	17	14	85	1.558	30.022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71.490	67.650	3.840	53.26	13.48	7.16	0.02	1.29	1.46	0.84	4.58	0.71	0.13	0.17	14.20
St9.1	1.080	266	29	254	173	227	163	33	100	47	164	19	17	154	1.577	23.757	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78.450	76.470	1.980	56.09	15.09	5.46	0.01	1.10	0.42	0.86	5.21	0.80	0.11	0.18	13.40
St10.1	592	272	31	153	128	44	148	57	88	53	148	19	15	180	1.283	33.733	-	-	-	-	-	-	-	-	-	101.250	100.230	1.020	52.09	14.72	7.06	0.01	0.95	0.35	0.93	4.79	0.75	0.11	0.14	16.90
St11.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	97.230	96.870	360	49.22	14.33	9.55	0.01	0.90	0.28	0.87	4.67	0.74	0.11	0.13	17.60
St12.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.175	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125.060	16.122	108.938	5.63	1.56	0.62	0.10	0.58	48.25	0.08	0.35	0.07	0.02	0.03	38.60
St5.1	103	19	-	21	29	22	36	7	1.124	19	33	-	-	21	86	6.458	-	-	-	-	-	-	-	-	-	127.460	33.270	94.190	2.01	0.58	2.01	0.13	0.51	51.70	0.02	0.13	0.03	0.02	0.01	38.50
St6.1	806	256	26	215	137	59	165	43	103	59	163	19	17	193	970	29.212	-	-	-	-	-	-	-	-	-	116.400	115.740	660	50.83	15.37	5.97	0.01	1.02	0.35	0.99	4.87	0.78	0.18	0.11	18.50
St7.1	879	323	31	271	134	113	162	38	130	73	160	21	15	160	877	28.219	-	-	-	-	-	-	-	-	-	105.540	103.590	1.950	51.95	14.68	5.41	0.02	1.02	1.20	0.87	4.75	0.76	0.17	0.10	17.60
St8.1	1.002	253	28	251	133	70	173	49	103	51	164	20	16	226	933	31.453	-	-	-	-	-	-	-	-	-	129.060	127.080	1.980	49.42	15.35	6.08	0.01	1.04	0.35	0.91	4.92	0.77	0.14	0.10	19.70
St3.1	727	259	29	199	129	75	158	50	91	63	149	18	15	163	923	41.496	-	-	-	-	-	-	-	-	-	115.620	113.910	1.710	47.94	15.00	7.92	0.01	0.99	0.27	0.73	4.79	0.73	0.13	0.10	19.80
St4.1	681	262	15	124	56	50	174	20	95	39	180	21	16	73	989	22.626	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66.720	66.270	450	53.56	17.37	4.58	0.01	1.07	0.39	0.59	5.75	0.89	0.07	0.11	14.20
St1.1	1.003	199	40	294	129	106	154	36	93	71	172	19	14	158	927	42.526	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79.950	78.480	1.470	51.73	15.29	8.03	0.01	0.91	0.65	0.65	4.95	0.80	0.19	0.10	15.50
St2.1	1.080	268	38	246	122	54	161	41	85	47	162	19	15	151	889	43.087	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88.260	86.460	1.800	50.75	15.52	7.67	0.01	0.90	0.29	0.70	4.94	0.79	0.13	0.10	16.60
St22.1	508	169	35	101	200	97	168	29	92	45	175	20	17	55	861	28.840	-	-	-	-	-	-	-	-	-	103.320	102.480	840	51.82	15.49	5.93	0.02	1.19	0.25	0.72	4.59	0.84	0.09	0.10	17.00
St20.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.296	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53.850	51.150	2.700	60.19	14.23	3.96	0.02	1.31	1.87	0.90	4.35	0.73	0.43	0.14	10.20
St23.1	422	201	33	99	217	169	161	31	90	39	167	19	14	52	827	31.799	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83.880	81.780	2.100	53.02	15.78	6.67	0.02	1.17	0.31	0.61	4.67	0.88	0.07	0.09	15.30
St21.1	2.999	464	10	216	108	551	150	32	132	40	212	18	16	68	1.307	10.389	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58.710	49.800	8.910	61.01	14.42	3.88	0.02	1.49	1.36	0.86	4.40	0.78	0.12	0.15	9.90
St24.1	420	217	34	109	142	166	158	30	93	33	168	21	16	49	827	32.253	-	-	-	-	-	-	-	-	-	81.960	81.360	600	53.52	15.46	6.97	0.02	1.23	0.40	0.63	4.64	0.87	0.07	0.09	14.90
St19.1	4.155	418	18	375	217	500	164	50	112	52	187	17	17	95	1.372	16.976	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74.730	70.950	3.780	55.80	15.60	4.86	0.02	1.30	1.00	0.84	4.67	0.83	0.15	0.15	12.60
St25.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	887	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	92.130	89.970	2.160	46.08	14.30	12.58	0.03	1.05	0.38	0.57	4.14	0.79	0.07	0.10	18.60
St17.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.508	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	84.960	84.630	330	54.12	15.71	4.05	0.01	1.17	0.41	1.17	5.38	0.85	0.21	0.61	13.20
St26.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	832	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	101.940	100.590	1.350	49.96	15.82	6.63	0.03	1.31	0.72	0.65	4.61	0.86	0.09	0.09	17.80
St18.1	6.188	656	15	393	241	1.385	187	56	209	62	183	20	16	96	7.641	16.114	-	-	-	-	-	-	-	-	-	76.560	76.260	300	54.26	16.48	3.99	0.01	1.28	0.66	0.74	5.42	0.91	0.22	0.85	12.70
St16.1	4.815	480	19	384	186	592	190	58	198	60	185	20	19	145	6.143	15.402	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90.090	90.090	-	54.11	16.48	3.71	0.01	1.28	0.54	0.86	5.45	0.90	0.26	0.69	13.80
St27.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	750	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	116.550	101.940	14.610	44.51	14.28	7.79	0.03	0.99	3.44	0.50	4.15	0.76	0.15	0.08	21.20
St28.1	1.064	226	41	196	199	130	139	41	186	64	145	18	12	137	711	60.495	-	-	-	-	-	-	-	-	-	105.120	97.380	7.740	39.58	12.98	11.78	0.04	0.99	4.34	0.47	3.72	0.71	0.13	0.08	23.10
St29.1	1.704	270	38	290	138	56	156	35	67	44	166	20	16	153	974	35.411	-	-	-	-	-	-	-	-	-	130.260	129.660	600	50.52	14.63	6.16	0.01	1.03	0.40	0.60	4.25	0.80	0.15	0.11	19.80
St30.1	775	192	30	164	145	89	131	31	466	69	137	17	11	153	982	30.090	-	-	-	-	-	-	-	-	-	115.710	83.010	32.700	42.80	13.02	7.97	0.01	0.79	0.30	0.54	4.18	0.69	0.11	0.11	27.20
St31.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96.090	91.500	4.590	48.08	15.73	8.06	0.01	1.03	0.44	0.63	5.01	0.80	0.15	0.11	18.70
St32.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	991	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	97.590	79.590	18.000	49.17	15.85	8.23	0.01	1.05	0.44	0.64	5.09	0.81	0.16	0.11	16.40
St33.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	742	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	97.800	97.320	480	47.50	15.44	7.51	0.01	0.90	0.40	0.67	4.66	0.78	0.07	0.08	19.50
St43.1	413	189	38	108	175	77	164	29	94	61	171	18	15	47	836	34.018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90.120	89.670	450	52.37	15.10	7.16	0.02	1.15	0.29	0.62	4.64	0.84	0.08	0.09	15.80
St44.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	862	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88.620	88.620	-	53.93	14.94	7.14	0.02	1.17	0.40	0.65	4.63	0.82	0.08	0.10	15.90
St45.1	443	244	46	130	307	222	152	56	97	48	163	20	14	61	780	46.765	-	-	-	-	-	-	-	-	-	86.250	86.250	-	50.97	14.25	9.34	0.02	1.14	0.53	0.59	4.31	0.81	0.09	0.09	16.90
St41.1	478	207	37	93	131	64	160	34	93	42	166	20	15	61	827	31.139	-	-	-	-	-	-	-	-	-	91.170	90.600	570	54.73	15.04	6.39	0.02	1.11	0.30	0.63	4.56	0.83	0.10	0.09	15.40
St42.1	450	202	39	130	160	202	155	28	94	43	163	18	16	55	782	37.181	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80.160	79.800	360	53.19	14.65	8.									

Etasje 2	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Pb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	U	Ba	S	As	Be	Cd	Hg	Mo	Sc	Sn	W	TC	TOC	TIC	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	BaO	L.O.I.	
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
SLO1	685	112	21	89	127	436	175	22	237	56	155	15	14	133	1.523	15.908	-	-	-	-	-	-	-	-	-	113.500	92.980	20.520	41	13	7.4	0.03	1.1	9.3	0.47	3.7	0.67	0.20	0.17	21
SLO2	824	112	29	145	102	246	151	49	264	54	135	16	13	185	1.648	21.603	-	-	-	-	-	-	-	-	-	116.100	106.600	9.500	45	13	8.8	0.03	1.0	4.4	0.47	4.0	0.70	0.27	0.18	21
SLO3	673	108	35	176	157	130	159	43	188	47	154	17	17	136	1.563	35.431	-	-	-	-	-	-	-	-	-	106.800	96.510	10.290	47	14	7.5	0.03	1.1	4.3	0.51	4.2	0.73	0.19	0.17	19
SLO4	617	103	35	144	152	123	149	32	116	46	144	17	15	130	1.638	39.646	-	-	-	-	-	-	-	-	-	104.000	100.400	3.600	50	14	8.6	0.03	1.0	1.3	0.53	4.4	0.74	0.21	0.18	19
SLO5	855	108	42	252	156	169	140	40	147	50	140	17	13	174	1.516	53.485	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.900	96.890	4.010	44	13	10.9	0.02	1.0	1.8	0.49	4.1	0.71	0.24	0.17	20
SLO6	587	96	41	157	156	114	150	37	204	64	145	17	13	132	1.758	39.095	-	-	-	-	-	-	-	-	-	104.200	96.980	7.220	48	14	7.7	0.03	1.1	3.3	0.51	4.4	0.72	0.27	0.20	19
SLO7	546	70	19	94	87	108	101	21	897	90	99	11	10	194	1.161	17.820	-	-	-	-	-	-	-	-	-	131.620	69.710	61.910	25	7	3.4	0.12	1.9	25.9	0.24	2.0	0.36	0.28	0.13	26
SLO8	578	95	40	160	191	137	149	37	90	39	155	18	14	158	1.622	48.458	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88.290	86.350	1.940	48	15	9.8	0.01	1.0	0.7	0.53	4.5	0.78	0.16	0.18	18
SLO9	624	97	35	143	163	113	151	37	197	57	150	17	15	141	1.762	36.741	-	-	-	-	-	-	-	-	-	110.800	102.600	8.200	48	14	7.0	0.03	1.1	3.1	0.48	4.2	0.72	0.26	0.20	20
SLO10	618	100	36	152	163	129	153	34	156	59	148	17	13	138	1.810	38.496	-	-	-	-	-	-	-	-	-	105.300	100.800	4.500	49	14	7.4	0.03	1.1	1.9	0.53	4.4	0.75	0.23	0.20	19
SLO11	554	95	38	149	166	121	147	36	294	51	153	17	14	169	1.567	41.330	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.570	92.620	6.950	48	14	8.3	0.02	1.2	2.7	0.45	4.3	0.76	0.19	0.17	19
SLO13	557	90	32	140	134	101	130	35	359	54	128	14	11	123	1.680	40.636	-	-	-	-	-	-	-	-	-	107.600	89.450	18.150	40	12	9.4	0.04	1.3	8.2	0.42	3.5	0.60	0.22	0.19	21
SLO14	622	89	35	144	140	118	135	34	430	65	134	15	11	159	1.492	37.340	-	-	-	-	-	-	-	-	-	116.600	92.140	24.460	39	11	7.2	0.06	1.3	11.0	0.38	3.4	0.60	0.27	0.17	24
SLO15	606	100	44	213	181	189	149	38	124	53	161	18	16	192	1.491	47.125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89.590	85.730	3.860	48	14	9.2	0.02	1.1	2.1	0.51	4.4	0.76	0.21	0.17	18
SLO16	472	83	28	124	150	135	135	35	437	66	142	15	13	165	1.391	37.047	-	-	-	-	-	-	-	-	-	97.820	70.620	27.200	39	11	7.5	0.05	1.8	11.4	0.38	3.4	0.60	0.18	0.16	19
SLO17	894	116	40	250	161	235	153	41	92	48	162	20	15	217	1.649	44.430	-	-	-	-	-	-	-	-	-	97.130	95.530	1.600	49	15	8.4	0.02	1.0	0.8	0.51	4.6	0.79	0.22	0.18	18
SLO18	550	88	37	181	143	118	126	33	636	56	132	14	11	164	1.469	36.212	-	-	-	-	-	-	-	-	-	101.100	72.460	28.640	39	11	7.1	0.06	1.5	12.2	0.33	3.3	0.56	0.17	0.16	20
SLO19	796	105	41	218	176	125	148	44	169	81	148	18	14	264	1.614	41.453	-	-	-	-	-	-	-	-	-	116.000	109.300	6.700	47	14	8.0	0.02	1.1	2.7	0.49	4.2	0.72	0.39	0.18	21
SLO20	230	20	6	40	44	38	49	8	1.484	32	43	1	1	46	1.529	6.314	-	-	-	-	-	-	-	-	-	139.600	37.810	101.790	6	2	1.2	0.11	1.0	45.9	0.03	0.5	0.10	0.13	0.17	39
SLO21	791	103	41	190	139	157	142	36	208	60	142	18	14	195	1.526	38.254	-	-	-	-	-	-	-	-	-	114.700	105.200	9.500	46	13	8.2	0.04	1.0	4.1	0.42	3.9	0.70	0.27	0.17	21
SLO22	752	103	39	164	157	119	147	38	217	52	147	17	13	147	1.576	36.323	-	-	-	-	-	-	-	-	-	124.660	113.200	11.460	45	13	7.4	0.03	1.1	4.2	0.42	4.0	0.69	0.23	0.18	22
SLO23	866	122	34	178	163	124	146	38	204	59	148	17	14	188	1.674	40.033	-	-	-	-	-	-	-	-	-	126.340	115.800	10.540	45	13	7.7	0.02	1.0	3.7	0.44	4.1	0.70	0.27	0.19	22
SLO24	824	108	36	167	159	116	129	36	203	53	130	16	12	175	1.514	48.895	-	-	-	-	-	-	-	-	-	121.220	111.900	9.320	43	12	11.0	0.02	1.0	3.7	0.39	3.8	0.67	0.27	0.17	23
SLO25	621	103	36	138	160	115	141	31	138	68	141	16	11	143	1.756	42.387	-	-	-	-	-	-	-	-	-	111.100	107.800	3.300	48	14	8.6	0.03	1.0	1.5	0.48	4.3	0.73	0.35	0.20	20

Etasje 3a	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Pb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	U	Ba	S	As	Be	Cd	Hg	Mo	Sc	Sn	W	TC	TOC	TIC	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	BaO	L.O.I.
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
BØI - 1,9	2.060	97	15	178	105	357	-	39	125	40	146	18	17	41	1.990	33.200	49	4	10	0	84	15	4	-	41.610	38.400	3.210	56.80	16.00	5.75	0.01	1.40	0.48	0.93	4.61	0.88	0.15	-	10.40
BØI - 2,6	1.990	92	16	183	102	306	-	40	144	42	158	19	17	43	2.070	40.100	57	4	9	0	86	15	4	-	42.100	39.400	2.700	54.80	15.70	6.17	0.01	1.45	0.49	0.94	4.49	0.91	0.16	-	10.60
BØI - 4,0	1.850	107	16	188	105	380	-	37	184	40	154	19	17	41	2.540	36.300	54	4	11	0	84	16	4	-	41.030	37.500	3.530	59.70	15.80	6.28	0.03	1.55	0.72	0.90	5.85	0.92	0.14	-	10.20
BØI - 6,6	1.970	102	15	212	110	438	-	46	179	55	163	18	17	64	2.940	51.500	140	4	11	0	167	16	3	-	39.070	37.000	2.070	59.50	15.50	7.54	0.01	1.33	0.76	0.81	6.24	0.82	0.32	-	10.70
BØI - 8,3	2.120	109	15	198	108	459	-	40	158	43	162	19	18	40	2.210	38.600	64	4	13	0	80	16	4	-	38.960	36.000	2.960	55.00	15.60	6.20	0.02	1.47	0.73	0.88	4.82	0.94	0.20	-	9.90
BØII - 1,3	1.700	104	13	124	100	207	-	35	156	37	161	19	17	39	5.090	27.600	37	4	5	0	64	17	4	-	45.910	42.200	3.710	60.50	18.90	6.31	0.02	1.50	1.04	0.92	5.93	1.00	0.13	-	9.90
BØII - 2,6	1.920	96	17	182	122	466	-	44	150	43	165	19	18	40	3.590	36.500	53	4	12	0	79	16	4	-	46.170	42.000	4.170	59.40	16.90	5.35	0.02	1.44	0.81	0.95	4.40	0.93	0.19	-	10.70
BØII - 4,0	1.340	74	13	164	86	273	-	34	398	33	129	15	13	33	2.930	36.400	51	3	7	0	57	12	3	-	54.200	30.400	23.800	45.60	12.30	6.41	0.07	2.37	9.93	0.71	4.09	0.71	0.13	-	13.20
BØII - 5,3	1.950	96	16	216	108	395	-	38	219	40	157	19	17	42	2.210	36.400	53	4	10	0	84	15	4	-	43.470	35.700	7.770	57.00	15.90	6.70	0.03	1.78	2.57	0.88	4.54	0.88	0.15	-	11.60
BØII - 6,5	1.800	91	17	219	119	438	-	44	220	40	161	18	17	43	2.650	41.100	60	4	12	0	74	14	4	-	44.480	36.100	8.380	54.40	15.50	5.61	0.03	1.72	2.16	0.87	4.28	0.88	0.17	-	11.40
BØIII - 1,3	337	82	11	50	100	115	-	17	394	36	134	16	16	11	12.600	21.400	15	3	1	0	10	13	3	-	41.900	20.500	21.400	49.30	13.40	5.11	0.06	2.42	8.23	0.71	4.45	0.71	0.23	-	9.70
BØIII - 2,6	326	81	10	47	118	109	-	20	323	36	153	18	18	11	34.600	30.200	16	3	0	0	5	15	4	-	25.920	21.000	4.920	57.70	15.80	5.81	0.02	1.36	1.26	0.70	4.74	0.85	0.27	-	7.10
BØIII - Rest	1.510	81	15	156	106	307	-	38	238	38	162	19	17	37	4.820	34.000	49	3	8	0	68	15	4	-	46.800	35.600	11.200	53.70	15.20	5.73	0.03	1.74	2.52	0.88	4.26	0.87	0.14	-	11.20
BØIV - 1,3	732	95	11	82	79	176	-	26	433	37	157	18	17	20	20.600	27.500	26	3	3	0	24	15	3	-	32.000	13.700	18.300	57.70	16.00	7.13	0.06	2.05	3.61	0.71	5.15	0.86	0.16	-	8.30
BØIV - 2,6	463	113	10	60	70	133	-	21	389	37	167	19	18	16	36.600	22.800	18	3	1	0	13	16	3	-	24.040	15.600	8.440	60.70	15.60	6.36	0.04	1.70	2.00	0.63	5.99	0.92	0.14	-	6.30
BVII - 0,5	733	83	16	101	90	159	-	30	233	33	151	17	16	36	2.200	33.900	35	3	3	0	50	14	3	-	51.300	40.200	11.100	55.50	14.60	6.20	0.03	1.82	3.91	0.99	5.03	0.83	0.10	-	11.00
BVII - 1,0	670	76	14	89	85	146	-	27	298	34	147	17	16	33	2.430	30.100	33	3	3	0	44	14	3	-	53.100	27.300	25.800	52.00	13.90	6.10	0.04	1.95	5.68	0.83	4.62	0.78	0.10	-	10.50
BVII - 2,6	1.580	106	15	169	105	345	-	42	162	38	149	19	17	42	1.950	35.700	42	4	9	0	61	16	4	-	48.980	45.200	3.780	64.00	17.30	6.75	0.02	1.50	0.95	0.92	5.99	0.96	0.11	-	11.00
BVIII - 1,3	311	72	12	54	116	126	-	20	368	37	140	17	16	12	12.700	25.300	19	3	1	0	6	14	4	-	45.600	14.300	31.300	52.50	15.00	4.51	0.04	2.13	7.92	0.69	4.68	0.75	0.31	-	9.10
BVIII - 2,6	346	69	10	49	92	90	-	16	507	32	117	14	13	12	5.050	25.500	18	3	1	0	8	12	3	-	57.800	21.100	36.700	47.90	12.60	6.21	0.07	2.56	11.40	0.61	4.53	0.64	0.20	-	11.60
BVIII - Stov	411	82	12	58	105	105	-	19	436	35	146	17	16	14	8.420	31.700	24	3	1	0	11	13	3	-	50.200	29.200	21.000	55.20	15.40	6.92	0.05	2.39	5.87	0.80	4.72	0.78	0.18	-	10.20
BVIV - 1,3	322	113	11	47	65	107	-	19	272	37	174	21	19	14	43.300	20.900	15	3	0	0	6	15	4	-	19.620	14.500	5.120	60.20	16.90	5.69	0.02	1.40	0.81	0.65	6.69	0.96	0.14	-	5.00
BVIV - 2,6	280	93	8	34	63	96	-	17	447	35	138	18	16	10	58.300	23.600	13	3	0	0	-	15	3	-	26.400	16.100	10.300	67.20	16.20	6.44	0.04	1.77	2.28	0.59	5.95	0.88	0.17	-	5.60
CI	1.410	94	29	280	190	276	-	36	148	57	153	19	18	134	3.160	45.400	80	5	8	0	190	15	4	-	57.100	53.500	3.600	51.60	14.80	7.02	0.02	1.50	0.77	0.76	5.05	0.82	0.15	-	15.10
CI - 1,3	1.500	85	18	228	137	394	-	34	268	45	141	16	14	63	21.000	33.900	65	4	5	0	131	11	3	-	67.800	56.400	11.400	53.20	13.30	7.88	0.01	1.20	1.66	0.50	5.63	0.70	0.14	-	13.60
CI - 2,6	1.410	87	31	363	208	598	-	39	173	62	138	16	14	85	10.700	50.200	86	5	13	0	126	14	4	-	64.600	59.700	4.900	53.70	14.10	7.88	0.02	1.39	0.89	0.67	4.89	0.76	0.22	-	14.00
CI - 4,0	1.200	92	22	225	149	280	-	33	175	53	144	18	15	86	5.830	35.400	63	5	9	0	137	15	3	-	49.600	44.400	5.200	55.10	15.90	5.87	0.03	1.70	1.48	0.85	4.84	0.83	0.19	-	13.90
CI - 6,5	1.400	86	26	289	173	276	-	31	160	59	164	19	17	117	3.290	45.500	70	5	7	0	204	15	3	-	60.920	58.000	2.920	55.00	14.80	7.46	0.02	2.08	0.99	0.71	5.39	0.84	0.17	-	14.80
CI+8 - 1,3	1.250	99	20	215	132	232	-	27	243	54	154	19	15	80	5.170	33.800	52	4	7	0	124	13	3	-	51.150	46.400	4.750	62.90	14.80	7.41	0.04	1.59	2.62	1.09	5.28	0.71	0.18	-	12.70
CI+8 - 2,6	1.390	94	24	266	155	397	-	31	201	55	158	18	16	77	8.610	39.700	64	4	13	0	140	13	3	-	50.040	45.500	4.540	57.50	15.30	7.79	0.03	1.73	1.65	0.86	5.31	0.81	0.18	-	13.40
CI+8 - 4,0	1.410	78	24	274	162	455	-	32	211	54	145	18	16	74	12.000	40.100	69	4	11	0	134	12	3	-	54.730	48.900	5.830	50.30	13.30	7.10	0.02	1.52	1.59	0.74	4.21	0.73	0.18	-	13.60
CI+8 - Rest	1.460	84	23	301	156	627	-	32	226	60	143	16	15	80	11.800	44.400	78	5	9	0	143	12	3	-	67.610	58.500	9.110	54.60	12.90	9.83	0.02	1.41	1.52	0.51	5.74	0.75	0.16	-	14.30
C8G - 1,3	486	53	13	94	178	212	-	17	611	45	76	10	9	29	1.750	19.900	22	2	4	0	26	10	2	-	65.300	26.200	39.100	33.90	9.18	7.50	0.09	4.33	21.60	0.49	2.07	0.45	0.12	-	17.10
C8G - 2,6	1.070	83	13	128	142	249	-	25	304	40	131	15	14	37	1.250	25.000	26	3	5	0	42	13	3	-	57.400	29.600	27.800	50.10	13.10	7.50	0.04	2.66	8.51	0.68	4.44	0.71	0.12	-	11.30
C8G - 4,0	1.420	91	16	165	140	362	-	32	168	43	158	18	16	41	1.380	29.600	35	4	10	0	72	15	3	-	49.700	37.300	12.400	53.70	15.10	6.15	0.02	1.90	2.71	0.84	4.94	0.84	0.13	-	11.50
C8G - 6,5	1.690	100	16	202	123	395	-	35	175	41	162	19	17	43	1.540	32.100	41	3	12	0	78	16	3	-	46.010	38.600	7.410	56.30	15.80	6.50	0.02	1.59	1.58	0.87					

Etasje 3bα	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Pb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	U	Ba	S	As	Be	Cd	Hg	Mo	Sc	Sn	W	TC	TOC	TIC	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	BaO	L.O.I.	
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
BH1-16-5-20	196	77	10.10	38.2	27.8	25.1	-	6.1	165.0	56.6	162	17.5	18	12	4.120	3.530	12.2	3	0.07	0.03	1	16.5	3.53	2	1.400	10.400	66.0	17.6	4.60	0.05	2.14	2.73	0.74	4.64	0.97	0.50	-	5.6		
BH1-17-1-40	187	89	7.39	25.9	20.8	26.7	-	5.6	119.0	30.0	160	18.8	19	4	3.610	5.270	2.6	4	-	-	-	17.4	3.79	2	1.440	3.370	72.1	17.9	4.92	0.02	1.92	0.98	0.65	5.27	0.99	0.14	-	4.2		
BH1-17-2-40	196	85	15.90	53.3	16.4	38.9	-	5.7	160.0	33.0	145	17.8	18	8	3.860	4.920	23.2	3	0.05	-	2	17.0	4.17	2	11.200	13.500	64.0	18.8	4.35	0.04	1.99	3.23	0.62	5.45	1.00	0.14	-	7.7		
BH2-10-3-50	221	103	8.56	28.2	18.8	19.8	-	3.8	107.0	26.4	161	17.7	18	6	3.840	3.430	6.2	3	0.10	-	1	14.9	3.76	2	1.400	9.940	71.7	16.8	3.94	0.02	1.54	1.00	0.72	5.09	0.94	0.14	-	4.0		
BH2-10-4-40	32	25	5.64	13.1	6.7	27.0	-	3.3	401.0	31.4	49	4.9	5	1	3.200	1.330	5.1	2	0.07	-	-	6.4	1.19	1	10.000	66.400	29.6	4.7	5.15	0.16	2.57	27.90	0.13	1.53	0.26	0.10	-	26.8		
BH2-10-5-50	192	93	7.41	26.8	29.1	16.9	-	4.1	129.0	30.6	156	18.3	19	5	2.690	5.170	-	4	0.10	-	-	16.5	4.12	2	1.400	5.990	68.0	17.6	3.77	0.02	1.61	1.46	0.55	5.14	0.97	0.13	-	4.3		
BH2-11-2-50	451	125	10.70	44.9	50.1	37.4	-	12.7	122.0	29.5	193	21.7	22	11	2.110	8.920	9.5	4	0.29	-	2	18.4	4.51	2	3.990	6.830	61.6	23.8	4.17	0.02	1.67	1.69	0.59	6.06	1.16	0.15	-	5.4		
BH2-11-3-30	721	102	11.80	69.8	95.4	146.0	-	19.1	147.0	37.6	174	18.8	20	21	1.770	10.600	9.3	3	1.24	0.04	20	16.7	4.01	2	9.950	9.510	63.3	18.2	4.51	0.04	1.85	2.48	0.59	5.05	0.98	0.15	-	6.8		
BH2-11-5-40	632	101	10.10	70.2	89.3	39.2	-	24.9	147.0	36.9	169	19.7	19	22	2.050	11.300	18.8	3	0.37	0.05	18	16.2	4.19	2	24.300	5.630	64.7	18.0	4.67	0.04	1.80	2.96	0.68	5.57	1.05	0.13	-	8.1		
BH2-12-3-40	541	96	12.50	77.4	98.3	33.8	-	22.7	172.0	35.9	163	19.1	20	23	2.020	14.500	21.3	3	0.30	0.06	9	15.8	4.11	2	17.100	12.400	64.6	18.1	5.57	0.05	2.05	3.42	0.63	5.22	1.05	0.13	-	7.8		
BH2-12-5-40	973	118	12.30	105.0	130.0	161.0	-	18.2	180.0	37.2	153	17.3	18	26	2.680	11.900	19.5	4	2.13	0.06	25	14.3	3.92	2	32.400	10.300	54.2	18.9	4.20	0.04	1.61	3.23	0.54	5.03	0.99	0.17	-	9.5		
BH2-13-2-20	275	35	3.53	31.0	37.2	39.5	-	8.8	600.0	42.1	47	5.0	5	17	5.400	5.080	10.2	2	0.48	0.03	6	7.3	1.17	1	8.500	57.300	25.1	4.9	4.94	0.22	3.02	30.70	0.13	1.59	0.26	0.06	-	28.7		
BH2-13-5-40	505	133	10.70	72.6	106.0	18.9	-	22.4	182.0	37.7	168	19.2	20	18	33.000	24.500	16.8	5	0.13	0.06	14	16.7	5.05	3	16.500	1.580	63.5	19.2	4.84	0.01	1.55	0.51	0.59	5.75	1.04	0.16	-	5.9		
BH2-14-1-15	466	139	10.20	59.0	101.0	24.6	-	21.1	217.0	36.6	159	19.0	19	15	40.000	21.000	15.2	4	0.12	0.05	7	15.4	4.44	2	10.100	2.520	60.6	20.0	4.41	0.02	1.42	0.66	0.55	5.96	0.99	0.18	-	5.3		
BH3-06-3-30	207	94	14.20	44.9	33.1	52.3	-	5.8	113.0	41.9	164	18.6	18	11	1.570	6.010	9.2	3	0.35	-	3	20.4	3.46	2	3.630	4.590	65.1	20.0	5.44	0.03	2.15	0.74	0.62	5.58	1.09	0.19	-	5.0		
BH3-06-4-30	332	87	12.40	53.1	38.2	14.2	-	49.0	229.0	47.0	153	17.0	17	16	2.410	7.020	6.7	3	0.24	-	3	17.1	4.76	2	1.600	8.950	67.9	18.7	4.53	0.04	1.82	2.36	0.75	5.07	0.99	0.37	-	5.4		
BH3-06-5-30	183	83	6.76	22.0	14.2	44.1	-	8.6	381.0	29.3	141	16.1	17	3	2.590	2.550	5.6	3	0.14	-	1	15.2	3.53	2	3.900	18.400	61.8	16.2	5.35	0.04	2.31	4.70	0.67	4.52	0.90	0.14	-	7.3		
BH3-07-1-30	173	91	7.59	27.9	44.2	49.2	-	9.0	251.0	35.3	178	18.1	20	4	8.960	7.550	-	3	0.25	-	-	14.9	3.45	2	2.100	11.500	64.9	17.5	4.49	0.03	1.54	2.48	0.73	5.05	0.96	0.23	-	4.7		
BH3-07-2-30	260	111	7.76	37.9	18.1	21.0	-	5.5	212.0	33.5	168	18.7	19	8	2.870	4.590	-	3	0.14	-	1	17.5	3.52	2	2.100	11.700	65.5	18.5	4.31	0.03	1.99	2.72	0.69	5.44	1.04	0.14	-	5.8		
BH3-07-3-30	363	111	9.12	37.8	44.8	48.3	-	9.6	170.0	28.6	177	20.6	21	8	2.610	6.350	6.9	3	0.34	-	2	17.3	3.92	2	5.020	8.280	60.7	22.0	3.69	0.03	1.74	2.29	0.65	5.84	1.08	0.14	-	6.0		
BH3-07-3-40	57	29	3.44	9.6	15.9	32.2	-	23.9	744.0	28.4	55	5.9	6	4	899	3.670	-	1	0.21	-	1	6.5	1.52	1	10.000	69.000	28.3	5.8	3.25	0.14	1.51	30.60	0.15	1.59	0.29	0.06	-	25.4		
BH3-07-4-40	724	99	10.70	68.0	94.3	167.0	-	15.6	177.0	36.7	166	18.4	19	20	2.730	10.800	8.8	3	1.89	0.04	22	16.5	3.10	2	21.300	9.820	62.4	17.7	4.56	0.04	1.76	2.62	0.63	5.00	0.98	0.14	-	7.6		
BH3-07-5-50	856	103	10.40	76.8	98.5	503.0	-	18.9	398.0	37.6	143	16.5	16	24	6.620	12.800	20.4	3	6.82	0.08	26	12.9	3.31	2	23.700	20.500	53.5	16.0	4.27	0.06	1.65	6.51	0.58	4.27	0.92	0.17	-	9.7		
BH3-08-1-60	514	125	9.41	61.0	<9	28.0	-	17.5	331.0	33.5	150	17.8	17	16	37.100	19.200	8.9	3	0.31	0.05	6	14.8	3.36	2	15.700	8.500	59.4	17.8	4.31	0.03	1.54	1.57	0.56	5.14	0.93	0.15	-	6.2		
BH3-08-2-20	909	114	11.80	81.1	122.0	636.0	-	18.5	256.0	35.0	144	16.5	16	23	17.000	15.700	18.5	3	7.98	0.08	28	12.0	3.34	2	15.100	15.600	53.9	16.9	4.19	0.05	1.62	4.16	0.51	4.96	0.91	0.15	-	8.2		
BH3-08-2-60	139	14	2.53	20.5	14.8	29.1	-	6.2	728.0	30.9	23	-	2	17	2.920	3.120	6.0	1	0.35	-	22	2.2	0.45	-	14.000	103.000	9.2	2.1	3.06	0.22	1.91	44.80	0.08	0.66	0.10	0.04	-	38.0		
BH3-08-3-40	222	9	23.70	5.8	25.7	53.6	-	4.8	1.090.0	26.9	225	56.7	6	1	14.300	9.750	-	2	0.34	-	2	12.4	1.85	1	4.200	28.400	48.0	16.9	11.00	0.17	3.08	6.57	3.51	2.50	2.70	0.56	-	8.1		
BH3-08-5-40	622	139	10.90	67.9	97.3	36.9	-	17.9	232.0	37.8	149	18.8	18	19	32.500	21.100	12.4	4	0.40	0.05	9	15.0	4.04	2	8.240	4.600	64.0	18.6	4.74	0.02	1.53	0.86	0.63	5.61	1.00	0.16	-	5.7		
BH4-05-4-20	416	80	17.40	59.8	69.7	42.2	-	19.8	584.0	32.8	182	36.0	14	10	40.300	39.400	16.4	3	0.32	0.06	5	14.9	3.44	2	3.030	15.600	46.8	16.1	6.92	0.06	3.03	4.09	0.62	5.11	1.66	0.30	-	8.9		
BH4-05-4-30	461	121	9.68	44.7	68.3	14.6	-	22.0	172.0	35.9	154	19.6	20	17	40.400	16.400	11.2	3	0.08	0.04	6	15.3	4.35	2	8.420	1.050	60.5	17.1	3.29	0.01	1.36	0.50	0.61	5.81	0.95	0.17	-	4.6		
BV IV-1,3	322	113	10.60	46.6	64.9	107.0	-	18.6	272.0	37.1	174	20.7	19	14	43.300	20.900	14.8	3	0.40	0.03	6	14.8	3.84	-	14.500	5.120	60.2	16.9	5.69	0.02	1.40	0.81	0.65	6.69	0.96	0.14	-	5.0		
BØ IV 2,6	463	113	9.68	59.5	70.4	133.0	-	20.7	389.0	37.1	167	19.1	18	16	36.600	22.800	17.9	3	1.25	0.03	13	15.7	3.23	-	15.600	8.440	60.7	15.6	6.36	0.04	1.70	2.00	0.63	5.99	0.92	0.14	-	6.3		
VD IV-3	639	98	13.30	85.9	109.0	196.0	-	26.9	252.0	49.1	164	18.8	18	18	22.400	31.900	27.7	3	2.73	0.05	20	16.2	4.08	-	35.000	3.670	60.1	16.2	7.36	0.02	1.37	1.24	0.88	5.62	0.87	0.55	-	8.4		
BØ IV-1,3	732	95	11.20	82.0	78.8	176.0	-	26.1	433.0	37.4	157	18.4	17	20	20.600	27.500	26.0	3	2.65	0.04	24	15.4	3.23	-	13.700	18.300	57.7	16.0	7.13	0.06	2.05	3.61	0.71	5.15	0.86	0.16	-	8.3		
BV VI-2,6	280	93	8.21	34.3	62.8	96.1	-	16.8	447.0	35.1	138	17.6	16	10	58.300	23.600	12.5	3	0.23	0.02	-	14.9	3.01	-	16.100	10.300	67.2	16.2	6.44	0.04	1.77	2.28	0.59	5.95	0.88</					

Etasje 3bβ	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Pb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	U	Ba	S	As	Be	Cd	Hg	Mo	Sc	Sn	W	TC	TOC	TIC	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	BaO	L.O.I.
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
BH1-13-5-40	140	91	11.60	42.7	28.6	18.1		4.2	120.0	46.6	182	22.7	22	5	1.160	6.020	12.8	4	0.03	-	-	19.9	4.62	2	2.100	11.600	66.9	21.2	3.84	0.02	1.56	1.86	0.58	6.22	1.23	0.38		4.9	
BH1-14-1-80	145	88	10.60	42.7	39.6	15.8		3.4	131.0	49.3	189	22.3	23	5	1.200	5.940	10.1	4	0.04	-	-	20.3	4.38	2	1.210	5.990	64.4	23.2	4.27	0.02	1.69	2.10	0.51	6.58	1.23	0.42		5.2	
BH1-14-3-50	34	26	1.49	8.8	20.2	10.8		2.6	604.0	20.7	57	6.5	7	1	486	1.600	-	1	-	-	-	6.1	1.25	1	12.000	88.300	16.5	5.5	1.77	0.12	1.04	38.90	0.17	1.59	0.32	0.15		33.6	
BH1-14-4-20	37	27	3.79	16.0	38.2	37.9		18.4	590.0	34.9	64	7.3	8	1	522	4.010	3.7	1	0.11	-	-	6.3	2.12	3	10.000	73.400	27.5	6.4	4.20	0.18	1.96	29.80	0.12	1.81	0.37	0.19		27.0	
BH1-14-5-60	191	90	11.90	44.5	31.3	58.5		5.2	125.0	39.4	162	19.9	18	11	989	7.750	12.4	4	0.21	0.03	1	19.9	4.09	2	6.430	6.230	64.3	21.5	4.77	0.02	1.94	1.60	0.45	5.99	1.14	0.20		5.7	
BH1-15-1-50	343	99	39.40	54.5	116.0	71.9		15.4	418.0	32.6	177	38.0	9	6	1.130	27.900	35.0	2	0.14	-	4	30.7	2.47	1	4.200	28.100	42.9	15.9	12.10	0.14	5.32	6.28	0.16	3.86	2.65	0.35		10.6	
BH1-15-2-40	341	87	16.70	91.1	51.8	401.0		17.0	94.2	52.3	172	19.9	18	26	951	14.000	18.4	4	2.19	0.08	28	19.5	3.98	2	16.200	2.760	61.4	21.1	5.22	0.01	1.88	0.73	0.42	5.49	1.16	0.26		7.5	
BH1-15-5-40	583	83	25.70	148.0	117.0	176.0		57.9	107.0	47.8	150	17.2	16	37	1.030	21.300	31.0	4	1.19	0.10	92	19.0	3.72	2	5.270	3.690	62.2	19.0	7.18	0.02	2.03	0.81	0.50	5.59	0.97	0.20		8.7	
BH1-16-2-40	516	92	19.40	117.0	138.0	430.0		17.7	102.0	51.6	150	16.6	16	29	1.210	15.700	17.5	4	2.76	0.08	59	19.9	3.70	2	29.000	4.400	59.2	19.3	7.32	0.03	2.34	1.03	0.51	5.21	0.97	0.23		8.2	
BH1-16-3-40	168	88	21.90	77.8	113.0	160.0		22.9	94.6	38.2	142	16.6	16	12	1.440	16.400	31.5	3	0.71	0.04	11	18.2	3.84	2	20.200	3.980	62.8	19.3	6.95	0.03	2.33	0.91	0.51	5.21	0.98	0.16		5.8	
BH3-03-1-50	181	10	28.00	10.3	29.6	30.9		3.4	433.0	32.6	349	90.5	9	2	525	9.000	24.8	2	0.19	0.04	4	10.9	2.13	1	5.000	34.800	45.2	16.9	11.40	0.20	3.26	8.20	3.38	2.47	2.46	0.79		11.5	
BH3-03-2-50	328	84	28.00	116.0	176.0	483.0		30.0	147.0	56.1	172	21.4	21	26	834	28.000	23.8	4	2.92	0.07	38	18.9	4.01	2	22.800	3.540	60.6	21.2	8.44	0.01	2.09	0.83	0.38	5.56	1.07	0.25		8.3	
BH3-03-3-50	254	11	31.00	46.3	84.1	163.0		38.4	725.0	30.2	203	53.5	6	3	555	38.700	42.6	1	1.17	0.20	6	13.5	1.92	1	5.700	37.900	37.9	15.8	12.70	0.21	4.91	8.95	2.66	2.59	2.73	0.51		12.0	
BH3-03-4-50	685	102	24.00	136.0	85.9	66.9		78.6	114.0	74.4	157	18.2	17	36	706	20.000	29.6	4	0.53	0.07	72	18.7	3.84	2	23.000	3.530	61.5	20.8	7.36	0.02	2.08	0.79	0.49	5.58	1.02	0.21		8.4	
BH3-03-5-50	570	86	20.80	128.0	93.7	69.5		87.5	121.0	48.7	154	17.8	18	37	712	19.200	24.1	4	0.55	0.06	78	18.2	3.66	2	24.600	4.280	59.8	19.6	7.24	0.03	2.07	0.96	0.54	5.33	1.01	0.22		8.5	
BH3-04-1-50	498	84	26.50	187.0	159.0	174.0		114.0	103.0	42.8	150	17.3	17	43	659	25.000	38.0	4	1.53	0.07	130	17.6	3.55	2	31.800	3.530	57.5	19.9	8.22	0.02	1.97	0.71	0.46	5.38	0.93	0.16		9.3	
BH3-04-2-40	772	86	23.60	134.0	82.4	285.0		38.0	140.0	44.8	149	17.3	16	39	746	18.000	34.4	4	2.50	0.06	85	17.6	3.41	2	33.200	5.560	61.4	18.7	7.11	0.03	1.94	1.18	0.46	5.32	0.97	0.17		9.2	
BH3-04-3-30	170	10	16.40	18.4	51.4	19.4		4.1	491.0	31.0	263	58.7	8	4	422	13.600	2.9	2	0.27	0.13	7	9.4	2.01	1	5.790	19.700	50.4	17.9	8.94	0.14	2.51	5.08	4.35	2.28	2.38	0.57		7.8	
BH3-04-4-60	211	10	24.30	21.6	107.0	418.0		5.6	637.0	37.4	312	86.5	8	3	336	20.700	5.0	2	2.96	0.21	4	11.3	1.91	1	3.500	24.700	45.8	15.8	13.50	0.16	3.42	6.35	3.08	2.07	3.55	0.85		9.2	
BH3-04-5-50	545	90	22.70	154.0	116.0	200.0		65.2	104.0	48.6	162	18.9	17	43	745	19.000	27.7	5	1.92	0.08	116	17.6	3.65	2	28.900	3.350	58.4	20.0	7.30	0.02	1.89	0.59	0.48	5.89	0.99	0.16		8.9	
BH3-05-1-50	1.040	95	17.10	91.8	74.6	322.0		31.9	118.0	56.8	163	19.0	18	32	752	13.900	20.6	4	2.49	0.06	56	18.8	4.09	2	21.500	2.680	59.8	20.2	5.99	0.02	2.09	0.72	0.51	5.43	1.04	0.24		8.1	
BH3-05-2-50	1.090	98	17.80	107.0	140.0	491.0		75.1	114.0	52.0	164	19.0	18	31	789	21.100	28.5	4	3.83	0.08	36	18.8	3.89	2	25.700	3.360	60.3	20.2	6.50	0.02	2.03	0.75	0.47	5.59	1.03	0.26		8.0	
BH3-05-3-50	625	92	31.40	201.0	126.0	225.0		80.9	113.0	51.7	158	17.6	17	41	807	28.800	40.8	4	2.04	0.09	115	19.3	3.96	2	27.500	4.420	61.2	20.8	8.01	0.03	2.17	0.65	0.50	5.41	1.03	0.19		9.2	
BH3-05-4-50	1.130	89	23.90	131.0	112.0	392.0		46.6	108.0	43.4	168	18.4	17	35	876	18.900	21.1	4	3.72	0.10	89	19.7	3.40	2	31.100	4.070	62.1	21.0	7.17	0.02	2.05	0.58	0.52	5.58	1.04	0.18		8.9	
BH3-05-5-50	526	81	29.50	201.0	142.0	204.0		99.0	121.0	42.3	149	16.9	16	41	915	26.900	31.2	4	1.87	0.10	131	18.1	3.35	2	25.300	6.690	55.3	19.0	8.57	0.04	2.17	1.14	0.44	5.31	0.93	0.15		10.2	
BH3-06-1-30	414	88	28.20	177.0	129.0	77.9		119.0	117.0	44.3	145	17.2	16	35	1.060	28.200	47.8	4	0.55	0.08	101	18.1	3.68	2	25.800	5.660	56.9	20.3	8.20	0.03	2.12	0.86	0.51	5.24	0.96	0.16		9.7	
BH3-06-2-30	708	92	24.80	134.0	110.0	348.0		57.2	114.0	48.9	157	17.5	17	30	1.290	19.100	18.3	4	2.65	0.07	75	19.5	3.36	2	28.300	3.150	60.3	19.9	6.96	0.03	2.13	0.73	0.54	5.61	0.99	0.18		7.9	
BH3-09-2-40	1.020	111	10.30	91.1	96.6	213.0		17.3	298.0	41.3	139	16.9	17	28	5.150	12.600	17.2	3	2.87	0.06	16	14.8	3.09	2	9.540	25.000	60.2	16.7	4.74	0.07	1.91	6.15	0.58	4.85	0.94	0.17		10.3	
BH3-09-4-50	713	105	11.60	74.2	83.0	47.9		16.0	182.0	33.6	156	19.0	19	22	2.230	12.000	8.8	3	0.44	0.04	16	15.6	3.43	2	19.600	12.300	65.5	19.3	4.28	0.03	1.54	2.82	0.65	5.07	1.04	0.12		7.8	
BH3-10-1-50	696	109	10.20	55.6	77.2	160.0		16.2	183.0	36.3	165	19.3	19	17	1.950	10.200	3.6	3	1.33	0.03	9	16.4	3.59	2	5.420	9.750	67.0	18.9	4.69	0.03	1.65	2.47	0.74	5.19	1.06	0.16		6.2	
BH3-10-3-40	706	105	11.00	62.8	88.3	154.0		13.4	172.0	36.0	165	19.0	19	20	1.570	9.960	7.3	4	1.43	0.03	17	16.7	3.52	2	7.730	10.400	65.8	18.6	4.85	0.04	1.90	2.45	0.64	5.27	1.03	0.15		7.0	
BH4-02-3-10	841	97	21.20	118.0	103.0	229.0		21.6	83.8	53.2	154	18.0	18	33	1.110	18.200	24.9	4	1.60	0.07	61	17.7	4.06	2	26.200	7.630	63.0	18.6	6.45	0.02	1.94	1.28	0.33	5.11	0.99	0.23		8.4	
BH4-02-4-10	577	94	22.50	116.0	130.0	94.3		32.1	104.0	48.2	133	16.8	16	32	1.090	19.800	22.4	4	0.67	0.07	60	18.0	4.20	2	23.400	11.000	54.0	16.8	5.69	0.03	2.02	1.53	0.39	5.13	0.91	0.17		9.1	
BH4-02-4-20	605	90	27.80	158.0	168.0	142.0		35.0	87.2	48.5	152	17.3	17	38	1.090	25.600	32.6	4	0.97	0.08	90	17.7	3.87	2	24.000	5.590	59.8	18.7	7.38	0.02	1.95	1.31	0.35	5.52	0.95	0.20		9.3	
BH4-03-1-20	810	96	22.50	122.0	124.0	604.0		62.5	69.2	44.0	154	16.9	16	29	1.090	19.000	30.7	4	4.81	0.11	58	17.0	3.81	2	27.200	5.940	61.0</												

Etasje 3c	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Pb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	U	Ba	S	As	Be	Cd	Hg	Mo	Sc	Sn	W	TC	TOC	TIC	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	BaO	L.O.I.
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
BH1-09-2-50	53	26	3.65	14.2	9.0	17.4		32.8	533.0	14.5	62	5.9	6	6	510	2.170	-	1	0.06	-	-		5.3	0.86	1	14.000	96.900	15.2	3.8	1.92	0.30	0.90	41.40	0.20	1.07	0.25	0.15	-	34.7
BH1-09-5-50	40	18	13.40	20.8	10.9	62.1		12.8	705.0	23.1	55	-	7	7	400	6.110	13.9	1	0.14	-	-		4.4	0.79	1	14.000	92.000	13.4	3.5	2.60	0.19	0.93	40.00	0.08	0.94	0.19	1.73	-	33.4
BH1-10-3-50	56	26	5.28	12.5	13.9	40.4		5.4	608.0	30.3	67	5.7	6	7	384	2.000	6.6	1	0.10	-	-		5.8	1.26	1	10.000	61.500	18.7	5.7	2.60	0.16	1.06	36.60	0.17	1.33	0.32	0.25	-	31.6
BH1-10-5-30	215	82	7.81	32.8	30.4	28.1		14.3	143.0	29.0	219	20.2	20	7	945	2.140	5.4	3	-	-	-		18.3	3.76	3	4.380	7.000	64.5	18.8	4.33	0.02	1.75	2.83	0.72	4.86	1.12	0.18	-	5.4
BH1-11-2-50	250	93	9.74	35.4	34.7	33.0		10.0	109.0	29.5	214	21.7	21	7	1.030	2.060	10.3	4	0.04	-	-		18.2	3.85	3	9.940	4.010	60.4	21.7	4.91	0.02	1.89	1.70	0.68	5.62	1.16	0.19	-	4.7
BH1-11-5-50	56	29	3.45	13.6	12.7	10.5		4.1	546.0	23.8	85	7.2	7	1	414	1.750	3.3	1	-	-	-		6.7	1.60	1	11.000	79.000	24.8	6.7	2.46	0.18	1.20	33.20	0.26	1.60	0.36	0.08	-	28.2
BH1-12-4-50	28	13	3.49	8.1	15.5	14.4		3.8	584.0	19.3	41	-	5	1	285	2.210	4.5	1	0.03	-	-		4.0	1.19	3	12.000	85.200	12.3	3.8	1.75	0.20	0.92	40.00	0.13	0.94	0.20	0.09	-	35.3
BH1-13-1-40	51	25	5.04	14.5	12.9	26.5		12.0	471.0	21.0	68	6.2	6	2	421	6.340	12.2	1	0.08	-	-		7.5	1.25	1	12.000	85.200	20.1	6.0	2.59	0.21	1.07	37.00	0.25	1.50	0.32	0.07	-	29.5
BH1-13-4-20	23	15	3.10	5.5	13.5	7.9		4.1	670.0	20.9	35	-	5	1	294	1.950	4.2	1	-	-	-		4.0	1.10	0	14.000	99.200	9.8	3.7	1.45	0.12	0.89	45.80	0.10	0.93	0.17	0.19	-	36.6
BH3-01-1-50	171	125	18.50	62.2	38.9	49.1		6.5	173.0	22.9	183	14.2	13	4	1.560	1.780	4.2	3	0.10	-	1		19.5	2.72	2	2.100	13.000	57.5	17.6	7.64	0.07	2.20	4.91	0.92	3.99	0.90	0.10	-	7.2
BH3-01-2-50	96	82	13.60	36.1	14.4	37.9		7.2	421.0	22.8	136	10.5	10	4	1.320	2.360	6.6	2	0.05	-	-		12.6	1.67	2	8.000	53.600	40.8	11.2	4.00	0.23	1.46	21.10	0.64	2.63	0.63	0.09	-	19.1
BH3-01-3-50	32	16	4.40	7.5	8.7	72.8		23.9	559.0	15.1	52	-	4	5	473	2.090	-	1	0.17	-	-		3.7	0.60	1	14.000	99.800	11.5	3.0	1.70	0.32	0.80	44.10	0.17	0.74	0.14	0.18	-	35.6
BH3-01-4-50	25	13	5.32	8.3	3.2	31.0		6.6	694.0	14.8	51	-	5	5	437	1.480	4.1	1	0.09	-	-		3.4	0.51	0	10.000	71.900	11.4	2.7	2.48	0.19	0.98	44.30	0.09	0.72	0.14	0.55	-	35.8
BH3-01-5-50	64	27	11.70	14.9	16.1	10.9		6.2	607.0	22.7	86	6.4	9	9	556	5.560	4.5	1	0.05	-	1		5.4	1.05	1	12.000	86.000	17.4	4.9	4.56	0.19	1.12	38.10	0.06	1.27	0.27	1.28	-	29.4
BH3-02-1-50	162	81	9.75	30.2	28.3	32.2		7.2	258.0	34.0	207	18.1	17	7	966	2.160	4.0	3	0.14	-	1		14.7	2.90	2	3.500	20.700	60.0	16.8	3.98	0.05	1.39	7.33	0.62	4.56	0.96	0.27	-	9.3
BH3-02-2-50	155	79	7.87	31.2	12.5	18.8		4.1	237.0	23.2	172	17.9	16	5	927	1.720	-	3	0.11	-	1		13.9	2.89	2	4.200	29.900	55.8	16.7	4.53	0.07	1.62	11.00	0.52	4.36	0.93	0.12	-	11.7
BH3-02-3-50	25	17	1.92	5.3	8.3	7.0		3.7	595.0	16.9	40	-	4	1	317	877	-	1	0.06	-	-		3.9	0.77	0	14.000	97.300	12.2	3.3	1.59	0.16	0.88	43.80	0.12	0.93	0.17	0.07	-	36.6
BH3-02-4-50	49	38	5.96	11.9	9.3	19.4		3.4	403.0	34.3	82	9.3	8	2	527	2.180	3.7	1	0.07	-	-		7.7	1.70	1	10.000	70.200	30.4	8.0	3.47	0.12	1.53	29.80	0.23	2.20	0.45	0.14	-	26.0
BH3-02-5-50	48	35	12.40	18.1	32.0	267.0		9.7	424.0	28.3	76	8.4	7	2	587	2.260	12.0	1	1.23	-	-		9.0	1.49	1	9.000	62.900	39.1	7.4	6.96	0.16	2.77	20.70	0.21	2.03	0.41	0.13	-	22.0
BH4-01-1-70	18	11	3.46	6.4	6.2	22.5		11.3	480.0	12.5	32	-	4	1	331	3.870	3.8	1	0.11	-	1		3.1	0.40	1	12.000	86.000	6.8	2.0	1.31	0.22	0.80	46.70	0.09	0.58	0.09	0.07	-	37.9
BH4-01-2-75	23	12	4.40	6.1	4.2	12.2		5.4	495.0	15.6	28	-	5	5	299	5.120	1.3	1	-	-	1		2.7	0.39	0	12.000	84.900	7.1	1.6	2.36	0.18	0.63	48.50	<0.05	0.53	0.07	0.48	-	37.3
BH4-01-3-80	36	26	10.30	14.3	7.0	56.4		6.1	524.0	17.9	71	5.7	8	6	465	2.480	10.5	1	0.12	-	-		5.7	1.04	1	11.000	76.000	18.4	4.7	2.75	0.16	1.19	38.60	0.09	1.49	0.28	0.74	-	31.2
BH4-01-4-85	111	54	6.65	21.1	22.1	50.0		25.2	345.0	26.4	125	11.2	11	7	730	2.390	2.6	2	0.14	-	1		9.6	1.99	1	7.000	44.900	37.6	9.4	3.13	0.10	1.60	21.50	0.33	2.85	0.58	0.19	-	19.9
BH4-01-5-90	60	33	3.45	13.6	5.6	9.0		3.8	385.0	20.7	85	8.6	9	2	635	969	2.8	1	0.03	-	-		6.6	1.53	1	9.000	67.100	25.0	6.7	2.03	0.14	1.27	32.30	0.25	2.07	0.43	0.09	-	28.1
BH4-02-1-10	21	16	2.93	5.9	8.5	12.0		4.4	568.0	23.5	34	-	5	0	340	1.060	5.1	1	0.05	-	-		3.9	0.69	0	11.000	80.100	10.9	3.0	1.37	0.12	1.15	45.10	0.08	0.95	0.15	0.19	-	37.0

Etasje 4a	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Pb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	U	Ba	S	As	Be	Cd	Hg	Mo	Sc	Sn	W	TC	TOC	TIC	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	BaO	L.O.I.	
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
ANK25	86	86	13	53	42	98	86	11	411	38	76	4	4	8	187	1.637	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79.060	3.193	75.867	22.46	6.27	2.56	0.15	1.21	35.13	0.36	1.36	0.25	0.12	0.02	29.08
ANK26	197	195	22	101	53	88	148	7	272	32	152	12	11	6	447	1.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.140	4.579	19.561	48.31	15.68	6.75	0.10	3.33	8.64	0.70	3.50	0.70	0.17	0.05	11.08
ANK27	201	211	22	100	74	77	160	8	214	27	166	13	13	7	436	676	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.150	3.015	11.135	52.00	17.47	7.06	0.06	3.48	5.24	0.87	3.88	0.80	0.23	0.05	8.44
ANK28	211	219	27	113	61	69	168	10	268	25	164	13	11	9	652	453	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.450	3.382	14.068	47.95	17.80	7.80	0.08	3.54	6.56	0.71	3.97	0.77	0.18	0.07	9.78
ANK29	231	257	22	120	77	72	161	6	254	22	172	13	11	8	430	135	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.990	2.532	12.458	48.69	17.96	8.28	0.08	3.69	6.06	0.80	3.81	0.79	0.13	0.05	9.43
ANK30	238	270	25	133	56	77	176	10	196	23	180	14	10	7	549	875	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.660	2.837	8.823	47.22	19.64	9.35	0.07	4.20	4.38	0.75	4.23	0.85	0.25	0.06	8.27
ANK31	185	239	24	123	79	77	123	5	359	32	136	10	7	6	337	664	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34.380	1.922	32.458	38.45	13.82	8.03	0.17	3.47	15.28	0.62	2.64	0.59	0.31	0.04	15.53
ANK32	187	246	39	131	44	70	160	41	258	24	153	12	8	8	371	7.563	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.310	5.342	10.968	50.26	17.39	8.02	0.07	3.54	5.16	0.78	3.97	0.73	0.08	0.04	8.21
ANK33	201	262	26	130	57	71	162	13	317	24	155	13	11	8	365	2.373	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.720	3.839	14.881	48.73	16.88	7.28	0.09	3.74	6.99	0.79	3.75	0.71	0.13	0.04	9.70
ANK34	196	253	28	119	68	93	158	16	272	24	162	14	10	7	357	2.845	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.850	4.077	11.773	51.16	16.90	7.41	0.08	3.72	5.52	0.81	3.76	0.73	0.08	0.04	8.57
ANK37	203	253	28	126	52	79	149	8	295	27	164	12	9	6	384	1.375	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.820	5.927	10.893	50.92	16.30	7.51	0.09	3.66	6.50	0.80	3.47	0.72	0.16	0.04	9.18
ANK38	219	226	23	111	53	65	164	9	319	30	158	13	9	7	421	537	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.860	4.056	14.804	47.66	17.69	7.56	0.08	3.70	7.23	0.76	3.90	0.75	0.30	0.05	9.86
ANK39	193	209	36	116	51	68	159	17	310	29	155	13	9	10	418	3.800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23.910	5.470	18.440	45.44	16.91	7.70	0.09	3.58	8.84	0.71	3.77	0.73	0.18	0.05	10.59
ANK40	195	266	28	155	32	71	170	36	89	26	191	16	10	6	413	10.599	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.392	4.252	4.140	56.54	17.45	7.36	0.04	3.74	1.46	0.89	4.18	0.79	0.07	0.05	5.86
ANK41	191	314	28	167	42	86	170	15	90	26	183	14	10	9	501	9.385	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.115	5.830	2.285	55.86	17.64	7.52	0.05	4.24	1.35	0.82	4.08	0.79	0.08	0.06	6.23
ANK42	180	329	34	172	44	90	155	13	167	27	192	14	11	6	404	10.256	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.920	3.503	9.417	53.50	16.36	7.55	0.09	4.30	3.70	0.95	3.64	0.75	0.07	0.05	7.04
ANK43	190	399	28	175	43	80	151	14	149	28	202	14	9	6	367	7.421	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.030	5.522	6.158	55.87	16.60	7.10	0.07	4.46	2.94	1.06	3.53	0.77	0.08	0.04	6.36
ANK44	191	337	27	151	41	106	159	13	148	29	199	15	12	6	423	6.869	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.705	3.279	6.426	54.49	16.80	7.39	0.08	4.28	2.92	1.00	3.74	0.79	0.07	0.05	6.79
ANK45	187	337	29	157	39	74	156	15	194	27	184	13	10	8	415	4.209	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.660	3.715	7.945	53.35	16.76	7.63	0.08	4.20	3.79	0.95	3.60	0.77	0.09	0.05	7.14
ANK47	186	329	33	157	46	109	156	31	207	30	191	13	11	7	478	8.634	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.220	4.712	8.508	53.02	16.19	7.53	0.09	4.01	4.13	0.96	3.63	0.74	0.07	0.05	6.94
ANK46	191	427	27	149	47	90	148	16	155	29	214	14	10	7	337	5.218	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.505	3.807	5.698	57.39	16.18	6.77	0.07	4.01	2.94	1.17	3.49	0.79	0.09	0.04	6.21
ANK48	195	355	32	171	43	93	160	26	105	31	203	15	10	9	439	9.394	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.080	6.365	4.715	56.33	16.79	7.33	0.07	4.02	2.11	1.00	3.83	0.79	0.07	0.05	6.35
ANK49	229	295	34	209	46	150	163	61	151	25	183	14	12	8	704	14.918	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.600	11.030	5.570	54.12	16.72	7.95	0.06	3.90	2.69	0.81	3.87	0.75	0.07	0.08	7.32
ANK50	187	368	36	181	43	95	155	36	180	27	194	14	11	7	371	11.955	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.680	5.522	6.158	55.04	16.21	7.71	0.07	3.84	3.11	0.97	3.65	0.75	0.08	0.04	5.95
ANK51	205	414	27	140	53	70	152	14	191	25	204	13	11	6	436	2.936	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.930	3.861	8.069	55.14	16.24	6.46	0.08	3.86	3.95	1.08	3.57	0.77	0.07	0.05	7.28
ANK53	220	386	30	159	45	73	153	12	252	27	191	15	11	8	391	2.768	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.720	3.490	12.230	50.92	16.53	7.46	0.10	4.34	5.46	0.93	3.48	0.75	0.06	0.04	8.49
ANK54	186	328	33	155	41	69	159	13	170	25	187	14	10	8	381	5.304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.940	3.938	7.002	54.15	16.96	7.70	0.07	4.12	3.22	0.99	3.71	0.78	0.07	0.04	6.93
ANK55	196	338	34	152	45	70	161	24	159	26	172	13	11	7	358	6.620	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.566	4.031	5.535	54.10	17.43	7.82	0.06	4.08	2.69	0.96	3.89	0.78	0.07	0.04	6.81
ANK56	205	292	25	137	52	74	171	9	189	27	181	14	11	9	437	2.160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.920	3.545	7.375	52.98	17.73	7.14	0.07	4.13	3.41	0.85	4.07	0.78	0.08	0.05	7.45
ANK57	191	260	29	132	54	88	171	19	206	25	181	14	10	4	582	4.317	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.000	4.481	9.519	53.34	17.31	6.70	0.08	3.69	4.30	0.86	4.06	0.77	0.07	0.06	7.73
ANK58	197	251	24	126	56	103	162	13	311	26	162	12	10	5	385	2.335	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.350	3.458	13.892	50.04	16.60	7.13	0.09	3.79	6.44	0.81	3.74	0.71	0.08	0.04	9.32
ANK59	188	258	25	133	52	69	152	15	373	47	153	12	10	8	426	1.772	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.480	3.126	17.354	47.38	15.72	7.32	0.11	3.86	8.98	0.74	3.40	0.67	0.75	0.05	10.39
ANK60	207	274	38	142	46	68	175	17	242	21	155	13	11	9	396	4.399	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.610	4.894	10.716	48.38	18.17	8.09	0.07	4.04	5.05	0.70	4.17	0.76	0.09	0.04	8.83
ANK61	195	216	28	124	40	55	145	35	373	30	140	11	8	10	439	5.829	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.850	6.294	23.556	47.23	13.69	6.41	0.12	2.91	11.24	0.54	3.15	0.58	0.29	0.05	11.83
ANK62	266	221	48	184	42	70	179	73	114	21	164	14	9	11	448	12.372	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.960	14.080	3.880	51.57	18.72	8.93	0.04	3.69	1.73	0.68	4.45	0.78	0.12	0.05	8.08
ANK65	193	246	38	135	40	79	163	30	198	23	160	13	9	8	570	6.467	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.050	6.334	7.716	53.26	17.22	7.64	0.06	3.41	3.83	0.90	3.96	0.74	0.11	0.06	7.24
ANK66	234	289	32	149	69	97	176	9	155	24	176	15	12	6	522	1.384	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.685	4.118	4.567	49.29	19.92	9.50	0.05	4.36	2.55	0.80	4.33	0.85	0.24	0.06	7.22
ANK68	220	237	28																																					

Vedlegg D

FAGLIG FORDYNING

Innhold

Vedlegg D – Faglig fordypning: Svartskifer	2
D1.1 Sur avrenning	2
D1.2 Syredannende potensial (AP)	2
D1.3 Nøytraliserende potensial (NP)	5
D1.4 Utlekking av tungmetaller	5
D1.5 Forvitring og etsing av betong og stål	6
D1.6 Svelling og setningsskader i konstruksjoner og fundamenter	7
D1.7 Tolkning av forholdet mellom Fe og S	8
D1.8 Radioaktivitet i berggrunn	10

Vedlegg D – Faglig fordypning: Svartskifer

Svarte leirskifre er dannet av sedimenter avsatt under oksygenfattige forhold. De kan ha et høyt innhold av sulfider og inneholde mye uran (U) (Owen m. fl., 1990, Pabst m. fl., 2017). Utbredelsen er hovedsakelig i Oslofeltet, fra Porsgrunn/Skien i sør til Hamar og Lillehammer i nord (NGI, 2015a; Statens strålevern, 2011). Alunskifer er en type svart leirskifer, dannet i sen kambrium og tidlig ordovicium (ca. 500 millioner år siden), som inneholder høyere konsentrasjoner av tungmetaller, organisk materiale, sulfider og uran enn andre typer svarte leirskifre. Alunskifer er bare en av flere etasjer i den kambrosiluriske lagrekken. Denne lagrekken er beskrevet av Owen m. fl. (1990), og en modifisert versjon finnes i tabell 2 i hovedrapporten.

Flere av lagene i den kambrosiluriske lagrekken kan være syredannende. Syredannende bergarter har visse kjennetegn og egenskaper som skiller dem fra andre bergarter. Det er først og fremst knyttet til mineralinnholdet og fordelingen av sulfider, fordi dette styrer det syredannende potensialet. Andre faktorer av stor betydning er hvorvidt bergarten har en tendens til flakdannelse, og den geologiske historien til bergarten (NGI, 1957; Schovsbo, 2002).

I dette vedlegget beskrives den faglige bakgrunnen for syredannelsesprosessen og andre relevante temaer om svartskifer i noe mer detalj. For ytterligere informasjon, se for eksempel referanser/leseliste i hoveddelen av rapporten.

D1.1 Sur avrenning

Dersom en frisk flate av en sulfidrik bergart blottlegges eller eksponeres for luft og vann, starter kjemiske forvittringsprosesser. Dette gjelder særlig mørke skiferbergarter. Etter relativ kort tid dannes syre, med sur avrenning som resultat. Sulfidmineralene i bergarten omdannes til svovelsyre og andre sulfatforbindelser og mineraler. Det er disse syredannende reaksjonene som er opphav til de fleste uønskede egenskapene for slike bergarter. Sige vann og avrenning fra denne berggrunnen kan bli svært sur. Dersom pH synker til under fire, vil forvitringen øke ytterligere. Det har ofte svært uheldige effekter på dyrelivet i de vassdrag som berøres av avrenningen.

Internasjonalt er sur avrenning (acid rock drainage, ARD) et stort miljøproblem, ofte i forbindelse med gruvedrift (acid mine drainage, AMD).

D1.2 Syredannende potensial (AP)

Det syredannende potensialet (acidification potential, AP) til en bergart styres i stor grad av innholdet av sulfidmineraler. Jern (Fe) og svovel (S) er de to viktigste grunnstoffene i sulfidmineralene, som forekommer blant annet som mineralene pyritt (FeS_2 , svovelkis) og pyrrhotitt (FeS , magnetkis). Ved tilførsel av oksygen til disse mineralene starter en oksidasjon og ved tilførsel av vann starter syredannelsen. Sulfid oksideres til sulfat, og tungmetallene som var bundet i sulfidene kan frigjøres eller danne nye forbindelser (f. eks. sulfater).

Endringer i grunnvannsstand, forårsaket av for eksempel byggearbeider eller drenering, kan gjøre at syredannelse i berggrunnen starter. Når vannivået endres, kan luft (oksygen) komme til. Dersom vann i kontakt med syredannende bergart skiftes ut raskere, vil oksygenrikt vann strømme til og steingrunnen kan oksideres.

Det er omfanget av syredannelse som bestemmer hvor mye og raskt en bergart lekker ut til omgivelsene, og som avgjør om en bergart betraktes som potensielt forurensende eller ikke. For bergarter som utvikler syre ved forvitring, vil syren akselerere forvitringen og dermed øke forurensningspotensialet. Dette skyldes i hovedsak at tungmetallene følger jern bundet i sulfidmineralene og kan frigjøres i vannløselig form ved forvitring av mineralene. Dette illustreres ved oksidasjon av pyritt:

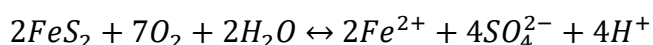
Oksidasjon av pyritt

Det syredannende potensialet i leirskifer skyldes i hovedsak pyritt (FeS_2). Oksidasjonen av pyritt skjer normalt enten direkte med oksygen eller indirekte oksidasjon ved treverdige jern (skrives som Fe(III) eller Fe^{3+}), se faktaboks.

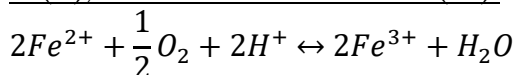
Så lenge pH er over ca. 3,5, skjer oksideringen av pyritt med oksygen, men dersom pH synker under 3,5 vil Fe(III) styrke oksidasjonen. Dette fører til raskere reaksjoner som akselerer syredannelsen, og kan resultere i en svært lav pH. I reaksjonen dannes Fe(II) som oksideres til Fe(III) . Oksidasjon av Fe(II) ved O_2 går sakte ved lav pH og vil være styrende for hastigheten til pyrittoksidasjonen. Oksidasjonsprosessen kan katalyseres av bakterier noe som resulterer i signifikant hurtigere pyrittoksidasjon (Appelo & Postma, 2005).

Oksidasjon av pyritt

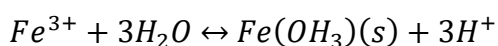
Direkte oksidasjon med oksygen:



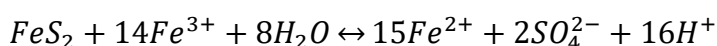
Fe(II) , kan oksideres videre til Fe(III) :



Ved nøytral pH felles Fe(III) ut som hydroksider:



Indirekte oksidasjon med treverdige jern, Fe(III) :



(Chandra og Gerson, 2010; Singer og Stumm, 1970)

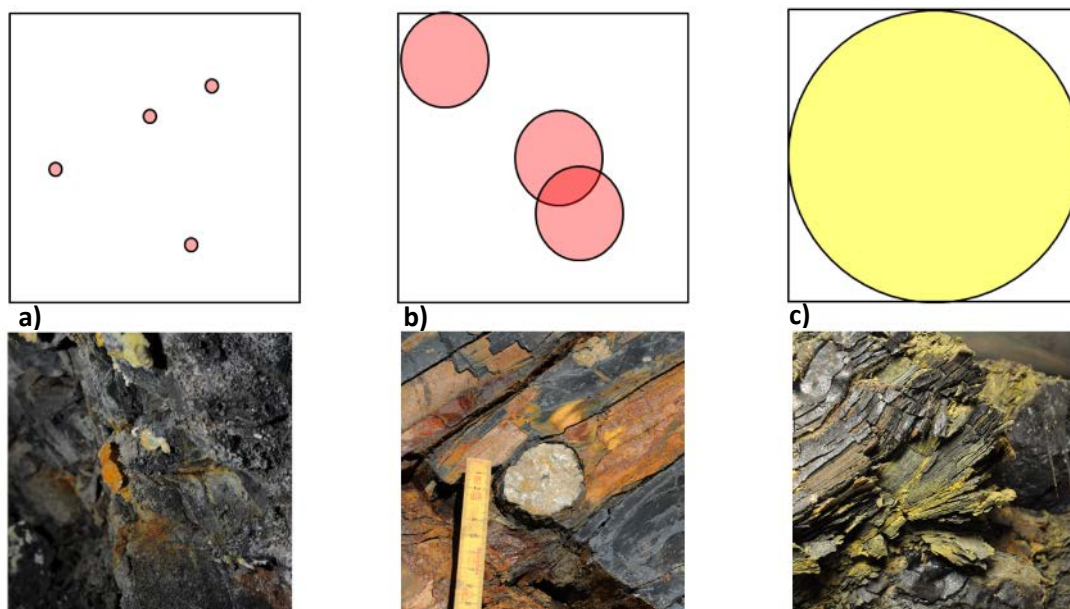
D1.2.1 Flakdannelse

En skiferbergart er en lagdelt bergart med en parallell eller skifrig struktur. Lagdelingen er oppstått som følge av at det under dannelse av sedimentet skjedde variasjoner i dannelsesmiljøet, for eksempel som et resultat av sykliske episoder. Denne egenskapen er forskjellig for de ulike leirskifrene og har stor betydning for det syredannende potensialet. Dersom bergarten sprekker lett opp, kan det fort bli mye små partikler. Da øker kontaktarealet mellom sulfidmineraler i skiferen og fuktighet og oksygen i omgivelsene. Forvittringshastigheten vil øke som følge av økt kontaktflate.

D1.2.2 Fordeling av sulfider i bergarten

Form, størrelse og fordeling av sulfidmineraler påvirker også de syredannende egenskapene og forvittringshastigheten. Små mineralkorn har større kontaktareal, noe som øker reaktiviteten. Dermed er mindre mineralkorn generelt mindre stabile enn større mineralkorn. Dersom flere mineralkorn er samlet i mineralaggregater, vil kontaktflaten med vann og luft være langt mindre.

En leirskifers syredannende egenskaper vil, i tillegg til konsentrasjonen av sulfidmineraler, kornform og størrelse på mineralkorn, avhenge av hvordan skiferen forvittr og særlig om forvitringen øker kontaktarealet mellom sulfider og oksygen, se Figur 1.



Figur 1 Kontaktareal styrer omfang av sulfidoksidasjon og pH-reduserende kapasitet: a) sulfidforvitring i svart leirskifer som Elnes. b) Galgebergledet i Tøyenformasjonen og c) Alunskiferformasjonen. Rød farge på utfelling indikerer $pH > 5$, mens gul farge indikerer $pH < 4$.

D1.3 Nøytraliserende potensial (NP)

Dersom bergarten har et stort potensial for å nøytralisere syre, kan produsert syre nøytraliseres før det dannes sur avrenning, og det blir heller ikke økt forvitring av steinmaterialet som følge av lav pH.

Nøytraliseringspotensialet (NP) kommer i stor grad fra karbonater som kalsitt (CaCO_3). Forholdet mellom NP og syredannende potensial (AP) er avgjørende for de resulterende egenskapene til bergarten:

$$\frac{\text{Nøytraliserende potensial (NP)}}{\text{Syredannende potensial (AP)}}$$

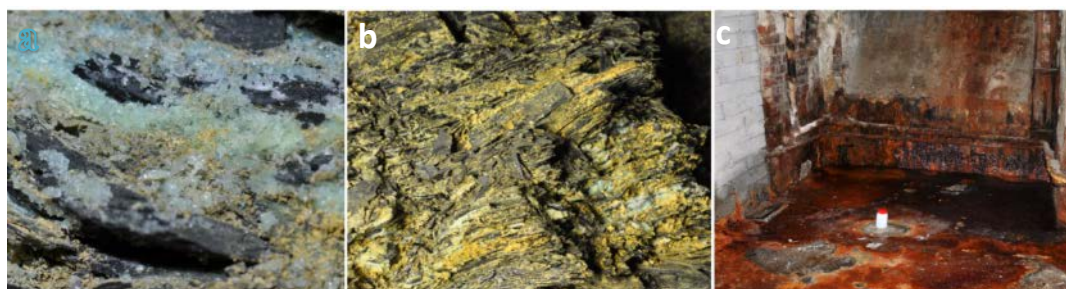
Karbonater forvitres lettere enn pyritt, og resultatet kan være at deler av karbonatene vaskes ut av steinmasser uten å bidra til syrenøytralisering. Derfor bør nøytraliseringspotensialet være betydelig høyere enn syredannelsespotensialet for at en skal anta at steinmasser ikke er syredannende.

D1.4 Utlekking av tungmetaller

Sulfidene er en egen gruppe mineraler og er ofte en forbindelse mellom svovel og et metall som jern, bly eller sink. Utlekking av tungmetaller skyldes i stor grad forvitring av sulfidmineraler, fordi metallene i stor grad er knyttet til sulfider. Når sulfidmineralene omdannes til sulfater, blir de lettere løselige i vann, og relativt store mengder tungmetaller kan frigis ved kontakt med vann. Den sterke syren som produseres kan tære på mineralene og føre til at enda mer metaller frigjøres. Sigevann fra syredannende skiferbergarter kan derfor ha høye konsentrasjoner av tungmetaller, deriblant uran, som kan lekke ut til miljøet og vannforekomster.

Mange tungmetaller er mer løselige i surt vann. Dersom pH er høyere enn 4, vil metallene også kunne bindes til jernhydroksider som felles ut i en forvitningsprosess (Appelo og Postma, 2010; Braunschweig m. fl., 2013). Disse jernhydroksidene er ikke vannløselige i nøytralt eller svakt surt vann. Høyere pH vil derfor gi mindre utlekking av tungmetaller. Hvis pH synker vil jernhydroksidene være løselige og tungmetallene frigis. Metaller som er mobile ved nøytrale pH-forhold, som As, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, Sb, U og Zn, vil kunne lekke ut fra de forvitrede sulfidene også ved nøytral pH.

Ved lave pH verdier kan vannet ha høye konsentrasjoner av jern selv om det ser rent ut. Når vannet kommer i kontakt med materiale med høyere pH (som f. eks. et betonggulv) kan jern felle ut og gi en sterk rødbrun farge. Det samme kan skje dersom vann forflytter seg fra et område med lite oksygen til et område med mye oksygen.



Figur 2 Surhetsgraden (pH) er den viktigste enkeltfaktoren for utvikling av forvitring og forurensningspotensial i masser og mineraldannelse: a) grønn-blå Fe^{2+} sulfatmineral, b) gul Fe^{3+} sulfatmineral, c) rødt jernhydroksidmineral.

D1.5 Forvitring og etsing av betong og stål

Syren som dannes virker også aggressivt på mange bygningsmaterialer som stål og betong. Dette kan medføre sprekkdannelse og avskalling i betong og gi kortere levetid på konstruksjoner og byggverk. For å redusere denne effekten, kan det i noen tilfeller være aktuelt å bruke sulfatresistent sement i betongen.



Figur 3 Innlekkasje av svært surt vann (pH < 3) i et kjellerrom. Kontakt med vannet kan medføre fare for etseskader på huden og på fottøyet

D1.6 Svelling og setningsskader i konstruksjoner og fundamenter

Sulfatmineraler er større enn sulfidmineraler. Dannelse av sulfater fører derfor til en volumutvidelse. Denne volumutvidelsen kan medføre at det dannes et svelletrykk på flere hundre tonn per kvadratmeter, men man kan også oppleve at svelling ikke skjer selv om betingelsene er til stede. Det er vanskelig å forutsi hvorvidt svartskiferen i et område vil forårsake problemer med svelling, og hvor stort svelletrykket vil bli. Problemer med svelling er kjent for flere etasjer i den kambro-siluriske lagrekken. Svelling kan også oppstå på grunn av leirmineraler i leirskiferen som kan svelle når de kommer i kontakt med vann, så bergarten trenger ikke være syredannende for å forårsake svelling. Skader på fundamenter og andre bygningskonstruksjoner som følge av svelling av leirskifer er veldokumentert gjennom flere rehabiliteringsprosjekter (figur 4). Typiske skader er heving av kjellergulv, dører og vinduer som ikke lar seg åpne, sprekkdannelse i gulv, vegger og tak, og knusing av infrastruktur i grunnen, særlig vann- og avløpsledninger. Setninger kan oppstå når den mekaniske stabiliteten til byggegrunn av leirskifer reduseres på grunn av forvittringsreaksjoner som fører til oppsprekking/oppflising av bergarten. For å utvikle disse svelle- og setningsskadene, kan det i flere tilfeller være tilstrekkelig at det blir tilført økt fuktighet.

Fluktuerende vannstand (gjentagende tørking og fukting) er viktig å unngå ettersom det øker sannsynligheten for og hastigheten av svelling.



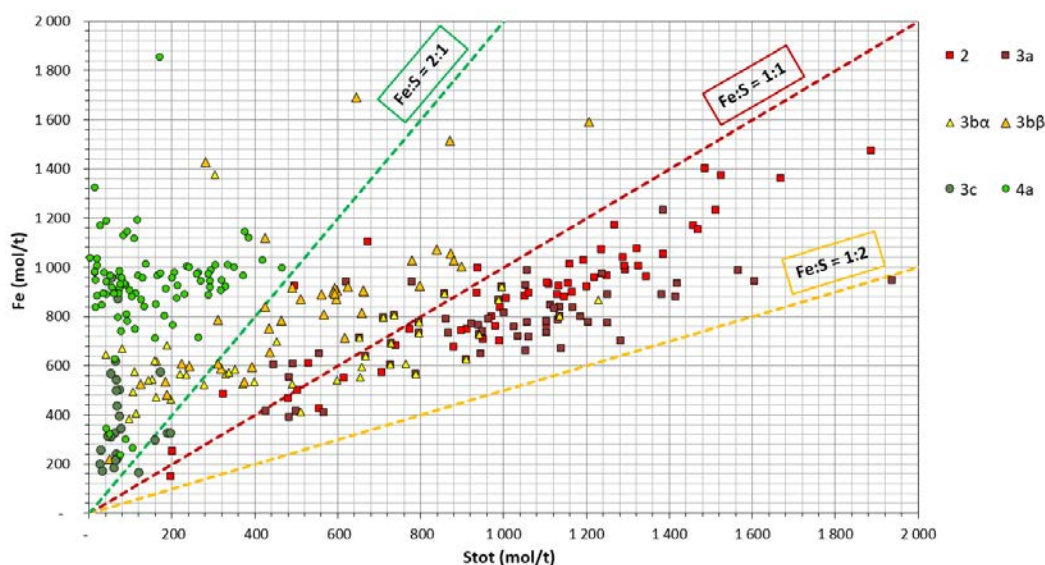
Figur 4 Eksempel på skader på bygningskonstruksjoner som følge av forvitring av alunskifer. Veggen presses ut pga. svelletrykk fra forvitrende alunskifer (røde piler). Veggen er fundamentert direkte på alunskifer og står i fare for å rase ut pga. setninger.

D1.7 Tolkning av forholdet mellom Fe og S

Forholdet mellom jern (Fe) og svovel (S) indikerer om innholdet av sporstoffer (tungmetaller) kan knyttes til sulfider og/eller silikater. Et overskudd av jern i forhold til svovel kan indikere at en del av tungmetallene i prøven er bundet i silikater eller oksider. Tungmetaller bundet i andre mineraler enn sulfider vil ikke like lett frigjøres når sulfidene oksideres. Ved lav pH (< 4) vil imidlertid også silikatene gå sakte i oppløsning og øke frigjøring av tungmetaller til omgivelsene (Vriens m. fl., 2019). Vær oppmerksom på at enkelte sporstoffer (As, Cd, Co, Cr, Mo, Ni, Sb, U og Zn) kan frigjøres ved nøytrale pH-forhold, også kalt NRD (neutral rock drainage).

Figur 5 viser forholdet mellom Fe og total S (S_{tot}) for referanseprøver fra ulike etasjer i leirskiferrekken fra Oslofeltet. Forholdet mellom Fe og S kan gi følgende informasjon:

- **Fe:S > 2:1** indikerer at deler av Fe og tungmetallene også er bundet i silikater og oksider.
- **Fe:S = 1:1** indikerer at alt Fe er bundet som sulfider i pyritt eller pyrrhotitt.
- **Fe:S = 1:2** indikerer pyritt.
- **Fe:S < 1:2** indikerer at S også er bundet i andre mineraler enn sulfider, eller i organisk materiale.



Figur 5 Forholdet mellom Fe og S. Denne figuren indikerer i hvilke grupper av mineraler, jern og svovel er bundet. Plasseringen av referanseprøver fra Alunskiferformasjonen (2 og 3a), Hagabergformasjonen (3bα), Galgebergledet (3bβ), Hukformasjonen (3c) og Elnesformasjonen (4a) er også vist. Fargene på referanseprøvene indikerer sannsynligheten for at etasjen er syredannende i AP:NP-diagrammet i figur 8 (rødt=syredannende, gul=usikker, grønn=ikke syredannende).

Hovedmengden av alunskifer (etasjer 2 og 3a) plasseres i feltet mellom $\text{Fe:S} = 1:1$ og $\text{Fe:S} = 1:2$. Dette tyder på at sulfider i en svart leirskifer kan forekomme som både pyritt og pyrrhotitt. I prøver fra Alunskiferformasjonen kan det også forekomme at analysene viser en høy andel av svovel i forhold til jern. Om svovelinnholdet er høyere enn jern, er svovel sannsynligvis i tillegg til sulfider bundet enten i sulfater, eller som organisk svovel i organisk materiale.

Dersom forholdet mellom Fe:S er mindre enn 1:1 vil massene antas å ha et syredannende potensial. Er dette forholdet større en 1:1 er det fortsatt knyttet en usikkerhet til hvorvidt bergarten er syredannende eller ikke, og videre vurdering kan være nødvendig.

D1.7.1 Beregne mol/t Fe og S

I dette kapitlet vises et eksempel på beregning av mol/t Fe og S fra analysedata. Tabell 1 gir nødvendig bakgrunnsdata for beregningene.

Tabell 1 Bakgrunnsdata for beregningene

Parameter	Molvekt (g/mol)	Analyseresultat (%)
Fe	55,85	
O	15,999	
S	32,06	3,2
Fe_2O_3	159,7	5,1

For S er analyseresultatet oppgitt i %, og vi regner først om til g S per tonn. 1 % tilsvarer 10 000 mg/kg:

$$S = 3,2 \% = 32000 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} = 32000 \frac{\text{g}}{\text{tonn}}$$

Deretter beregner vi mol S per tonn ved å bruke molvekten til S:

$$S = \frac{32000 \frac{\text{g}}{\text{tonn}}}{32,06 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 998,1 \frac{\text{mol}}{\text{tonn}}$$

For Fe blir det litt flere steg ettersom analyseresultatet er oppgitt i som % Fe_2O_3 . Først beregnes molvekten til Fe_2O_3 :

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = (55,85 \times 2) + (15,99 \times 3) = 159,7 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Andel Fe i Fe_2O_3 er forholdet mellom vekten av Fe og O:

$$Fe(Fe_2O_3) = \frac{(55,85 \times 2) \frac{g}{mol}}{(15,99 \times 3) \frac{g}{mol}} = 0,699 (= 69,9 \%)$$

Hvor mye Fe det er i prøven finner en av produktet mellom mengden (%) Fe oppgitt fra analyseresultatene (her 5.1 %) og andelen Fe i Fe_2O_3 :

$$Fe = \% Fe_2O_3 \times Andel Fe = 5,1 \% \times 0,699 = 3,56 \%$$

1 % tilsvarer 10 000 mg/kg:

$$Fe = 3,56 \% = 35600 \frac{mg}{kg} = 35600 \frac{g}{tonn}$$

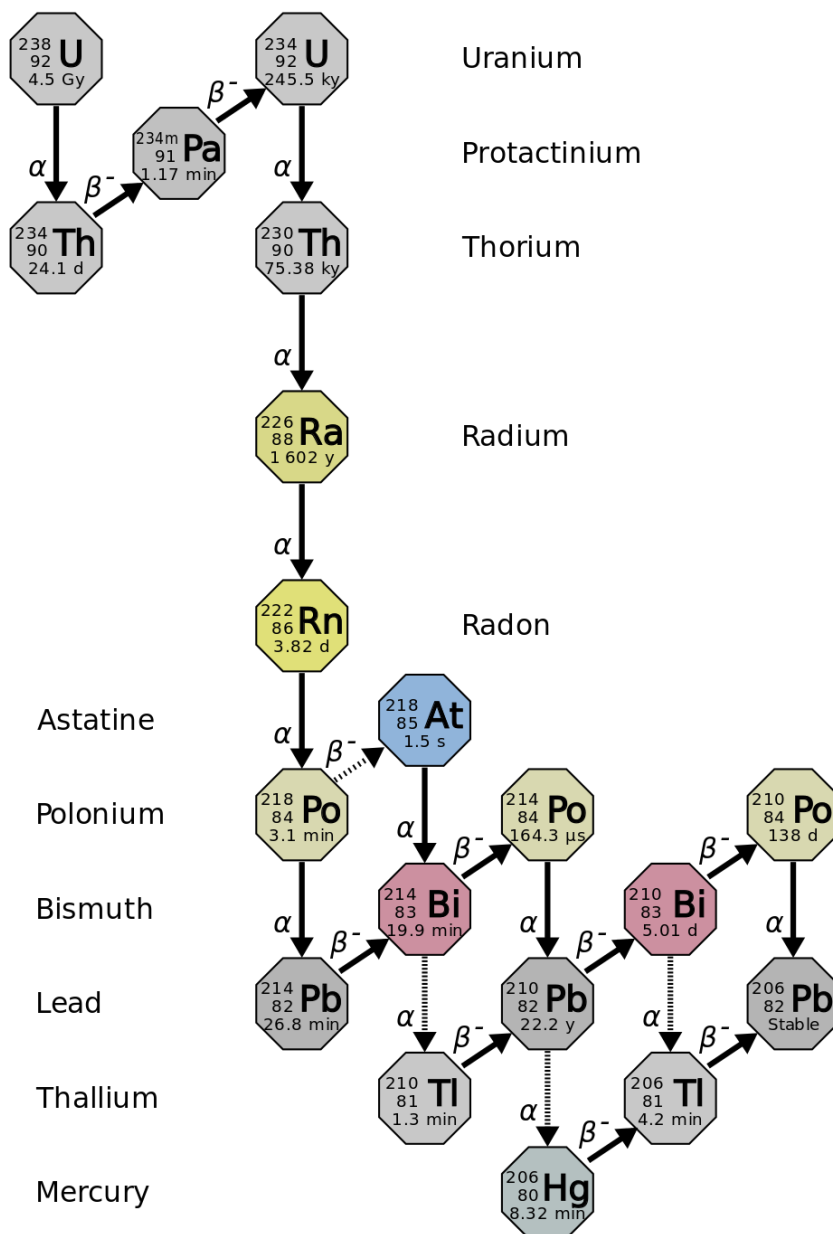
Antall mol Fe per tonn beregnes så fra mengden Fe (g/tonn) dividert på molarvekt til Fe:

$$Fe = \frac{35600 \frac{g}{tonn}}{55,85 \frac{g}{mol}} = 639 \frac{mol}{tonn}$$

D1.8 Radioaktivitet i berggrunn

Vi kan ikke unngå å bli utsatt for radioaktiv stråling fra berggrunnen. Dette er en del av den generelle bakgrunnsstrålingen som vanligvis ikke utgjør noen helserisiko. Andre bidrag til dette er stråling fra verdensrommet. Radioaktiv stråling fra berggrunnen vil variere fra sted til sted.

Viktige naturlig forekommende radionuklider inkluderer uran-238 (^{238}U), uran-235 (^{235}U) og thorium-232 (^{232}Th). Disse radionuklidene starter hver sin radioaktive kjede med flere radioaktive datternuklider før de ender opp som stabilt bly, se for eksempel desintegrasjonskjeden for ^{238}U i figur 6.



Figur 6 Nedbrytningskjede for uran (^{238}U). Kilde: Wikipedia.org; Evaluated Nuclear Structure Data File (National Nuclear Data Center. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/NdsEnsdf/QueryForm.html>)

Prosessen der et radioaktivt stoff sender ut stråling og endrer form, kalles desintegrasjon. I desintegrasjonsprosessen avgis energi som ioniserende stråling i form av partikler (alfa- eller betastråling) og elektromagnetisk stråling (gammastråling). Radioaktivitet beskrives med enheten becquerel (Bq), der 1 Bq tilsvarer en desintegrasjon per sekund.

Svarte leirskifre inneholder naturlig forekommende radionuklider, og uran (hovedsakelig ^{238}U) er den viktigste av dem (McKelvey, 1955; Pabst m. fl., 2017; Schovsbo, 2002). Tabell 2 viser eksempler på innholdet av uran i utvalgte leirskifere og granitt. Det er alunskifer som har de høyeste konsentrasjonene av uran, fulgt av Galgebergskifer. Enkelte lag i Alunskiferen kan ha >200 mg uran per kg faststoff (se etasje 2 i Tabell 2). Steinmasser med ≥ 1 Bq/g ^{238}U (80 mg U /kg) defineres som radioaktivt avfall når de tas ut.

Tabell 2 Typiske konsentrasjoner av uran (mg/kg) i enkelte bergarter.

Skifer / bergart	Etasje	Uran (mg/kg)
Alunskifer	2	60 – 300
	3a	30 – 150
Hagabergskifer	3b α	5 – 20
Galgebergskifer	3b β	10 – 40
Huuskifer	3c	1 – 7
Elnesskifer	4a	< 15
Granitter	-	5 – 40

For thorium (Th) gjelder også grensen for radioaktivt avfall på 1 Bq/g. Dette tilsvarer 246 mg/kg Th. I leirskifre vil man sjelden eller aldri påvise så høye konsentrasjoner av thorium, men det kan forekomme i andre norske bergarter.

Uran, thorium og deres døtre utgjør størst risiko ved opptak i mennesker eller andre organismer, og mobiliteten i vann er derfor viktig. Når syredannende svartskifer reagerer og produserer syre, kan utslipp av radionuklider øke. Det er derfor et større problem med radionuklider i syredannende bergarter enn i andre ikke-reaktive bergarter.

Uran har forholdsvis lang halveringstid, og er derfor ikke veldig radioaktiv i forhold til andre kortlivede radionuklider. Den kjemiske giftigheten til uran (som er et "tungmetall") er høyere enn radiotoksisiteten. En del av det mer kortlivede døtrene til ^{238}U er på den annen side veldig radiotoksiske (f.eks. ^{210}Po og ^{226}Ra) (IAEA, 2014).

D1.8.1 Naturlig uran og sekulær likevekt

Naturlig forekommende uran består av ^{238}U (halveringstid ($t_{1/2}$) = 4,5 mrd. år), ^{235}U ($t_{1/2}$ = 700 mill. år) og ^{234}U ($t_{1/2}$ = 246 000 år). I naturen er det et gitt forhold mellom disse tre urannuklidene, og de tilsvarer henholdsvis 99,27 %, 0,72 % og 0,0054 % av massen til uran. ^{234}U er en av døtrene til ^{238}U , og i naturlig uran er aktiviteten til ^{238}U og ^{234}U like høy, ettersom disse er i sekulær likevekt. Sekulær likevekt oppstår når man har en langlivet mornuklide og datternuklider med relativt kort halveringstid. Da vil, etter en viss tid, alle datternuklidene ha like høy aktivitet som mornukliden, ettersom de produseres og desintegrerer med samme hastighet.

^{235}U bidrar med 2,2 % av urans radioaktivitet, mens ^{238}U og ^{234}U bidrar med 48,9 % hver. Det kan virke rart at ^{234}U bidrar med like mye radioaktivitet som ^{238}U når den kun bidrar med 0,0054 % av massen, men det forklares med at ^{234}U har en mye kortere halveringstid og derfor har en høyere radioaktivitet for en mindre masse.

I gammel bergmasse (som alunskifer) kan man anta at ^{238}U er i sekulær likevekt med alle sine datternuklider, det vil si at det er like høy radioaktivitet av hver nuklide. Det samme gjelder for ^{235}U med sine døtre. Når stein kommer i kontakt med andre medier som luft og vann, vil de kjemiske egenskapene til hvert grunnstoff (samt det kjemiske miljøet steinen er i, bergmassens mineralsammensetning osv.) bestemme hvorvidt en radionuklide går i løsning. I f. eks. en bekk eller en brønn kan man derfor ikke anta at radionuklidene er i likevekt og man bør måle på de ulike radionuklidene. Det samme kan være tilfellet for forvitrede steinmasser hvor noen av radionuklidene ofte vil være vasket ut i større grad enn andre.

D1.8.2 Omregning fra mg til Bq og vice versa

Total aktivitet er samlet radioaktivitet i et volum, og angis i Bequerel (Bq). Aktivitetskonsentrasjonen (spesifikk aktivitet) er radioaktivitet per masseenheter, og angis i Bq/L eller Bq/kg. En kan regne om fra aktivitet (Bq) eller aktivitetskonsentrasjon (Bq/L) til masse (g) eller konsentrasjon (g/L). I tabell 3 er det gitt konstanter for ^{238}U og ^{232}Th som kan brukes til slik omregning (IAEA, 2003). En slik konstant vil være unik for alle radionuklider. Man kan også bruke ligningene nedenfor.

Aktiviteten (A) i bequerel beregnes fra desintegrasjonskonstanten (λ) og antall atomer (N):

$$A = \lambda N$$

Desintegrasjonskonstanten beregnes fra nuklidens halveringstid i sekunder ($t_{1/2}$):

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

Antall atomer (N) beregnes fra antall mol (n) og Avogadros tall (N_A):

$$N = N_A \times n$$

Tabell 3 Omregningsfaktorer for å beregne spesifikk aktivitet fra målt konsentrasjon for ^{238}U og ^{232}Th . Kilde: IAEA, 2003.

Grunnstoff	Konsentrasjon	Aktivitetskonsentrasjon
Uran	1 mg/kg	12,35 Bq/kg ^{238}U
Thorium	1 mg/kg	4,06 Bq/kg ^{232}Th

D1.8.3 Dannelse av radongass

Som følge av desintegrasjon av uran, dannes en radioaktiv gass som kalles radon. Når det er uran i berggrunnen, kan radon unnslippe via sprekker i fjellet og trenge inn i hus. Hvis det blir mye radon i luften, kan det være skadelig for mennesker. Skadelige radonkonsentrasjoner kan forekomme innendørs, og spesielt i den kalde årstiden hvor man lufte mindre. Som følge av oppvarming innendørs (som vedfyring), vil det dannes et undertrykk som suger gassen inn fra undergrunnen gjennom utette kjellergulv, fra sprekker og langs rør og ventiler. Utendørs vil gassen sjelden utgjøre en helserisiko, ettersom den fortynnes fort.

Radongass er den vanligste årsaken til lungekreft etter røyking. Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet (DSA, tidligere Statens Strålevern) anbefaler derfor å holde innendørs radonkonsentrasjoner så lave som praktisk mulig og innenfor anbefalte grenser, en tiltaksgrense på 100 Bq/m^3 , og en øvre grenseverdi på 200 Bq/m^3 for innendørs rom for varig opphold (Strålevernforskriften § 6, 5. ledd). Generelt gjelder at jo høyere uraninnhold en bergart har, desto større er det radonproduserende potensialet. Økt forvitring av uranholdig berggrunn vil øke sannsynligheten for at radon kommer inn i hus, ettersom det blir flere sprekker i berggrunnen som gassen kan unnslippe gjennom. Byggteknisk forskrift til Plan og bygningsloven (TEK17) krever at nye bygninger med rom for varig opphold, skal bygges med radonsperre mot grunnen og være tilrettelagt for trykkreduserende tiltak i grunnen under bygningen, som kan aktiveres når radonkonsentrasjonen i inneluften overstiger 100 Bq/m^3 .

Steinmasser eller berggrunn under hus trenger ikke å overskride grensen for radioaktivt avfall for å forårsake høye radonverdier innendørs. DSA anbefaler en grense på $0,15 \text{ Bq/g}$ for innholdet av radium-226 (^{226}Ra , en av døtrene til ^{238}U) for tilkjørte steinmasser som skal benyttes under eller rundt bygninger med oppholdsrom (Statens strålevern, 2015). Dette tilsvarer 12 mg/kg uran.

Dokumentinformasjon/ <i>Document information</i>		
Dokumenttittel/<i>Document title</i> Håndtering av potensielt syredannende svartskifer. Fagrapport til Miljødirektoratet		Dokumentnr./<i>Document no.</i> 20200680-01-R
Dokumenttype/<i>Type of document</i> Rapport / Report	Oppdragsgiver/<i>Client</i> Miljødirektoratet	Dato/<i>Date</i> 2021-12-13
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/<i>Proprietary rights to the document according to contract</i> Oppdragsgiver / Client		Rev.nr.&dato/<i>Rev.no.&date</i> 0 /
Distribusjon/<i>Distribution</i> BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
Emneord/<i>Keywords</i> Berggrunn, syredannende bergarter, klassifisering, deponering, håndtering, alunskifer, svartskifer, galgebergskifer		

Stedfesting/ <i>Geographical information</i>	
Land, fylke/<i>Country</i>	Havområde/<i>Offshore area</i>
Kommune/<i>Municipality</i>	Feltnavn/<i>Field name</i>
Sted/<i>Location</i>	Sted/<i>Location</i>
Kartblad/<i>Map</i>	Felt, blokknr./<i>Field, Block No.</i>
UTM-koordinater/<i>UTM-coordinates</i> Sone: Øst: Nord:	Koordinater/<i>Coordinates</i> Projeksjon, datum: Øst: Nord:

Dokumentkontroll/ <i>Document control</i>					
Kvalitetssikring i henhold til/ <i>Quality assurance according to NS-EN ISO9001</i>					
Rev/<i>Rev.</i>	Revisjonsgrunnlag/<i>Reason for revision</i>	Egenkontroll av/<i>Self review by:</i>	Sidemanns-kontroll av/<i>Colleague review by:</i>	Uavhengig kontroll av/<i>Independent review by:</i>	Tverrfaglig kontroll av/<i>Inter-disciplinary review by:</i>
0	Originaldokument, Utkast til Miljødirektoratet	2021-06-13 Frøydis Meen Wærsted 2021-06-13 Gijs Breedveld	2021-02-15 Christian Sætre 2021-05-31 Gunvor Baardvik (kap. 1-3) 2021-06-11 Gudny Okkenhaug	2021-06-24 Paul S. Cappelen 2021-09-23 Miljødirektoratet 2021-09-23 Direktoratet for strålevern og atomsikkerhet	
0	Originaldokument, etter tilbakemelding fra Miljødirektoratet	2021-12-03 Frøydis Meen Wærsted		2021-12-11 Paul S. Cappelen	

Dokument godkjent for utsendelse/<i>Document approved for release</i>	Dato/<i>Date</i> 13. desember 2021	Prosjektleder/<i>Project Manager</i> Frøydis Meen Wærsted
--	--	---

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: Offshore energi – Bygg, anlegg og samferdsel – Naturfare – Miljøteknologi.

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskaper i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Offshore energy – Building, Construction and Transportation – Natural Hazards – Environmental Engineering.

NGI is a private foundation with office and laboratories in Oslo, a branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

