



RAPPORT

Identifisering og karakterisering av syredannende bergarter

VEILEDER FOR MILJØDIREKTORATET

DOK.NR. 20120842-01-R
REV.NR. 0 / 2015-02-09

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten 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: Identifisering og karakterisering av syredannende bergarter
Dokumenttittel: Veileder for Miljødirektoratet
Dokumentnr.: 20120842-01-R
Dato: 2015-02-09
Rev.nr. / Rev.dato: 0

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Miljødirektoratet
Kontaktperson: Hans Jørund Hansen
Kontraktreferanse: Avtale signert 2012-12-19

for NGI

Prosjektleder: Anne Kibsgaard
Utarbeidet av: Erik Endre, Erlend Sørmo
Kontrollert av: Gijs Breedveld, Gudny Okkenhaug

Sammendrag

Veilederen har som formål å gi retningslinjer for å identifisere og karakterisere potensielt syredannende bergarter slik at prosjektering og påfølgende håndtering og tiltak skal kunne foregå på en betryggende måte.

Egenskapene til syredannende bergarter og problemstillinger i forbindelse med håndtering av disse er spesielt knyttet til:

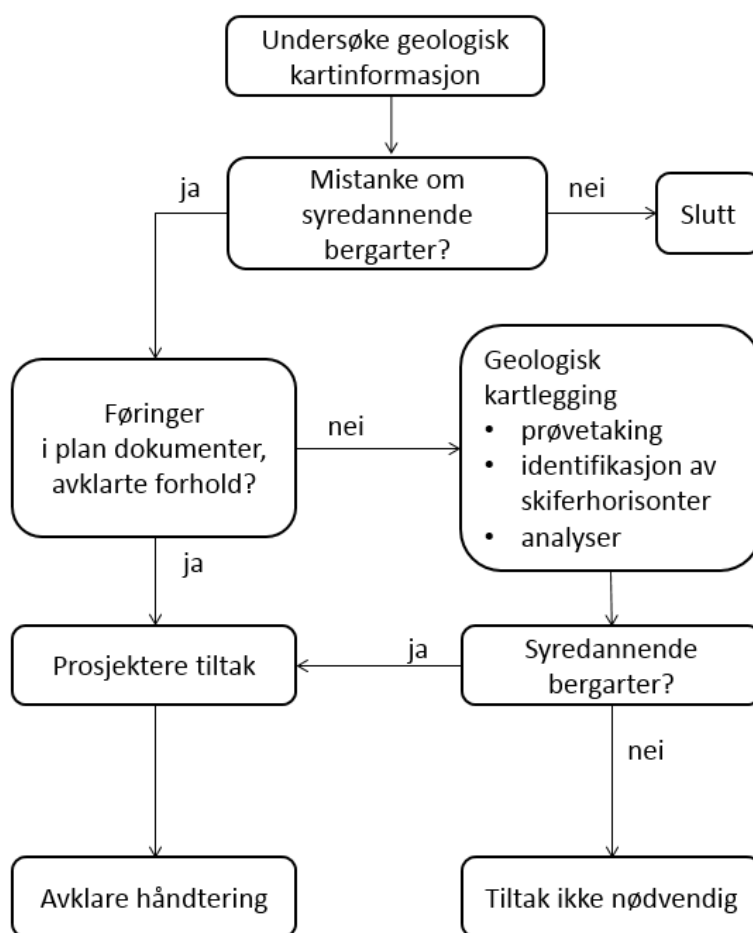
- Avrenning av vann med lav pH
- Utlekking av tungmetaller
- Forvitring og korrosjon av betong og stål
- Svelling og trykk mot konstruksjoner og fundamenter
- Redusert bæreevne/styrke av undergrunnen
- Potensiell dannelse av radongass

Veilederen gir en oversikt over mulige forekomster av syredannende leirskifre med vekt på geografisk plassering, og deres ulike egenskaper.

For å identifisere og karakterisere leirskifre foreslås en trinnvis prosedyre som består av 3 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. Forslag til fremgangsmåte knyttet til konkret håndtering av syredannende bergarter i forbindelse med bygge- og graveprosjekter vises nedenfor.



Flytskjema ved håndtering av syredannende bergarter i byggeprosjekt.

Innhold

1	Innledning	7
1.1	Bakgrunn	7
1.2	Hensikt	7
1.3	Veilederens oppbygging	7
2	Syredannende bergarter – problemer og konsekvenser for miljø, mennesker og eiendom.	9
2.1	Syredannende reaksjoner fra sulfidforvitring	10
2.2	Utlekking av tungmetaller	10
2.3	Forvitring og etsing av betong og stål	11
2.4	Svelling og trykk mot konstruksjoner og fundamenter, setningsskader	12
2.5	Dannelse av radongass	12
2.6	Stråling fra spalting av uran	12
2.7	Temperaturøkning og risiko for selvantennning i deponi.	13
3	Syredannende bergarter – Den faglige bakgrunnen for fenomenet.	13
3.1	Hvor finner vi syredannende bergarter?	13
3.2	Kjennetegn og egenskaper til potensielt syredannende leirskiferbergarter	18
4	Metode for identifisering og karakterisering av syredannende bergarter	22
4.1	Geologisk kartgrunnlag	22
4.2	Geologisk/ ingeniørgeologisk kartlegging i felt/byggeplass	22
4.3	Prøvetaking og metoder	23
4.4	Analyser	25
4.5	Mineralidentifikasjon	27
4.6	Tolkning av analysedata	27
5	Bruk og disponering av syredannende bergarter	34
5.1	Helsemessige forhåndsregler	34
5.2	Håndtering av overskuddsmasser	34
5.3	Tilbakefylte masser	34
5.4	Gjenværende masser	34
5.5	Spesielle hensyn vedrørende radioaktivitet	35
5.6	Beskytte omgivelser og konstruksjoner	35
5.7	Unngå endring av grunnvannsspeilet	35

5.8	Drenering og grøfter	36
5.9	Tiltak for å unngå inntrengning av radongass i bygg	36
5.10	Fremgangsmåte ved bygg og anlegg	36
6	Katalog over syredannende bergarter i Norge	38
6.1	Aktuelle informasjonskilder	38
6.2	Oslo og omegn	43
6.3	Hamar regionen	44
6.4	Synnfjellområdet	46
6.5	Sør-Vestlandet	48
6.6	Sørlandet	49
6.7	Trøndelag	50
6.8	Nordland	51
7	Oppsummering	52
8	Referanser	54

Vedlegg

Vedlegg A	Ordforklaringer
Vedlegg B	Eksempler
Vedlegg C	Tolkning av analysedata

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Forurensningsforskriftens kapittel 2 omhandler opprydding i forurenset grunn ved bygge- og gravearbeider. I henhold til § 2-3a i forskriften regnes "grunn som danner syre eller andre stoffer som kan medføre forurensning i kontakt med vann og/eller luft" også som "forurenset grunn dersom ikke annet blir dokumentert". Alunskifer er en av flere leirskifre med syredannende egenskaper som det har vært fokus på i forbindelse med grave- og byggearbeider. Ettersom forurensningsforskriftens § 2-3a er ment å dekke alle typer syredannende bergarter, har Miljødirektoratet, som forvalter forurensningsforskriften, sett behovet for å presisere begrepet "syredannende bergarter" utover forskriftsteksten og definere hvilke typer grunn som er inkludert i begrepet og hvordan slik grunn og genererte masser skal identifiseres.

1.2 Hensikt

Hensikten med veilederen er å gjøre det enklere for entreprenører, konsulenter, planmyndighet, samt miljøvernmyndigheten i fylker og kommuner å treffe de riktige beslutninger med hensyn til syredannende bergarter og redusere skadevirkningene på menneske, eiendom og miljø til et minimum. Det har vist seg å være vanskelig for de involverte i bygge- og gravesaker å utføre korrekt identifisering og klassifisering av syredannende bergarter som danner grunnlag for riktig vurdering og håndtering av disse massene. Veilederen er ment å bidra til å øke forståelsen for utfordringene knyttet til disse bergartene og sikre en enhetlig håndtering.

Veilederen vil i hovedsak være fokusert på syredannende leirskifre, ettersom disse er de mest vanlige syredannende bergartene i Norge. Samtidig vil metodene for karakterisering, identifisering og håndtering av syredannende leirskifre, som er beskrevet her, også kunne benyttes for andre syredannende bergarter.

1.3 Veilederens oppbygging

Veilederen har som formål å gi retningslinjer for å identifisere og karakterisere syredannende bergarter slik at prosjektering og påfølgende håndtering og tiltak skal kunne foregå på en forsvarlig måte. Oppbyggingen av veilederen er som følger:

1. **Syredannende bergarter – problemer og konsekvenser for miljø, mennesker og eiendom.** Beskrivelser av alle de ulike følger og skader som kan oppstå ved en uheldig eller feilaktig bruk og disponering av syredannende bergarter.
2. **Syredannende bergarter – Den faglige bakgrunnen for fenomenet.** Hva er de, hvordan oppstår de og hvilke geografiske områder bør en være aktsom? En oversikt

over de geologisk og kjemiske faktorene som er med på å bestemme hva som påvirker syredannelsesprosessen.

3. **Metode for identifisering og klassifisering av syredannende bergarter.** En beskrivelse av metodikk og vurderinger som gjøres, hvilke data som kreves, prøver som skal tas og bruk av kjemiske og geologiske analyser.
4. **Bruk og disponering av syredannende bergarter.** Kapitlet viser i hvilke situasjoner det er nødvendig å tenke på og vurdere om syredannende bergarter er tilstede og hvordan disse skal håndteres.
5. **Katalog over syredannende bergarter i Norge.** En regional oversikt over de syredannende bergartene som fins i Norge med en beskrivelse av den lokale utformingen og hvilke egenskaper som er dominerende.

Faguttrykk som brukes er nærmere forklart i Vedlegg A.

Eksempler for å øke forståelsen av hvordan en bør gå frem i ulike typer prosjekter og hvordan ulike problemstillinger kan løses er vist i Vedlegg B. Vedlegg C viser mer utfyllende informasjon for tolkning av kjemiske analysedata.

2 Syredannende bergarter – problemer og konsekvenser for miljø, mennesker og eiendom.

Det er kjemiske endringer i bergarten som under innflytelse av oksygen og vann fører til sur avrenning og mekanisk endring av bergarten som kan påvirke både miljøet og konstruksjoner. Sulfidmineraler i bergarten omdannes til svovelsyre og andre sulfatforbindelser og mineraler.



Figur 1 Alunskifer som forvitrer ved tilgang på fuktig luft vil svulle til et volum som kan være 2-3 ganger opprinnelig volum (høyden på bildeutsnittet er ca. 5 centimeter). Gule utfellinger er $Fe_2(SO_4)_2$ mineraler (jarositt eller koptiatitt).

De syredannende bergartene fører med seg en rekke miljømessige og byggetekniske problemstillinger (Figur 1). Bygging på grunn som kan utvikle syre krever tiltak for å hindre/reducere negative effekter som forurensning, kortere levetid på konstruksjonen, økt avfallsproduksjon og økte samfunnskostnader.

Dersom potensielt syredannende bergarter ikke blir behandlet med tilstrekkelig aktsomhet kan det som konsekvens følge en rekke uønskede resultater:

- Syredannende reaksjoner, pH reduseres
- Utlekking av tungmetaller
- Forvitring og etsing av betong og stål
- Svelling og trykk mot konstruksjoner og fundamenter
- Dannelse av radongass
- Stråling fra spalting av uran
- Temperaturøkning og risiko for selvantennning ved deponi

En oversikt over potensiell skadeomfang knyttet til de vanligste syredannende bergartene, svarte og mørke leirskifre, vises i Tabell 1. En nærmere beskrivelse hvor disse bergartene kan påtreffes gis i kapittel 3.

Tabell 1 Egenskaper og potensielt skadeomfang for leirskifre som kan påtreffes i Oslofeltet.

Leirskifer	lav pH	svelleskade	radon	uran	styrke
Alunskifer	****	****	****	***(*)	*
Galgeberg Oslo	*(*)	*(*)	***	**	**
Galgeberg, Gran	*	(*)	***	**	*(*)
Elnes Oslo	*	*(*)	*(*)	*	**
Elnes Hamar	*	*(*)	*(*)	*	*
Brøttum/Biri	*(*)	*(*)	*(*)	*	*

I det følgende beskrives kort de viktigste egenskapene.

2.1 Syredannende reaksjoner fra sulfidforvitring

Det er de syredannende egenskapene som kontrollerer de fleste uønskede egenskapene for sulfidrike bergarter. Om pH synker til under ca. 4, vil forvitringen forsterkes. Den sterke syren tærer opp alle mineralene (særlig *silikatene*) slik at også aluminium blir mobilt. Syren (svovelsyren og sulfatene) tærer også aggressivt på mange bygningsmaterialer og kan medføre kortere levetid på konstruksjoner. Ved lav og moderat relativ fuktighet vil de nye mineralene som dannes (*sulfatmineralene*) medføre volumøkninger i skifervolumet (Figur 1). Ved lav pH <4 vil typisk sulfatmineraler med Fe³⁺ og Al³⁺ dannes.

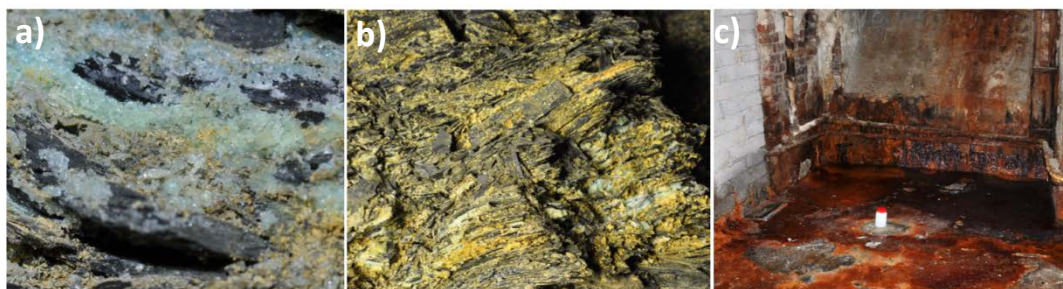
2.2 Utlekking av tungmetaller

Utlekking av tungmetaller skyldes forvitring av sulfidmineralene. Sigevann i kontakt med særlig Alunskifer kan ha meget høye konsentrasjoner av tungmetaller, uran og aluminium. pH i slikt sigevann er vanligvis lav (pH<4). På engelsk omtales dette som *Acid Rock Drainage* (ARD).

Ved lav og moderat relativ fuktighet vil forvitningsprosessen danne *sulfatmineraler*. Sulfatmineralene inneholder tungmetaller som før var bundet i sulfidene. Ettersom sulfatene er lett løselig i vann, vil en forvitret leirskifer med høy andel av sulfatmineraler kunne frigjøre store mengder tungmetaller i kontakt med vann. Sigevann kan derfor få svært høye konsentrasjoner av tungmetaller, uran og aluminium.

Ved pH >4 vil typisk jernhydroksider erstatte sulfater. Jernhydroksider er gode "feller" for tungmetaller som bindes i hydroksidmineralene som dannes (Figur 2), og en vil da få mindre utlekkning av tungmetaller. Tross dette kan det også skje utlekkning av tungmetaller i sigevann med høyere pH (pH>6), noe som på engelsk omtales som *Neutral Rock Drainage* (NRD).

Dersom den syredannende bergarten også har et høyt nøytraliserende potensial vil syredannelsen fra forvitrende sulfider utlignes, men tungmetaller som er mobile ved nøytrale pH-forhold (As, Cd, Co, Mo, Ni, Sb, U og Zn) vil fortsatt kunne lekke ut fra de forvitrede sulfidene. Dette forutsetter et høyt sulfidinnhold i den opprinnelige bergarten. I tillegg vil mobiliteten til tungmetallene være avhengig av kjemiske forhold i bergarten og grunnvannet.



Figur 2 pH er den viktigste enkeltfaktoren for utvikling av forvitring og forurensende potensial til massene og mineraldannelse: a) grønn-blå Fe₂+sulfat, b) gul Fe₃+sulfat c) jernhydroksyder (goethitt, Fe-O-OH mineral).

2.3 Forvitring og etsing av betong og stål

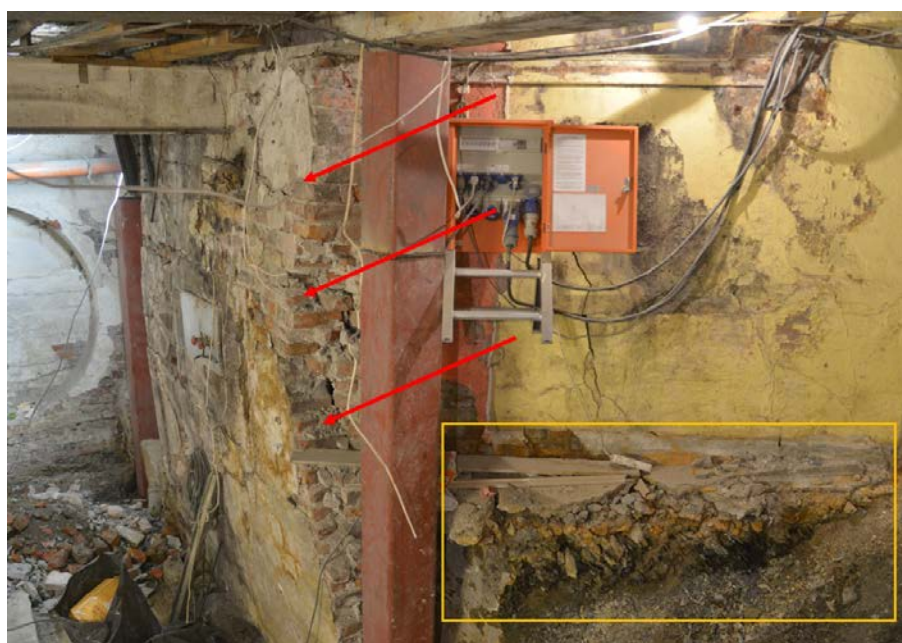
Syren som dannes ved de rette forvitningsforholdene, virker aggressivt på mange bygningsmaterialer og kan medføre kortere levetid på konstruksjoner. Når sulfidforvitringen er av et slikt omfang at pH synker, blir etseskadene større. Svovelsyre kan etse/løse opp mange bygningsmaterialer.



Figur 3 Innlekkasje av aggressivt vann (pH < 3) i et kjellerrom. Kontakt med vannet kan medføre fare for etseskader på huden. For vannkjemi, se Vedlegg C, Tabell C3, Prøve 1.

2.4 Svelling og trykk mot konstruksjoner og fundamenter, setningsskader

Svelltrykket som kan utvikles i leirskifer som forvitrer kan bli flere hundre tonn per kvadratmeter ($> 2\text{MPa} \sim 200\text{ t/m}^2$). Skader på fundamenter og andre bygningskonstruksjoner er veldokumentert gjennom flere rehabiliteringsprosjekter (Figur 4). Typiske skader er fundamentskader, løft i vegger, knusing av infrastruktur i grunnen (vann og avløp).



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

2.5 Dannelse av radongass

Radon er en radioaktiv gass som dannes som følge av spalting av uran. Når det dannes en gass inne i et mineral, oppstår et overtrykk der gassen presses ut av mineralkornet. Generelt gjelder at jo høyere uraninnhold i en bergart, desto større radonproduserende potensial. Radon transporteres langs sprekkeflater i skiferen og til overflaten. Forvitring øker overflateareal og gir dermed større spredning av radon til luft.

2.6 Stråling fra spalting av uran

Radioaktiv stråling fra uranrike bergarter kan medføre helserisiko. Tabell 2 viser eksempler på innholdet av uran i utvalgte leirskifere. Det er Alunskifer som har de høyeste

konsentrasjonene av uran. Dernest følger Galgebergskifer. Enkelte lag i Alunskiferen kan ha >200 mg uran per kg faststoff. Korrelasjoner mellom uraninnhold og stråling tyder på at leirskifere med uraninnhold < 50 mg/kg, har tilnærmet neglisjerbar stråling.

Tabell 2 Innholdet av uran (mg/kg) i enkelte leirskifertyper.

Skifer	Uraninnhold
Alunskifer	60 – 200
Galgeberg	Ca. 40
Elnes	< 15

2.7 Temperaturøkning og risiko for selvantennning i deponi.

Når sulfider forvitrer til sulfater utvikles varme (eksoterm reaksjon). Dersom Alunskifer legges i for store mengder i deponi uten at den behandles/forsegles, kan forvittringsreaksjonene bli så intense at deponiet kan begynne å brenne. Andre leirskifertyper vil ikke forårsake slik varmgang.

3 Syredannende bergarter – Den faglige bakgrunnen for fenomenet.

3.1 Hvor finner vi syredannende bergarter?

Berggrunnen i Norge har store variasjoner i bergartstyper (Figur 5). Tar vi utgangspunkt i den svarte leirskiferen, Alunskifer som kan finnes i kambro-silurlagrekken (lilla farge i Figur 5), vil den samme skiferen ha ulike egenskaper avhengig av geografisk forekomst. Den vil også beskrives med andre karakteristiske egenskaper og navngis annerledes. Alunskiferen, som er godt kjent i Oslo regionen, vil se annerledes ut i Rogaland, Trøndelag og Nordland. For eksempel har Alunskiferformasjonen på Gran på Hadeland halve innholdet av sulfider i forhold til Oslo/Slemmestad. Dette skyldes at den geologiske historien er forskjellig i ulike områder av landet.

De grønne arealene i kartet i Figur 5, omtalt som metamorfe og magmatiske bergarter, kan inneholde store mengder omdannede leirskifre som kan være sulfidførende. Noen hovedtrekk av geologien er omtalt i det følgende med fokus på Oslofeltet, mens mer detaljert informasjon gis i kapittel 5.

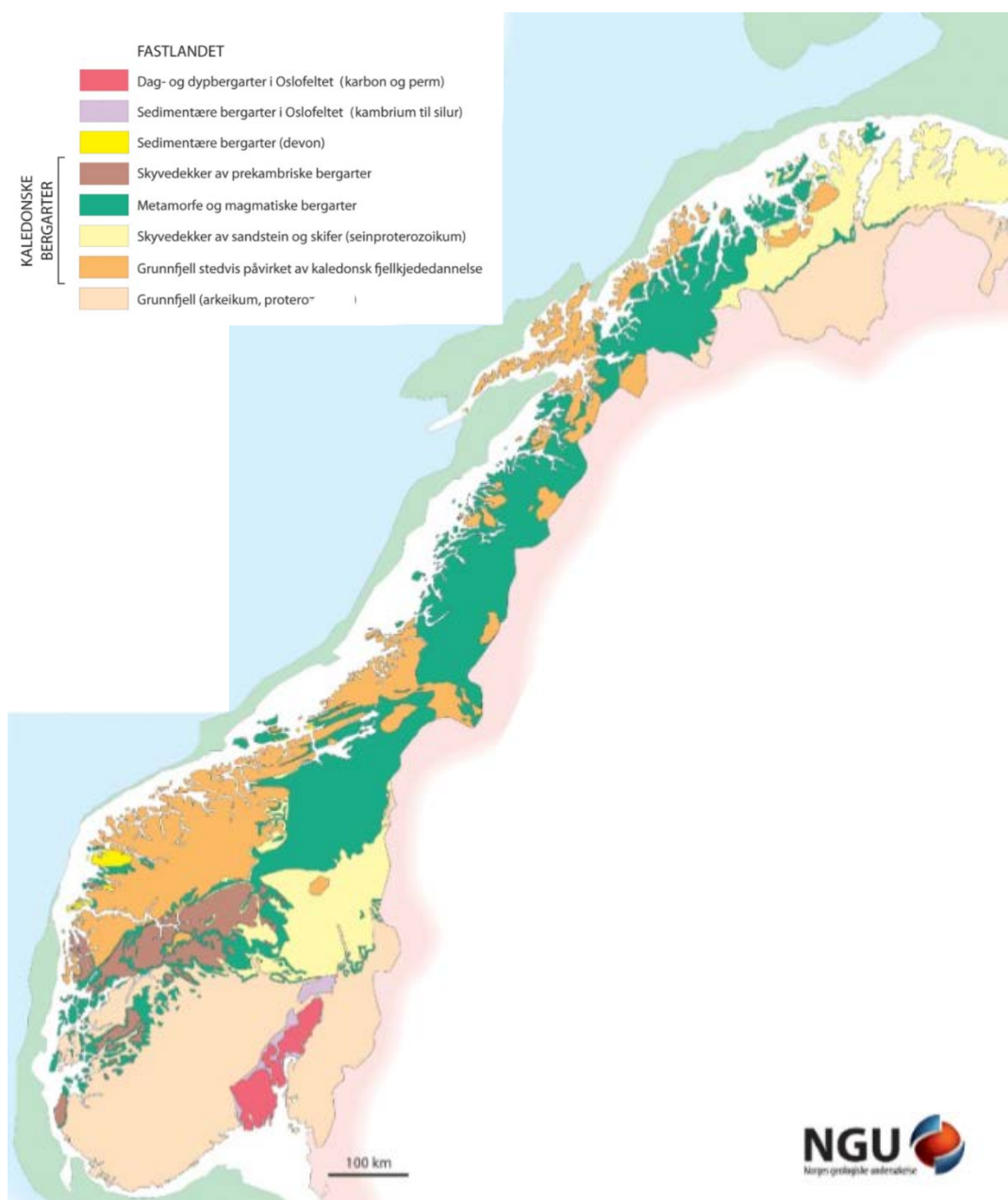
3.1.1 Oslofeltet

Oslofeltet er dannet i den geologiske tidsperioden Perm, ved en innsynking av jordskorpen samtidig med omfattende vulkansk aktivitet. Områder som sank dypere er områder fra kambro-silur der vi kan finne leirskiferlagrekken (Figur 6).

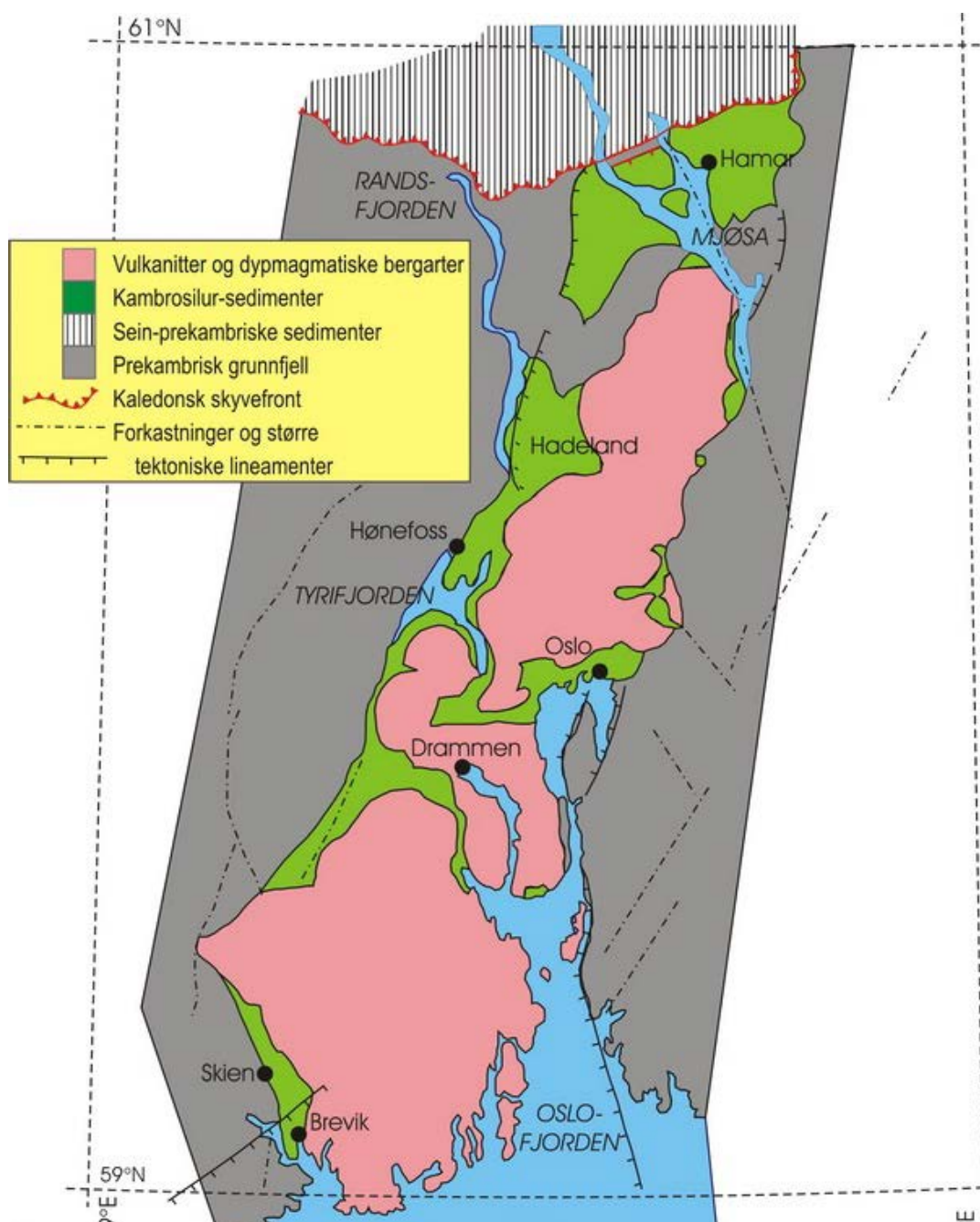
Bergartene omtales som leirskifer, kalkrik leirskifer, svart leirskifer eller grå leirskifer. Leirskifer er en laminert (skifrig) bergart som består hovedsakelig av leirmineraler dannet ved lav temperatur (i geologisk sammenheng). Leirskifer som er svart av utseende inneholder vanligvis rester av organisk materiale. Svarte leirskifre reflekterer anaerobe (oksygenfri eller oksygenfattige forhold) ved dannelsen av sedimentet som skapte grunnlaget for et høyere innhold av sulfider.

I lagrekken av leirskifre i Oslofeltet er alunskifer (svart leirskifer) den meste kjente syredannende skiferbergarten. Forekomsten av Alunskifer i grunnen har ofte vært ensbetydende med store kostnader, bygningskader, miljørisiko og spesielle krav til deponi. Alunskifer tilhører en bestemt formasjon i Oslofeltets kambro-siluriske lagrekke av skiferbergarter, nemlig Alunskiferformasjonen (Tabell 3, etasje 1-3aβ). Men svarte leirskifre og andre mørke leirskifre med potensielt syredannende egenskaper påtreffes også i andre nivåer i denne lagrekken.

Leirskifre generelt, har forhøyede konsentrasjoner av tungmetaller. Det er ikke dermed gitt at de skal karakteriseres som en forurensningskilde eller som forurenset grunn som tilfellet ville vært om tilsvarende konsentrasjoner av tungmetaller ble registrert i forbindelse med menneskeskapt forurensning i jord. Det er forvitringsegenskapene som avgjør om metallene kan frigjøres og danne en miljørisiko.



Figur 5 Norgeskartet (www.ngu.no) viser de viktigste enhetene i norsk berggrunn. Det er arealer med lilla farge der det forekommer svart leirskifer i grunnen. De grønne arealene viser områder der det kan forekomme svarte leirskifre. Potensielt syredannende berggrunn kan opptre i store deler av landet.



Figur 6 Kart over Oslofeltet (NGF, 2013).

Svarte leirskifre fra den geologiske tidsepoken kambrium-silur har vanligvis et visst innhold av kullforbindelser (organisk karbon) og et høyere innhold av sulfidmineraler, tungmetaller og uran. Alunskiferen er spesiell da denne kan forvitre mye raskere enn andre skifertyper. Fra å være en frisk uforvitret skifer kan Alunskifer i løpet av mindre enn ti år, under optimale forhold utvikle helt andre egenskaper. Dette skyldes hovedsakelig en akselerert forvitring av sulfidmineralene og skifrig/laminert tekstur i bergarten.

Tabell 3 viser oppbygging av leirskiferlagrekken fra kambrium til silur i Oslofeltet (modifisert etter Owen et al.,1990). I denne lagrekken veksler svarte leirskifre, grå leirskifre og kalkrike leirskifre. Denne vekslingen forteller at det var store endringer i sedimentasjonsforhold i denne perioden. I denne veilederen benyttes navn på formasjonene som vist i Tabell 3, slik som Alunskifer, Bjørkåsholmenskifer, Hagabergskifer, Galgebergskifer og Elnesskifer. Det er nyttig å merke seg nummerering av de ulike leirskifrene i lagrekken som er lettere å forholde seg til. Eldst er angitt med 1 og yngst med 4.

Tabell 3 Lagrekken i kambro-silurskifrene, svarte leirskiferhorisonter er uthevet (mørk grå,) mens mulig forekomst er merket med lyse grå eldre enn kambro-silur som tilhører Biri og/eller Brøttum formasjonene er også inkludert. Lunner formasjonen er ikke en direkte parallell til Venstøp formasjonen selv om de er av omtrentlig samme alder.

Etasje	Oslo-Asker Formasjon	Hadeland Formasjon	Hamar Formasjon	NGU inndeling på kart	Mektighet (m)	Alder	
4d				Oslo		Sen ordovicisk	471-443 mill. år
4cα	Venstøp	Lunner*		Oslo	Oslo 7-10m Lunner fm <185m		
4bδ	Solvang			Oslo	12-20		
4bγ	Nakkholmen			Oslo	13-20		
4bβ	Frognerkilen			Oslo	10-20		
4bα	Arnestad	Arnestad/Furubergget	Arnestad/Furubergget	Oslo	22-40		
4aβ	Vollen		Vollen/Hovinsholm	Oslo	> 45		
4aα	Elnes	Elnes	Elnes/Bjørge	Oslo	60-80		
3c	Huk3	Huk3	Svartodden Herran/Stein	Røyken	2-5 m	Tidlig Ordovicisk	488-471 mill. år
3cβ	Huk2	Huk2		Røyken	2-5 m		
3cα	Huk1	Huk1		Røyken	2-5 m		
3bβ	Galgeberg	Galgeberg	Galgeberg	Røyken	5-10 m		
3bα	Hagaberg	Hagaberg	Hagaberg	Røyken	3-8 m		
3aγ	Bjørkåsholmen	Bjørkåsholmen	Bjørkåsholmen	Røyken	1-2 m		
3aα, 3aβ	Alunskifer-3	Alunskifer-3	Alunskifer-3	Røyken	~80 m men stor variasjon		
2a-2e	Alunskifer-2	Alunskifer-2	Alunskifer-2	Røyken		Sen kambrium	501-488
1	Alunskifer-1	Alunskifer-1	Alunskifer-1	Røyken		Midt kambrium	513-501
	-	-	Biri Brøttum	Biri Brøttum	1500 m	Eokambrium	<542

Legg merke til mektigheten av de ulike leirskifere. Der lagrekken ikke er forstyrret, vil en finne rekkefølgen som vist i Tabell 3. Det kan imidlertid skje et skifte i hvilken type skifer som er i grunnen over korte avstander. Geologiske hendelser har stokket om på rekkefølgen

flere steder. En skal derfor ikke bli overrasket om rekkefølgen kan være omvendt eller at deler av lagrekken mangler eller er repetert.

3.1.2 Gneisområder

I sørlandsfylkene Aust- og Vest-Agder kan sulfider finnes som sulfidrike tynne bånd i ulike gneisvarianter, som anrikninger i ganger og oppkonsentrert i mørke bergarter (særlig amfibolitter). Gneisområder på Sørlandet kan inneholde sulfider i så høye konsentrasjoner at de kan forårsake lave pH verdier i sigevann. Disse bånd er vanskelige å oppdage uten en tilstrekkelig geologisk kartlegging (se kapittel 6 for nærmere detaljer).

3.1.3 Kaledon /Den norske fjellkjeden

Bergartene som utgjør den norske fjellkjeden viser stor variasjon. Store arealer utgjøres av leirskifer av samme opprinnelse som Oslofeltets leirskiferlagrekke (Figur 4). Det henvises til geologisk litteratur og geologiske kart for nærmere utdyping.

3.2 Kjennetegn og egenskaper til potensielt syredannende leirskiferbergarter

Bakgrunn for å identifisere og kvantifisere potensielt syredannende egenskaper hos bergarter har sammenheng med at forvitring av sulfidmineraler kan føre til en akselerert forvitring som følge av at pH verdien synker og dermed frigjøre tungmetallene som var bundet i mineralene.

Sulfidrike malmer og sedimentære bergarter dannet fra sedimenter avsatt under oksygenfattige forhold er de viktigste gruppene. Mørke bergarter som enkelte amfibolitter/grønnskifre kan også være rike på sulfider. Mer komplisert blir det geologiske bildet når sulfider ligger som tynne lag i gneiser som på Sørlandet. Generelt vil forvitring i sulfidrike bergarter medføre dannelse av miljøskadelig syre og spredning av tungmetaller. Andre bergarter med lavere innhold av sulfider vil være uten disse egenskapene, eller ha de i mindre grad. Ut fra sulfidinnhold alene kan en ikke avgjøre om en bergart er syredannende eller ikke. For eksempel vil Elnesskifer i Oslofeltets lagrekke ikke betraktes som syredannende. Viktige kjennetegn og egenskaper som påvirker forvitringsegenskapene:

- Geologisk historie
- Flakdannelse (skifrig struktur)
- Mineralinnhold (mengde sjiktsilikater)
- Fordeling av sulfider i bergarten (små korn finfordelt eller større aggregater)
- Syredannende potensial
- Svellepotensial

3.2.1 Geologisk historie

Den geologiske historien har stor betydning for hvordan bergarters egenskaper utvikles. Eksempelvis vil Alunskiferen slik den kjennetegnes i Oslo regionen ha vesentlig forskjellige egenskaper på Vestlandet. Leirskiferbergarter som Alunskifer kan være kildebergart for olje andre steder.

I det geologiske kartet vil en Alunskifer på Vestlandet gjerne ha navn som grafittførende leirskifer, pyrittførende (grønn)skifer på grunn av at den geologiske historien er ulik på Vestlandet og Østlandet. I Trondheimsregionen er grønnstein og grønnskifer eksempler på sulfidrike bergarter omdannet fra lavabergarter på sjøbunnen.

3.2.2 Flakdannelse i skifer

En skiferbergart er en bergart med en parallell struktur som kalles lagdeling. Lagdelingen er oppstått som følge av at det under dannelse av sedimentet skjedde variasjoner i dannelsesmiljøet. Det tok mange tusen år å bygge opp en tykkelse på sedimentet som i en skifer utgjør et par millimeter. På folkemunne har slike skifre lokale navn som flisberg og liknende beskrivende navn. Egenskapen til leirskifer, skifrihet, omtales på engelsk som *fissile texture*, (*the ease with which a stone can be split along or against, its natural bed*). Denne egenskapen er forskjellig for de ulike syredannende leirskifre og har vesentlig betydning for den faktiske syredannende egenskapen.

I skiferbergarter er tettheten på lagdelingsplan avgjørende for forvitringsegenskapene, fordi det er oppflakingen som styrer økningen i kontaktarealet mellom sulfidmineraler og fukt/oksygen i skiferen. Forvittringshastigheten vil øke med økt kontaktareal.

3.2.3 Mineralinnhold

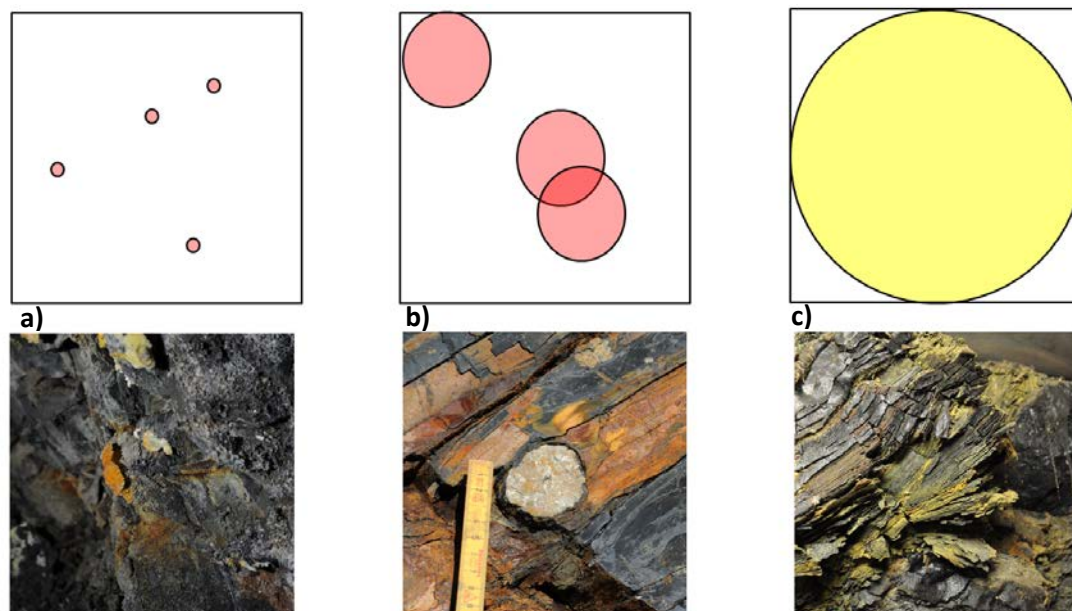
Bergarter inneholder hovedmineraler (bergartsdannende mineraler) og tilleggsmineraler (aksessoriske mineraler). Generelt er det hovedmineralene som medvirker til forvitringsegenskaper og mekaniske egenskaper. Tilleggsmineraler bidrar vanligvis i beskjeden grad. I sulfidrike bergarter og særlig i sulfidrike leirskifre er det sulfidene som styrer forvitringsegenskapene. Bakgrunn for sulfidenes sterke påvirkning på forvitring er at sulfidforvitring utvikler svovelsyre som fører til lav pH.

Her fokuseres det på bergarter med et høyt innhold av sulfidmineraler og da først og fremst jern (Fe) og svovel (S) mineralene pyritt (svovelkis) og magnetkis (pyrrhotitt). Når pH synker til <4 skjer en kraftig akselerert forvitring. Da vil de aller fleste mineraler gå i oppløsning mye raskere enn de ville gjort under pH-nøytrale forhold (pH 6-8). Form, størrelse og fordeling av mineralkorn påvirker syredannende egenskaper og forvittringshastighet. Jo mindre korn desto større kontaktareal har mineralkornet. Generelt gjelder at mindre mineralkorn er mindre stabile enn større mineralkorn. Er for eksempel mineralkorn samlet i mineralaggregater, vil kontaktflaten med vann/luft være langt mindre.

3.2.4 Fordeling av sulfider

Syredannende egenskaper til leirskifer vil i tillegg til konsentrasjonen av sulfidmineraler, kornform og størrelse på mineralkorn, avhenge av hvordan skiferen forvitrer og særlig om forvitringen øker kontaktarealet mellom sulfider og oksygen, se.

I Elnesformasjonen er syredannende forvitring begrenset til korte avstander fra sulfidmineralkornet (Figur 7a). I Alunskiferformasjonen vil hele skiferflaten utsettes for lave pH verdier (Figur 7c, hele flaten er dekket av Fe^{3+} sulfater). Tøyenformasjonen (Figur 7b) har ikke sulfidene finfordelt på samme vis som i Alunskiferformasjonen. Syredannende forvitring vil derfor gå langsommere og i kort avstand fra sulfidene dannes det Fe-oxhydroksider.



Figur 7 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 $\text{pH} > 5$, mens gul farge indikerer $\text{pH} < 4$.

3.2.5 Syredannende potensial

Både jern- og svovelinnhold er nøkkelparametere for syredannende bergarter da det er forvitring av sulfidmineralene i bergarter som er årsak til de syredannende egenskapene.

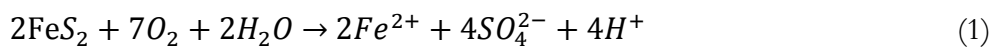
Variasjonene i dannelsesmiljøet og den geologiske historien legger premissene for årsak til og vurdering av de syredannende egenskapene. Syredannende egenskaper hos leirskifer avhenger av hvordan bergarten forvitrer og særlig om forvitringen øker kontaktarealet mellom sulfider og oksygen, som tidligere omtalt. Det er omfanget av syredannelse som

bestemmer hvor mye en bergart lekker ut til omgivelsene og som avgjør om en leirskifer 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 (Fe) bundet i sulfidmineralene og frigjøres i vannløselig form (sulfater) ved forvitring av mineralene.

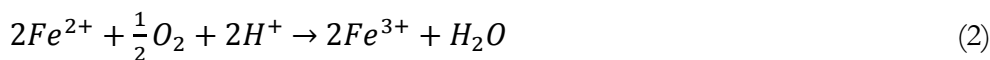
Oksidasjon av pyritt

Det syredannende potensialet i leirskifer skyldes i hovedsak pyritt (FeS₂) og pyrrhotitt (Fe_(1-x)S, hvor x=0-0,17). Oksidasjonen av pyritt skjer normalt på to måter avhengig av hvilke elektronakseptorer som foreligger (Evangelou and Zhang, 1995):

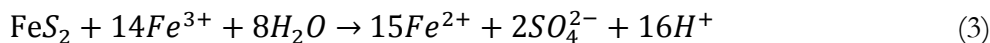
- Direkte oksidasjon med oksygen



Toverdig jern, Fe(II), kan oksideres videre til treverdig jern, Fe(III)



- Indirekte oksidasjon med treverdig jern, Fe(III)



Hvis pH blir lav nok (pH < 3,5), vil Fe(III) fungere som den viktigste elektronakseptoren i oksideringen av pyritt og den direkte oksidasjonen hemmes i stor grad. Når den indirekte oksidasjonen er initiert, vil genereringen av sur avrenning øke raskt, noe som kan resultere i en svært lav pH.

3.2.6 Svellepotensial

Når sulfider forvitrer og det dannes nye sulfatmineraler vil det medføre en volumutvidelse, da de nye sulfatmineralene krever større volum enn de opprinnelige sulfidmineralene. Dersom de nye sulfatmineralene kan vokse, vil volumutvidelsene kunne gi skader på bygningskonstruksjoner. Sulfatmineraler er vannløselige og leirskiferen kan derfor ikke swelle når den er vannmettet. Mineralene vil vokse ved relativ fuktighet på mellom 20 og 70 %. I tillegg bidrar leirmineraler som smekitt og vermikulitt også til svelletrykk.

Alunskifer har eksempelvis større svellepotensial og kan utvikle et større svelletrykk enn f.eks. Galgebergskifer og Elnesskifer. Dette skyldes en større spaltbarhet og tettheten på spalteplan.

4 Metode for identifisering og karakterisering av syredannende bergarter

De ulike syredannende bergarter har ulike egenskaper og forurensningspotensiale. Det har stor nytteverdi å kunne identifisere bergartstype i forbindelse med planlegging og prosjektering av byggeprosjekt, både nybygg og rehabilitering. Generelt gjelder dette alle typer tiltak og inngrep i grunnen. Identifisering av bergartstype gjøre det mulig å forutse egenskaper og potensielle problemer ved planlagt aktivitet. Eksempelvis om et byggeprosjekt bygges i grunn der det er Elnesskifer, vet man at Elnesskifer kan ha et svellepotensiale, den har lav mekanisk styrke og den har moderate radonproduserende potensial (Tabell 1).

Fremgangsmåten består av:

1. Geologisk kart
2. Geologisk kartlegging i felt
3. Prøvetaking
4. Geokjemiske analyser
5. Tolkning av resultater

4.1 Geologisk kartgrunnlag

Geologiske kart gir informasjon om hvilke bergarter en kan forvente å påtreffe i grunnen. Det er to viktige kartserier som ligger til grunn, 1:50.000 serien og 1:250.000 serien. Kart kan bestilles hos Norges geologiske undersøkelser (NGU). I tillegg inneholder nettstedet ngu.no informasjon om berggrunnen.

4.2 Geologisk/ ingeniørgeologisk kartlegging i felt/byggeplass

Mektigheten (tykkelsen) på de ulike bergartstyper/skiferhorisonter kan være for liten til at de kan vises på berggrunnsgeologiske kart. Kartlegging bør derfor inngå som en del av vurderingsgrunnlaget.

Type prosjekt og prosjektets størrelse og utstrekning avgjør behov og omfang for en geologisk og ingeniørgeologisk kartlegging. En slik kartlegging i felt/byggeplass skal avklare hvordan ulike bergarter opptrer i grunnen og danne grunnlag for å vurdere behov for prøvetaking og hvordan prøvetaking bør gjennomføres.

4.2.1 Tunneler og undergrunnsanlegg

For tunneler og undergrunnsanlegg må en avklare hvilke leirskifertyper som kan påtreffes i tunneltraséen. Her vil det være riktig å bruke kunnskap en får gjennom den geologiske forståelsen til å velge ut punkter i overflaten for kjerneboring ned til traséens nivå. En kartlegger da (logger) kjernen(e) for en bedre forståelse og tolkning av hvordan ulike

bergarter kan påtreffes i traséen. Under driving av tunnel gjøres kjerneboring og logging foran stoff.

4.2.2 Masseutskifting

Ved grøfting kan det krysses flere ulikeleir skifertyper. Dette bør avklares for å sikre at en gjør de riktige vurderingene ved valg av tiltak i forbindelse med planlegging og gjennomføring.

Ved stort behov for masseutskifting som for eksempel idrettsbaner eller liknende, kan en grave striper på tvers av skiferlagenes orientering for å få et representativ prøvegrunnlag. Ved større byggeproper stilles det strengere krav til kartleggingen.

4.2.3 Rehabilitering

Rehabilitering av eksisterende bygninger/konstruksjoner viser vanligvis skader forårsaket av svelletrykk og/eller surt miljø som har tæret på og svekket bygningskonstruksjoner og særlig avløp. Ved slike arbeider må en kartlegge skadeomfang på bygningen og avløp/rør i grunnen. Rehabiliteringsarbeider forutsetter tett samarbeid med andre faggrupper og utførende, da en må avdekke en tilstand før en kan bestemme typer av tiltak.

4.3 Prøvetaking og metoder

Prøvetaking skal sikre at en har et tilstrekkelig antall prøver for en identifisering av bergartstype og vil variere fra prosjekt til prosjekt. Det er forståelsen av hvordan lagene er orientert i grunnen som avgjør hvordan en planlegger et prøveprogram. Ved prøvetaking er det viktig at plassering av prøve/observasjonspunkter blir godt identifisert med posisjon.

Det er visse karakteristiske trekk ved utseendet til de ulike leirskifere som kan benyttes til å kjenne igjen en leirskifertype. Tidligere har en sort strek ved riping med kniv eller liknende blitt benyttet for å identifisere Alunskifer. Sort strek er ikke en sikker identifisering av Alunskifer da det er flere leirskifertyper som kan ha sort strek. Det har også stor betydning om en betrakter en naturlig terrengflate, en nylig utsprengt byggeprop eller skjæring og på hvilken skala en gjør observasjonene. Visuelle trekk alene anbefales ikke som dokumentasjon av leirskifertype. Koblinger av flere karakteristiske trekk vil gi større sikkerhet for å identifisere ulike leirskifertyper.

Følgende må utføres for å sikre et godt grunnlag for identifisering av svart leirskifer i felt:

- Orientering på skiferlagene må kartlegges
- Tykkelse på aktuelle skiferhorisonter/bergartslag bør være kjent. Det er stor variasjon i tykkelse på de forskjellige formasjonene (Tabell 3)
- Geologisk befaring av område vil gi forståelse av den geologiske historien og danne grunnlag for vurdere skifrenes utbredelse i byggeprop og i omkringliggende områder.

For av skaffe frem informasjonen kan ulike prøvetakingsmetoder brukes.

4.3.1 Kjerneboring

En riktig planlagt kjerneboring vil gi best informasjon. Kjerneboring gir hel kjerne som kan inspiseres og tolkes (Figur 8). En kan da ta ut utvalgte lengder til videre analyse. Kjerner gir også informasjon om lagenes orientering.



Figur 8 Kjerneprøver fra kjerneboring. Øverste fire kjerner er Galgebergskifer (3b6) og nederste seks kjerner er Hukskifer (3c).

4.3.2 Prøvetaking med fjellborerigg

En praktisk og enklere måte å ta prøver kan være å bruke en fjellborerigg. Borekaks som samles opp for eksempel for hver meter boret lengde ned til ønsket nivå vil gi en viss informasjon om lagene i berggrunnen. Denne metoden vil medføre omblanding av materialet som kan gjøre identifisering av lagdelingen mer usikker.

4.3.3 Prøvetaking med gravemaskin

Prøvetaking med assistanse fra en gravemaskin kan være praktisk der det er overdekning av løsmasser og graveplan skal etableres omtrent i nivå med eksisterende kote for bergoverflaten. En graver da opp et profil. Bredde på profil tilpasses gravedybde. Orientering på graveprofilen skal være mest mulig vinkelrett på skiferlagenes orientering. En må være oppmerksom på at løsmasser som ligger over skifer kan være forvitret skifer. Maskinfører trenger ikke legge merke til dette, da konsistens for graving minner om jordmasser.

4.3.4 Prøvetaking med håndholdt slagdrill

På forvitrede flater kan det være praktisk å benytte en *håndholdt slagdrill*. Borets diameter bør minimum være 18-20 mm og lengde 200-300 mm. De første centimeter skal ikke med i analysematerialet som samles da dette kan være forvitret materiale (forvittringshud). Borekakset (pulveret) samles i en plastpose. Eventuelle fargeendringer og forandringer i borebarhet skal registreres underveis.

4.3.5 Prøvetaking med hammer og liknende

Hammer, kniv og liknende utstyr kan være egnet til prøvetaking. Dette gjelder særlig der det er friske flater. Valg av prøvetakingspunkter er viktig å vurdere da det kan være variasjoner over korte avstander.

4.3.6 Vannprøver

Vann i kontakt med skifer vil gi informasjon om skifertype og skiferens forvittringsgrad og –forhold. Dette er spesielt tydelig når vann er i kontakt med Alunskifer som forvittrer. Vannet kan se klart ut, men pH kan være < 3 og konsentrasjoner av tungmetaller, aluminium og uran kan være svært høye (Vedlegg C, Tabell C3).

4.3.7 Uttak av prøver/representativitet

Et tilstrekkelig antall prøver vil variere fra prosjekt til prosjekt. Det vesentligste ved vurdering av uttak av prøver er en forståelse av geologien for det aktuelle området, og lokale variasjoner. Hensikten med prøvetakingen er viktig å avklare før endelig program bestemmes, for denne avklaringen kan ha store konsekvenser for design av flere aspekter i et prosjekt.

Generelt gjelder at jo mindre prøven er jo flere må en ta for å få en representativ beskrivelse. Små prøver vil gi større usikkerhet i den representative analysen. Selv i Alunskiferformasjonen er det kalkrike horisonter. Om prøvematerialet tas i en slik kalkrik horisont, vil analysen ikke vise tegn på syredannende egenskaper. Om en inkluderer alle hoved- og sporelementer, vil denne kalkrike horisonten kunne kobles til Alunskiferformasjonen. Det er med andre ord viktig at den som utfører prøvetaking innehar kunnskap om hva en tar prøve av og feilkilder ved valgt metodikk.

4.4 Analyser

4.4.1 Kjemisk analyse

Kjemiske analyser danner grunnlaget for identifisering og karakterisering av syredannende bergarter. Når prøver er valgt ut skal disse sendes til et laboratorium for kjemisk analyse. Analysen skal inkludere hoved- og sporelementer, uorganisk karbon (TIC), organisk karbon

(TOC), uran (U) og thorium (Th). Oversikt over grunnstoffer og andre forbindelser som skal analyseres er vist i Tabell 4. Normal analysetid er ca. 5-10 virkedager, avhengig av analyselaboratorium og pris. Analysen gir grunnlag for vurdering av syredannende potensiale, radonrisiko og forurensningsrisiko. Analysen kan gi støtte til identifikasjon og karakterisering av leirskifertype.

Tabell 4 Kjemisk analyse av bergarter med hoved- og sporelementer, uorganisk karbon (TIC), og organisk karbon (TOC).

Element	Hovedelement (H) Sporelement (S)	Analysemetode	Deteksjonsgrense/ enhet
Tørrstoff	-	Gravimetrisk	%
TIC	-	Kolometrisk	0,01%
TOC	-	Kolometrisk	0,01%
Glødetap (LOI)	-	Gravimetrisk	%
Si /Silisium)	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Al/ Aluminium	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Ca/Kalsium	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Fe/Jern	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Mg/Magnesium	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Na/Natrium	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
K/Kalium	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Ti/titan	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Mn/Mangan	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
P/Fosfor	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
As/Arsen	S	ICP- (MS/OES/AES)	3 mg/kg TS
Barium	S	ICP- (MS/OES/AES)	2 mg/kg TS
Beryllium	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,5 mg/kg TS
Cd/Kadmium	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,1 mg/kg TS
Co/Kobolt	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,08 mg/kg TS
Cr/Krom	S	ICP- (MS/OES/AES)	10 mg/kg TS
Cu/Kopper	S	ICP- (MS/OES/AES)	1 mg/kg TS
Hg/Kvikksølv	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,01 mg/kg TS
Mo/Molybden	S	ICP- (MS/OES/AES)	5 mg/kg TS
Nb/Niob	S	ICP- (MS/OES/AES)	5 mg/kg TS
Ni/Nikkel	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,5 mg/kg TS
Pb/Bly	S	ICP- (MS/OES/AES)	1 mg/kg TS
S/Svovel	H	ICP- (MS/OES/AES)	80 mg/kg TS
Sc/Scandium	S	ICP- (MS/OES/AES)	1 mg/kg TS
Sn/Tinn	S	ICP- (MS/OES/AES)	20 mg/kg TS
Sr/Strontium	S	ICP- (MS/OES/AES)	2 mg/kg TS
V/Vanadium	S	ICP- (MS/OES/AES)	2 mg/kg TS
W/Wolfram	S	ICP- (MS/OES/AES)	50 mg/kg TS
Y/Yttrium	S	ICP- (MS/OES/AES)	2 mg/kg TS
Zn/Sink	S	ICP- (MS/OES/AES)	4 mg/kg TS
Zr/Zirkon	S	ICP- (MS/OES/AES)	2 mg/kg TS
U/Uran	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,03 mg/kg TS
Th/Thorium	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,1 mg/kg TS

4.4.2 Håndholdt XRF

Håndholdte røntgen fluoresens (XRF) instrumenter gjør det mulig å bestemme elementinnhold i prøvematerialet direkte i felt. Håndholdte XRF-instrumenter har ulike spesifikasjoner og eksisterer i flere modeller og fabrikater. Ved riktig bruk kan de gi kvantitative analyser av innhold av flere elementer, med unntak av karbon. XRF-instrumenter vil heller ikke kunne måle TIC, men konsentrasjonen av Ca vil indirekte indikere mengde karbonater som utgjør hovedbestanddelen av TIC. Generelt gjelder at tunge grunnstoffer gir sikrere analyseresultater enn lette grunnstoffer. Skal håndholdte XRF-instrumenter benyttes til kvantitative analyser må det enkelte instrument være kalibrert mot sikre kjemiske analyser. Dette hindrer systematiske feil. Det må følges faste prosedyrer for utførelse av analyser i felt for å minimalisere tilfeldige feil.

4.4.3 Utlekkingstester

Utlekkingstester går ut på at skiferprøven ristes med vann i et døgn og vannkjemien analyseres deretter. Resultatene gir bare et øyeblikksbilde og et usikkert bilde av forvitringsgrad og har derfor begrenset verdi. Utlekking kan også måles i en kolonnetest der vannet pumpes gjennom massene i løpet av flere uker. Utlekkingspotensial kan nærmere vurderes ved å sammenligne utlekkingsresultater fra synlig uforvitret og forvitret leirskifer. Dette vil kunne gi en antydning hva som vil kunne skje på lengre sikt ved for eksempel deponering av masser som per i dag betegnes som uforvitret eller etablering av drenerte byggeløsninger i svarte leirskifer. Det skal i så tilfelle analyseres for parametre for avfallskarakterisering beskrevet i Avfallsforskriften.

4.5 Mineralidentifikasjon

For en mer detaljert og mer presis vurdering av leirskifernes egenskaper, vil en mineralidentifikasjon ved hjelp av røntgen diffraksjonsanalyse (XRD) gi verdifull informasjon. En vil da få en vurdering av hvilke mineraler leirskiferen består av og samtidig en omtrentlig mengde av de ulike mineralene. Det er visse nøkkelmineraler som er viktige å identifisere. Sulfatinnhold gir verdifull informasjon med hensyn til forvitringsgrad, forvitringsegenskaper og svulleegenskaper.

4.6 Tolkning av analysedata

4.6.1 Generelt om metode for identifisering og karakterisering

Identifiseringen av bergartstype og skiferhorisonter gjør at man direkte kan identifisere de forventede egenskaper til materialet. For å kunne identifisere og karakterisere bergartstyper nærmere er det utviklet en metode basert på å gjenkjenne kjemiske fingeravtrykk til bergarten. I forbindelse med denne veiledningen er det fokusert på tolkningsmetoder som gjør det mulig å skille mellom bergarter som er:

- **Sikkert syredannende** og trenger spesiell håndtering.
- **Ikke syredannende** og kan disponeres fritt.
- **Mulig syredannende** og krever nærmere karakterisering og vurdering.

De ofte avanserte tolkninger som er nødvendige for å vurdere **mulig syredannende** bergarter ligger utenfor målsetningen til denne veilederen.

Tolkningen av de kjemiske analysene består av følgende ledd:

- AP/NP diagram (acidification potential/neutralisation potential) som gir et bilde av bergarters syredannende potensiale
- Jern (Fe) – svovel (S) diagram som gir informasjon om forholdet mellom jern og svovel. Dette forholdet forteller om jern kan sitte bundet i andre mineraler enn sulfider, og dermed også om hvor andre tungmetaller kan være bundet.
- Trekant diagrammer som viser relativt elementinnhold i forhold til referanse bergarter. Dette er avanserte tolkningsmetoder som vil være avgjørende for å identifisere **mulig syredannende bergarter**.

Samlet gir disse tre diagram-typene god informasjon om syredannende bergartstyper. Dette er nærmere omtalt i det følgende.

4.6.2 AP-NP diagram

Syredannende potensial (AP=Acidification potential) vurderes i forhold til nøytraliserende potensial (NP=Neutralisation potential). Metoden baserer seg på målte konsentrasjoner av TIC (uorganisk karbon) og S (svovel) i bergarten (Lawrence and Wang, 1997). Konsentrasjonene av TIC og S regnes om til mengde kalsium karbonat (CaCO_3) i kg/tonn som foreligger i bergarten i forhold til potensiell mengde CaCO_3 som er nødvendig for å nøytralisere den potensielle mengden syre som kan dannes. All 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.

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

$$\text{NP} = 83,33 \times \% \text{TIC} \quad (6)$$

Hvor

NP: Nøytraliserende potensial av karbonater [kg CaCO_3 /t]

%TIC: Uorganisk karbon innhold i prosent [-]

Det syredannende potensialet (AP) kan beregnes ved følgende formel:

$$\text{AP} = 31,25 \times \% \text{S}_{\text{sulfider}} \approx 31,25 \times \% \text{S} \quad (7)$$

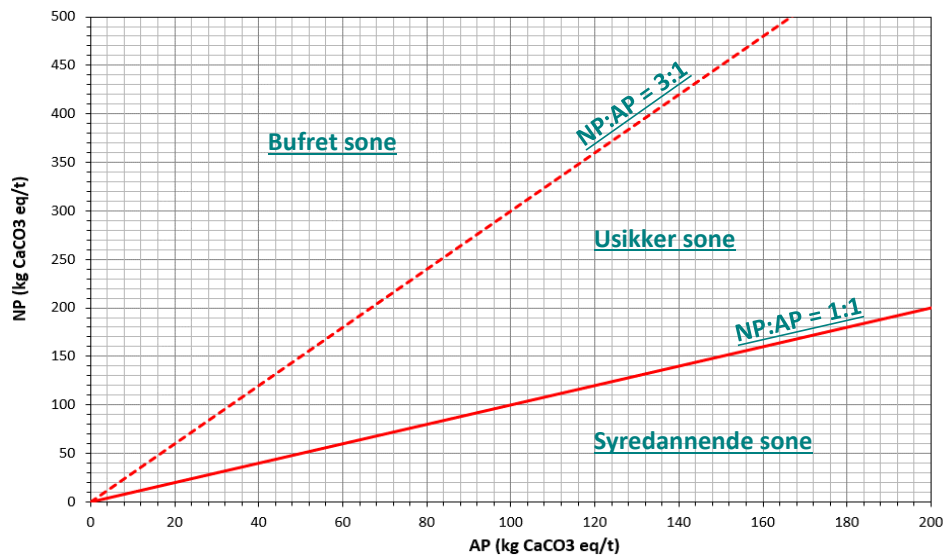
Hvor:

AP: Syredannende potensial av sulfider [kg CaCO_3 /t]

% $\text{S}_{\text{sulfider}}$: Sulfidinnhold i prosent [-]

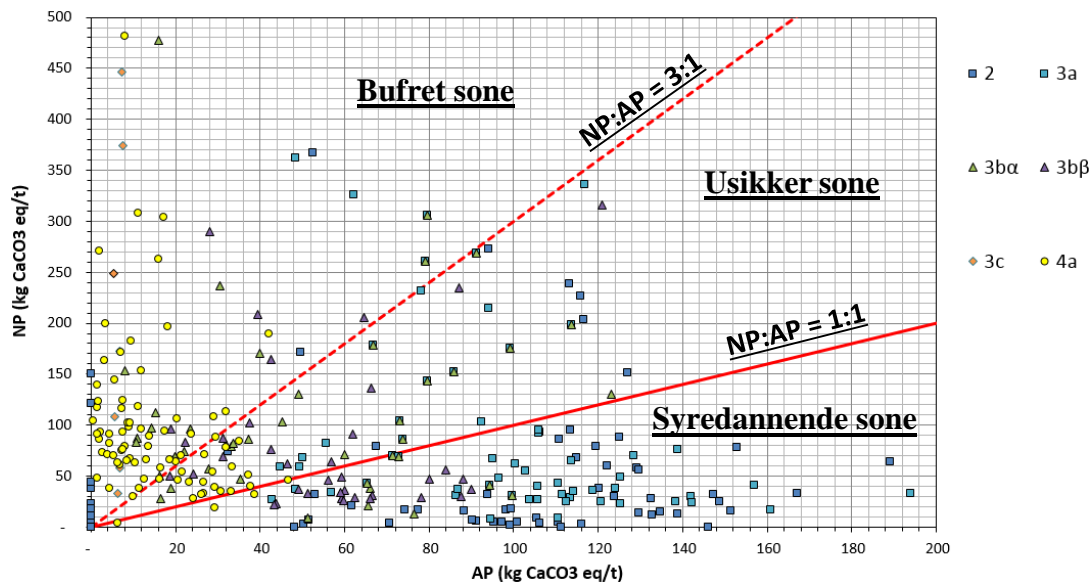
% S: Svovelinhold i prosent [-]

Figur 9 viser et diagram med forholdet mellom AP og NP (begge angitt i kg CaCO₃ per tonn). Det er i diagrammet lagt inn linjer som viser NP:AP forhold på 1:1 og 3:1. Dette deler diagrammet inn i tre soner; syredannende sone (NP:AP < 1:1), usikker sone (1:1 < NP:AP < 3:1) og bufret sone (NP:AP > 3:1).



Figur 9 AP-NP diagram som viser 3 soner: syredannende sone (NP:AP < 1:1), usikker sone (1:1 < NP:AP < 3:1) og bufret sone (NP:AP > 3:1).

Det understrekes at denne vurderingen er basert på forenklinger, og jo lengre vekk en prøve befinner seg fra "Usikker sone" i diagrammet, desto sikrere kan man være på resultatet. Viser resultatene at prøven din befinner seg i eller i nærheten av usikker sone, bør det gjøres nærmere vurderinger for å unngå feiltolkning av bergartens syredannende potensial. Figur 10 viser eksempler på syredannende potensial for skiferprøver fra Oslofeltet, hvor skiferhorisontene ble identifisert i felt. Prøver fra ulike skiferhorisonter grupperer seg i ulike deler av diagrammet, men det er også overlapp mellom horisonter.



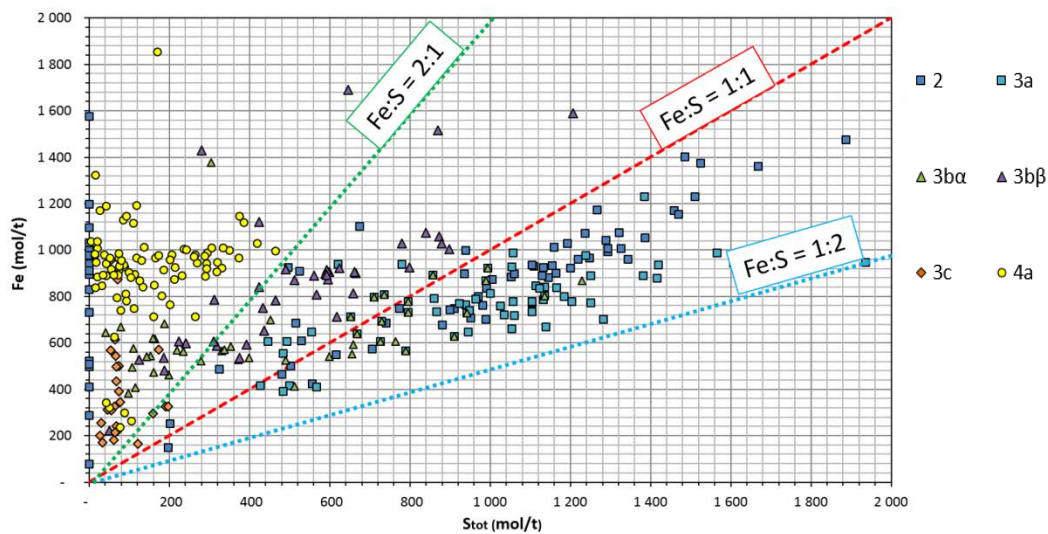
Figur 10 AP-NP diagram som viser eksempler for skiferprøver tatt fra ulike skiferhorisonter i Oslofeltet: Alunskiferformasjonen (2 og 3a), Hagabergformasjonen (3b α), Galgebergformasjonen (3b β), Hukformasjonen (3c) og Elenesformasjonen (4a).

4.6.3 Fe-S diagram

Forholdet mellom jern (Fe) og svovel (S) indikerer om en kan knytte innhold av tungmetaller (sporelementer) 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 være utsatt for den samme oksidasjonseffekten som tungmetaller bundet i sulfider. Ved lav pH (< 4), vil imidlertid også silikatene gå i oppløsning og øke frigjøring av tungmetaller til omgivelsene. En skal være oppmerksom på at enkelte sporelementer (As, Cd, Co, Mo, Ni, Sb, U og Zn) også kan frigjøres ved nøytrale pH forhold (NRD).

Figur 11 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 Fe og tungmetaller også er bundet i silikater.
- **Fe:S = 1:1** indikerer at alt Fe er bundet som sulfider.
- **Fe:S = 1:2** indikerer pyritt (FeS_2).
- **Fe:S < 1:2** indikerer at S også er bundet i andre mineraler enn sulfider.



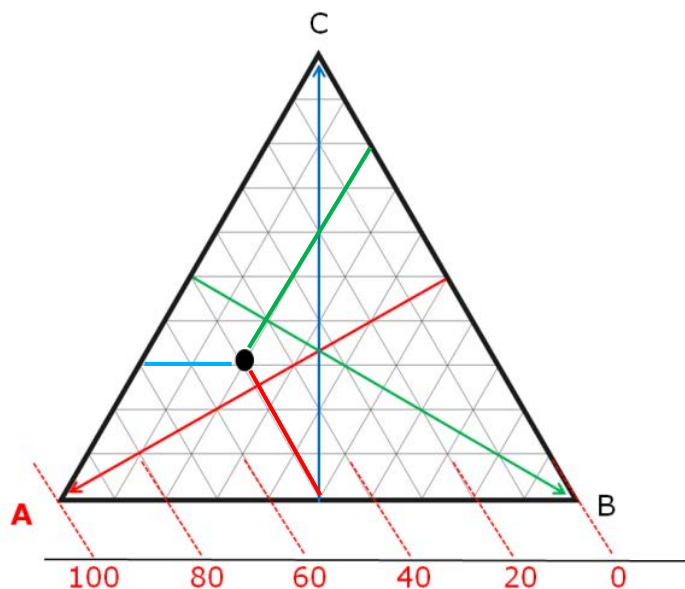
Figur 11 Forholdet mellom Fe (jern) og S (svovel) i mol/t. Denne figuren indikerer i hvilke grupper av mineraler jern og svovel er bundet. Plasseringen av referanseprøver fra Alunskiferformasjonen (2 og 3a), Hagabergformasjonen (3ba), Galgebergformasjonen (3bβ), Hukformasjonen (3c) og Elenesformasjonen (4a) er også vist.

Hovedmengden av Alunskifer plasseres i feltet mellom $Fe:S = 1:1$ og $Fe:S = 1:2$. Dette tyder på at sulfider i en svart leirskifer forekommer som både pyritt (FeS_2) og magnetkis (pyrrhotitt, $Fe_{(1-x)}S$). I prøver fra Alunskiferformasjonen kan det også forekomme at analysene viser en høy andel av svovel i forhold til jern. Om svovelinnholdet (i mol) er høyere enn det er jern til å danne sulfider, må svovel være bundet enten i sulfater, eller som organisk svovel i organisk karbon (TOC) delen.

4.6.4 Identifisering av bergarten ved hjelp av trekantdiagrammer

Bruk av trekantdiagrammer er en relativ avansert tolkningsmetode som krever en god referansedatabase for å gi pålitelige resultater. Trekantdiagrammer konstrueres på følgende måte: En tar konsentrasjoner av tre grunnstoffer og summerer. Denne summen settes så lik 100%. Deretter regner en ut mengde i prosent-vekt for hvert av de tre grunnstoffene og plotter de i et trekantdiagram (Figur 12).

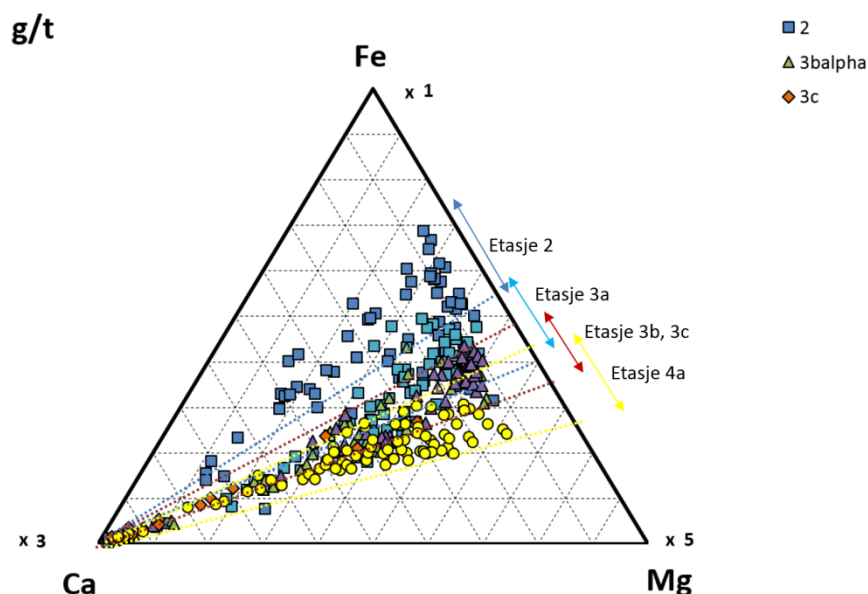
I tillegg til en sammenligning av grunnstoffer kan trekantdiagrammer som omfatter uorganisk karbon (total inorganic carbon, TIC), organisk karbon (total organic carbon, TOC) og S også inkluderes i karakteriseringen.



Figur 12 Prinsipp for trekantdiagram (ternary plot) for "parameterne" A, B og C. Sort sirkel representerer en prøve som inneholder A= 50%, B= 20% og C=30%.

Leirskifere som omtales i denne veilederen er opprinnelig sedimenter avsatt i havet. Leirskifertypenes lagrekke dokumenterer at det har vært store skiftninger i avsetningsforhold, fra oksygenrike (kalkrike leirskifre) til oksygenfattige (svarte leirskifre). Metodikken for å identifisere leirskifertypen benytter kombinasjoner av kjemiske grunnstoffer, som gjenspeiler dannelsesbetingelsene, og den geologiske historien. Noen grunnstoffer kommer fra kilder på land, mens andre grunnstoffer kommer fra kilder i sjøen. Trekantdiagrammer gjør det mulig å vurdere innhold av ulike grunnstoffer i forhold til hverandre. Dette gjør det mulig å konstruere sammenlignbare profiler for de ulike leirskifertypene.

Det må påpekes at det vil være noe overlapp mellom trendene til de ulike leirskiferformasjonene (Figur 13). En pålitelig identifisering krever derfor at en kombinerer resultater fra trekantdiagrammer med ulike sammensetninger av parametere (se Vedlegg C).



Figur 13 Eksempel på trekantdiagram der ulike kombinasjoner av grunnstoffer sammenlignes for å se på sammenfallende egenskaper i prøvene. Diagrammet viser forenklete utviklingstrender for prøver fra Alunskiferformasjonen (2 og 3a), Hagabergformasjonen (3b α), Galgebergformasjonen (3b β), Hukformasjonen (3c) og Elenesformasjonen (4a).

4.6.5 Uraninnhold, radioaktivitet og radonproduserende potensiale

De fleste skiferbergarter med syredannende potensiale har også høyere konsentrasjoner av uran. Uran medfører radioaktiv stråling og produksjon av radon gas. Disse egenskapene må også kvantifiseres ved vurdering av leirskiferprøver.

Analyse for å avklare aktivitet for naturlige forekommende radioaktive elementer (nuklider) kan utføres av IFE (Institutt for energiteknikk) på Kjeller. En skal være oppmerksom på at analysen av total innhold nuklider ikke friskmelder et materiale med hensyn til radonproduserende potensial.

Masser med en total aktivitet på >1 Bq/g defineres som radioaktiv avfall og skal håndteres i henhold til Avfallsforskriftens regelverk for radioaktivt avfall. Uraninnholdet i svarte leirskifre varierer sterkt. Erfaringsmessig indikerer et uraninnhold på >90 mg/kg at en burde måle radioaktiviteten for å avgjøre om den ikke overstiger 1 Bq/g. I forhold til potensial for dannelse av radongass kreves det at aktiviteten til radium-226 i tilkjørte masser, som skal brukes under eller rundt bygninger, ikke overstiger 0,3 Bq/g.

5 Bruk og disponering av syredannende bergarter

5.1 Helsemessige forhåndsregler

Det er viktig å ta hensyn til helsemessige forhåndsregler ved arbeider i og håndtering av syredannende skiferbergarter. Frisk leirskifer vil utvikle mye støv ved boring og pigging. Egnede åndedrettsvern skal derfor benyttes. Forvitret skifer vil inneholde jernsulfater. Jernsulfater og andre sulfatmineraler i forvitret skifer kan betraktes som salter av svovelsyre. Særlig Fe^{3+} sulfater (gule, svovelfargede mineraler) er etsende og kan danne svært sure miljøer med pH ned mot 1. Arbeid med syredannende svarte leirskifer medfører derfor fare for etseskader på hud.

Ved rengjøring og vedlikeholdsarbeider i bygninger med innsig av aggressivt vann og utfellinger av jernsulfater, kan man komme i kontakt med vann med meget lav pH, gjerne ned til pH 2. Dette vannet kan se ut som rent vann, særlig ved så lav pH at jern ikke feller ut. Direkte kontakt med slikt vann kan gi alvorlige etseskader. Vannkjemiske analyser vil legge til rette for forsvarlig håndtering av slikt vann.

5.2 Håndtering av overskuddsmasser

Legger en steinmasser fra Alunskifer i en åpen fylling vil sulfidene i skiferen oksidere til svovelsyre og svovelsyrens mineralsalter (sulfatene). Sulfatene løser ut tungmetaller i avrenningen fra deponiet. Dette gir en giftig avrenning som kan forårsakemiljøproblemer. Slik avrenning vil være brunfarget med utfelling av store mengder rustfarget slam. Avrenningen kan være skadelig nok til å drepe fisk, bunndyr og planter i bekker og vassdrag nedstrøms fyllingen, samt ødelegge lokalt grunnvann. Det er utarbeidet en egen veileder som omtaler lagring og deponering av overskuddsmasser.

5.3 Tilbakefylte masser

Tilbakefylte masser er som regel nedknuste masser. Knusingen gir en betydelig økning i overflateareal og dermed større sannsynlighet for at forvitningsprosesser kan akselereres. Dette vil kunne medføre endring av mekaniske egenskaper (svelle/setning/styrke) og utlekking av metaller. Tilbakefylling av syredannende leirskifer innenfor et anleggsområde anbefales derfor ikke, med mindre tiltak for å hindre helse- og miljørisiko iverksettes.

5.4 Gjenværende masser

Det må alltid vurderes hvor mye av særlig forvitret leirskifer som skal fjernes i et byggeprosjekt. Helst bør det være minst mulig gjenværende forvitrede masser da disse kan forårsake både miljømessige og byggetekniske problemer. Faktorer det må tas hensyn til er

om det er gradienter som f.eks. vannsig gjennom eiendommen. Gjenværende masser må også vurderes for radonproduserende potensiale som kan gi innsig i byggemassene.

5.5 Spesielle hensyn vedrørende radioaktivitet

Aktivitet for naturlige radioaktive nuklider bør også vurderes ved deponering. Prøvetaking og hvordan denne utføres har stor betydning for karakterisering og deponeringsalternativer for overskuddsmasser. Erfaringen viser at uran ikke er jevnt fordelt i leirskiferen, men foreligger som hotspots som ved feiltolkning kan føre til en overvurdering av massenes egenskaper.

5.6 Beskytte omgivelser og konstruksjoner

Følgende momenter er viktige å ta hensyn til ved bygging på svart leirskifer:

- Forurensning til omgivelser fra byggegrop/eiendom
- Indre miljø (radon problemstillinger)
- Levetidsbetraktninger
- Budsjett, kostnader og logistikk.

Konsekvensen av å prosjektere feil løsninger vil være kortere levetid på konstruksjoner og behov for tiltak etter relativt kort tid. Dette vil føre tilproduksjon av overskuddsmasser som igjen krever deponi både av bygningsmaterialer og av forvitret, syredannende leirskifer.

Følgende forhold må ivaretas ved bygging i svart leirskifer for å redusere/hindre uønskede forhold:

- Ikke påvirke grunnvannsspeilet
- Ikke prosjektere drenert løsning
- Radon/oksygen/diffusjonstett sperresjikt under bygget
- Eventuelt impregnering av forvitret skifervolum for å hindre utlekking

5.7 Unngå endring av grunnvannsspeilet

Ved etablering av byggegropen bør man ikke drenere terrenget eller senke grunnvannsspeilet permanent, særlig i urbane/tettbygde områder. Generelt gjelder at i områder med potensielt syredannende bergarter, skal det ikke etableres gradienter som setter i gang grunnvannsig inn i byggegrop. Grunnvannsnivået må identifiseres og opprettholdes under hele byggeprosessen.

I byggeprosjekter bør det stilles krav om at grunnvannsspeilet ikke skal endres. Det er en vanlig misoppfatning at Alunskifer er "pottetett." Det er ikke tilfelle. Når en etablerer høydesprang som skjæringer, byggegroper og tunneler, vil det over tid utvikles et vannsig gjennom Alunskiferen.

5.8 Drenering og grøfter

Grøfter kan sidestilles med etablering av vertikale terrengflater med høydesprang. Grøfter kan krysse eiendomsgrenser og legges gjerne med fall. Grøfter, kan om de ikke konstrueres riktig derfor medføre økt forurensning og miljøbelastninger på annen matts grunn. Grøfter inneholder ofte kostbar infrastruktur. De fleste materialer kan få redusert levetid i det aggressive miljøet som kan oppstå grunnet syredannende bergarter. Materialer av betong og metall vil få redusert levetid. Det er utarbeidet et eget datablad som omhandler utforming av grøfter.

5.9 Tiltak for å unngå inntrengning av radongass i bygg

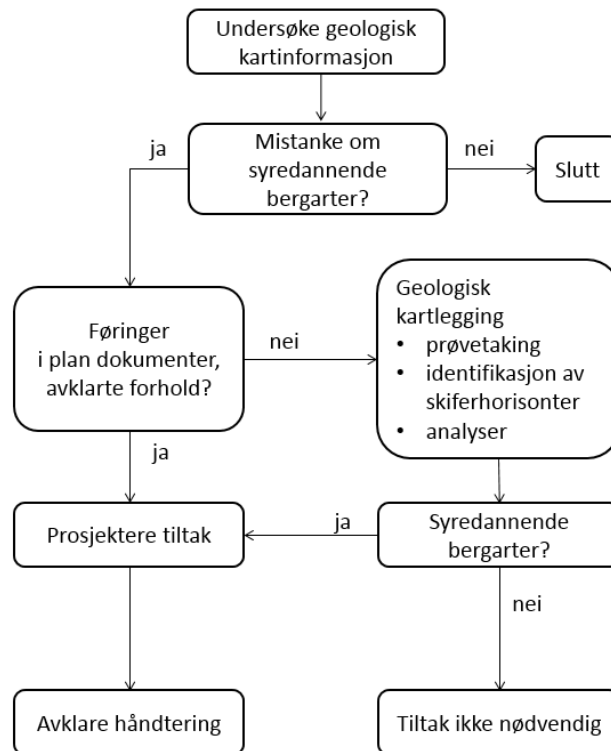
Der det er syredannende (=uranholdige) leirskifre i grunnen må det velges løsninger som ivaretar både forsegling og radonsperre. I byggeprosjekt på syredannende leirskifre anbefales derfor type A membran. Den bør være diffusjonstett og godkjent i henhold til radondiffusjon. Det finnes flere fabrikater av type A membran. En gunstig løsningen er en der membranen fester seg til underlaget. En løst lagt membran kan transportere gass og fukt mellom underlaget og membranen. Slike tiltak burde prosjekteres av en fagkyndig person.

5.10 Fremgangsmåte ved bygg og anlegg

En kan ikke detaljprosjektere hvordan eventuell svart leirskifer i et prosjekt skal håndteres før man har undersøkt den nærmere. Overordnet kan dette avklares tidlig i byggeprosess/prosjektering. Det er imidlertid flere spesifikke forhold som først kan bli avklart ved etablering av byggegrop og uttak av masser. Detaljer med tilpasning kan normalt gjøres først etter at skiferen er avdekket i byggegropa. Følgende prosedyre for undersøkelse og håndtering av svart leirskifer i byggeprosjekter foreslås (Figur 14):

- Undersøke geologisk kartinformasjon
- Avklare føringer i plandokumenter
- Geologisk/ingeniørgeologisk kartlegging
 - prøvetaking
 - identifisering av leirskiferhorisonter (plassering i lagrekke)
 - kjemiske analyser
 - tolkning av resultatene

- Tiltak
 - i byggegrøp for å unngå forurensning til omgivelsene.
 - i byggegrøp for å unngå skader på bygningskonstruksjoner som følge av reaktiv berggrunn.
 - for å unngå inntrengning av radongass i bygg
- Avklare massehåndtering, egnet deponeringsmetode.



Figur 14 Flytskjema for håndtering av svarte leirskifre i byggeprosjekter.

Arealene i en kommune har ulike bruksverdi og – potensial. Det er kommuneplaner som legger føringene for arealbruk. Beskrivelse av berggrunn bør inngå i kommuneplanens arealdel. Kommunen vil da få en bedre bevissthet om forhold som må avklares videre i prosess med utarbeidelse av reguleringsplan/bebyggelsesplan og byggetillatelse. Overordnede føringene også for deponeringsbehov bør inngå i enhver kommuneplan. Deponier er som regel ikke ønsket noen steder.

Kommunen kan da legge inn føringene og rekkefølgebestemmelser for arealer og når i saksbehandlingen forhold skal være avklart og dokumentert. I reguleringsplan bør det avklares om usikkerheten som ligger i kommuneplannivå bør avklares. I dette ligger også avklaringer for eventuelle deponeringsbehov for ulike typer masser, inkludert spesielle deponihensyn for bergarter som kan medvirke til forurensning om de deponeres på feil måte.

I byggesak bør det fremgå at valg av løsninger ikke vil bidra til økt forurensning. Feil løsningsvalg er en vanlig årsak til at eiendommer på særlig Alunskifer lar vannsig fra eiendommen ledes ut, enten til omgivelsene/naboeiendommer eller ut på det offentlige ledningsnettet.

Utbyggingsprosjekter for veg og bane er ofte prosjekter som båndlegger store arealer, gjerne på tvers av flere kommuner, og som kan produsere betydelige mengder overskuddsmasser. Det bør stilles krav til konsekvensanalyser, som inngår i tidlige faser, for at massebalanse for ulike massetyper (bergarter og jordarter) utføres. Det er ikke tilstrekkelig å anta at massene i linjen kan gjenbrukes.

6 Katalog over syredannende bergarter i Norge

6.1 Aktuelle informasjonskilder

Den mest detaljerte informasjon vi har som kartgrunnlag er Norges geologiske undersøkelses (NGU) berggrunnsgeologiske kart i målestokk 1:50.000. Deretter følger berggrunnsgeologiske kart i 1:250.000. NGU sin nettsider (www.ngu.no) inneholder informasjon fra både 1:50.000 serien og 1:250.000 serien. Papirkartene har imidlertid den fordel at de kommer med tegnforklaring. Det anbefales å skaffe kart fra disse kartseriene over aktuelle områder for nærmere avklaringer.

Andre kartutgivelser med geologisk informasjon er radonkart utgitt av Statens Strålevern og NGU i fellesskap. En bør i tillegg se på kvartærgeologiske kart som viser type overdekning.

6.1.1 NGUs databaser på www.ngu.no

Nettstedet til Norges geologiske undersøkelser (NGU) har flere kartfunksjoner. Kartfunksjonen "Berggrunn" gir en oversikt over tilgjengelig kartmateriale. Her kan en også gjøre en første vurdering.

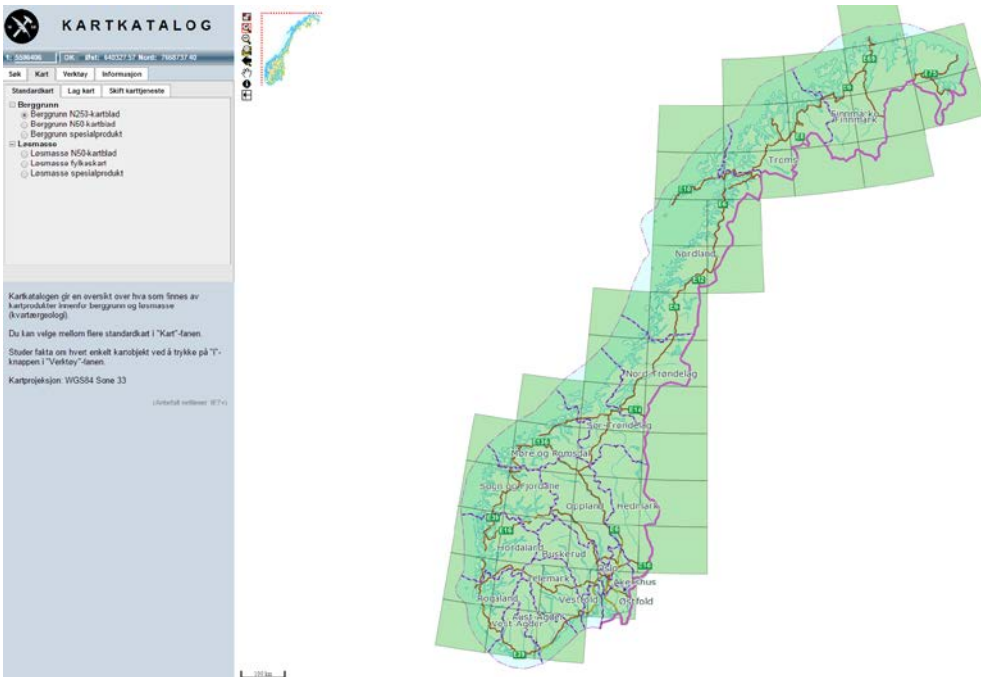
I visningsbildet er en informasjonsknapp. Ved å trykke "i" (informasjon) kommer det frem et vindu med informasjon om objektet som er klikket på. Om det fremkommer tekst med kambro-ordovicisk eller kambro-silur, så er det bergartslag i dette objektet som kan være svarte leirskifre, som Alunskifer og Galgebergskifer. Mot vest er gjerne fyllitter /gråvakker bergarter som kan være omdannede (mer metamorfe) kambro-ordoviciske leirskifre. Ord som pyritt og grafitt kan her indikere svarte leirskifre som på Østlandet kan karakteriseres som syredannende.

Hele Norges berggrunn er for tiden ikke dekket på nettstedet ngu.no i 1:50.000 skala. Områder en kan finne informasjon om berggrunn for er vist i Figur 15. Skraverte rektangler viser kartblad i 1:50.000 serien som er kartlagt. For arealer som er hvite i Figur 15 må en innhente informasjon fra berggrunnsgeologiske kart i 1:250.000 serien (Figur 16).

Per 2014 inneholder ikke nettstedet ngu.no tilstrekkelig detaljert informasjon om hvor det er svart leirskifer / Alunskifer med syredannende egenskaper.



Figur 15 Utsnitt av Sør Norge som inneholder informasjon om berggrunnen. Rutene i kartet tilsvare kartblad 1:50.000 serien. For hvite arealer i kartutsnittet må en fremskaffe informasjon om berggrunnen fra berggrunnsgeologiske kartblad i den landsdekkende 1:250.000 serien.



Figur 16 Den landsdekkende 1:250.000 serien av berggrunnsgeologiske kartblad. Grønne rektangler viser inndelingen av kartbladene

6.1.2 Kartblad i 1:250.000

Landsdekkende geologiske kart over berggrunnen i Norge er gitt ut i en skala på 1:250 000 av NGU. Berggrunnskartene gir en oversikt over forekomsten av bergarter i de forskjellige kartbladene. Kartene inneholder også bergartsbeskrivelser hvor de viktigste geologiske prosessene (alder, avsetning, omdanning, etc.) er nevnt. På grunn av målestokken vil bergarter og lagdelinger med begrenset utbredelse ikke komme tydelig fram.

Kartblad hvor svart leirskifer/mørk grå leirskifer er inntegnet er for eksempel i Haugesund, Lillehammer og Saltdal. Alunskifer er nevnt som en egen bergart i kartbladene Hamar, Oslo, Sauda og Skien. Utbredelsen innenfor hvert kartblad er sterkt varierende.



Figur 17 Utsnitt fra berggrunnsgeologisk kartblad 1:250000 Odda (NGU). Mesteparten av de grønne feltene er fra kambro-silur.

Tabell 5 beskriver skiferhorisonter og geografiske navn på enheter der disse opptrer. Merk at det er stedvis lokale navn som benyttes i stedet for skifertype. Tabellen viser et utdrag av informasjon en bør se etter når en studerer berggrunnskartene. Bergartsbeskrivelsen i tabellen er skifer, grå og svart. Tidsperiode opplyser *senprekambrium*, som tilsvarer *eokambrium*. I kommentarfeltet nevnes hvilke enhet bergarten tilhører. Her er de knyttet til dekker. Dekker er per definisjon bergarter som er skjøvet dit de nå kan observeres. Bergarter og sekvenser av bergarter som er skjøvet fysisk til nåværende posisjon kalles *alloktone*, mens bergarter som ikke er fysisk skjøvet men er i den posisjon der de ble avsatt kalles *autoktone*.

Tabell 5 Eksempler på Alunskifer og svart leirskifer beskrevet i 1:250 000 berggrunnskartblad.

Navn på kartblad	Bergarts-beskrivelse	Tidsperiode	Kommentarer*
Hamar	Mørkegrå skifer	Senproterozoikum til kambro-ordovicium	Synnfjelldekket (22)
Hamar	Alunskifer, skifer	Kambro-silur	Os-Rødekkekomplekset, Oslofjordovergruppa, kontaktomdannede bergarter ikke delt inn i gr eller fm. Alunskifer (27) annen skifer (24, 25, 26)
Hamar	Alunskifer, skifer	Mellomkambrium til tidligordovicium	Os-Rødekkekomplekset, Oslogruppa, Alunskifer (49, 50 (Alunskifer fm)) annen skifer (37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45 (Elnes fm), 46, 48 (Tøyen fm))
Haugesund	Leirskifer, mørk grå, graptolittførende	Tidligsilur	Hardangerfjorddekket, Vikanes fm (15). Bømlo
Haugesund	Svartskifer	Mulig ordovicium	Lyklingfjordenheten (46)
Haugesund	Svartskifer	Tidligordovicium	Søre Lyklingholmenheten (47). Øygrupper ved/V for Bømlo
Lillehammer	Skifer, grå og svart	Senprekambrium	Synnfjelldekket, Vangdåsfm/Dalselvf (53)
Oslo	Alunskifer	Kambrium-ordovicium	Sedimentære bergarter (43). Oslo sentrum, Skøyen, Slemmestad
Saltdal	Svartskifer	Kambrium-ordovicium	Stedegne omdannede bergarter, Skertasfm (109)
Saltdal	Grafittførende svartskifer og kvartscerisittskifer	Kambrium-ordovicium	Gargatisdekket, Mierkenisgr (88)
Sauda	Alunskifer	Kambrium-ordovicium	Autoktone bergarter. Haukeli, Grønafjell
Skien	Skifer, alunskifer	Kambrium-ordovicium	Oslofeltes kambrosilurske bergarter. Øst i kartbladet (Porsgrunn, Skien, Kongsberg, Eikeren)

* Numre refererer til referansenummer til bergarten i kartbladet
 Fm - formasjonen

Tabell 5 viser en annen viktig informasjon: *Tidsperiode*. I alle kartbladene det refereres til i tabellen er det beskrevet bergarter fra kambrium-ordovicium. Av det kan en slutte at i tidsperioden kambrium ble det avsatt sedimentære skifer over store deler av landet. Men en skal være oppmerksom på at de senere geologiske hendelser har påvirket Alunskiferformasjonen og Tøyenformasjonen (kambrium/tidlig ordovicium) i forskjellig grad (trykk, temperatur, kjemisk påvirkning, deformasjon med mer).

Alunskiferformasjonens skifre vil ha forskjellig utseende i Osloregionen, Sørvestlandet, Trøndelag og Saltdal.

Tabell 5 er ikke uttømmende, men gir et innblikk i de stikkord som er knyttet til svarte leirskifre i berggrunnskartene. Kartene er satt sammen av flere personer over et lengre tidsrom. Det er derfor variasjoner mellom kartbladene. Videre var ikke inndelingen i skyvedekker etablert like detaljert alle steder i landet.

Da den kaledonske fjellkjededannelsen utgjør en sentral del i Norges geologi, er ofte bergartsenhetene knyttet til skyvedekkene (alloktone enheter).

Videre er en del av sedimentlagrekken i kambro-silur bygget opp av tynne lag som ikke kan skilles ut i kartene. Derfor er flere opprinnelige svarte og grå og kalkrike leirskifre slått sammen i disse kartbladene.

6.1.3 Kartblad i 1:50.000

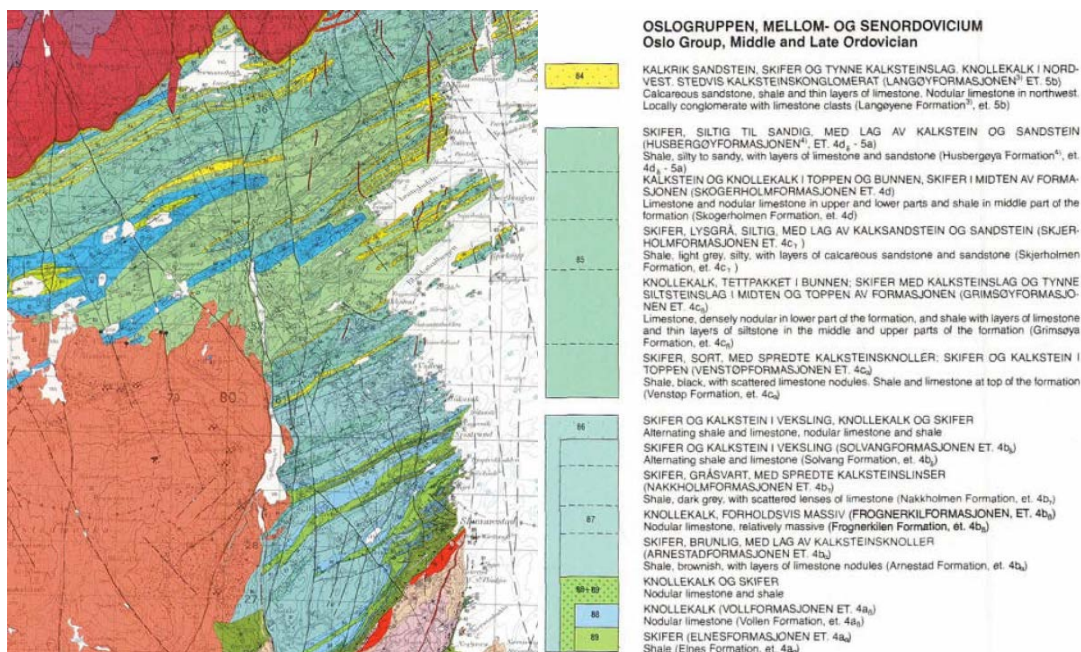
Berggrunnsgeologiske kart i 1:50.000 fra NGU inneholder den mest detaljerte informasjonen om berggrunnen. Flere leirskiferformasjoner er så tynne at de ikke kan vises i kartmålestokken 1:50.000 (se Tabell 3). Av den grunn er flere formasjoner slått sammen i enheten "gruppe". Disse sammenslåtte gruppene er gitt navn som for eksempel Røykengruppen i Oslo området. De geologiske kartene er produsert over et tidsspenn. Navngiving og inndeling i grupper er derfor ikke gjennomført for alle kart. Dette fremkommer i kapitlene 6.2 til 6.8 hvor det vises kartutsnitt fra ulike deler av landet.

6.2 Oslo og omegn

For å danne seg et bilde av hvor en finner kambrisk/ordovicisk svart leirskifer kan en se på kartblad 1814 Asker i NGU 1:50.000 berggrunnsgeologiske kart, se utsnitt i Figur 18. Her er skiferlagrekken fra tidsepoken kambrium-ordovicium (ca. 550-450 millioner år siden) inndelt i to hovedgrupper, Røykengruppen og Oslo gruppen.

Informasjonen i kartet (Figur 18) skal leses slik:

- Røykengruppen (i dette kartet vist med olivengrønn bunnfarge) inneholder de to viktigste syredannende svarte leirskiferhorisontene. Røykengruppen har i kartet tre ulike skravurer/farger, som er nummerert 90, 91 og 92.
- 89 Lysere olivengrønn farge uten skravur: 4a Elnesformasjonen.
- 90 Olivengrønn bunnfarge: (Etasje 1 – 3c). Arealer i kartet med olivengrønn bunnfarge kan inneholde leirskifer både fra gruppe 91 og 92, da skifertypene kan veksle på en skala som er for fin til at den kan vises i 1:50.000 kartet, eller at kartlegging ikke var mulig i nødvendig skala.
- 91 Blå bunnfarge: Etasje 3c (Hukformasjonen).
- 92 Olivengrønn bunnfarge med prikker: (Etasje 1 – 3b) Alunskiferformasjonen og Tøyenformasjonen (Hagabergskifer og Galgebergskifer).



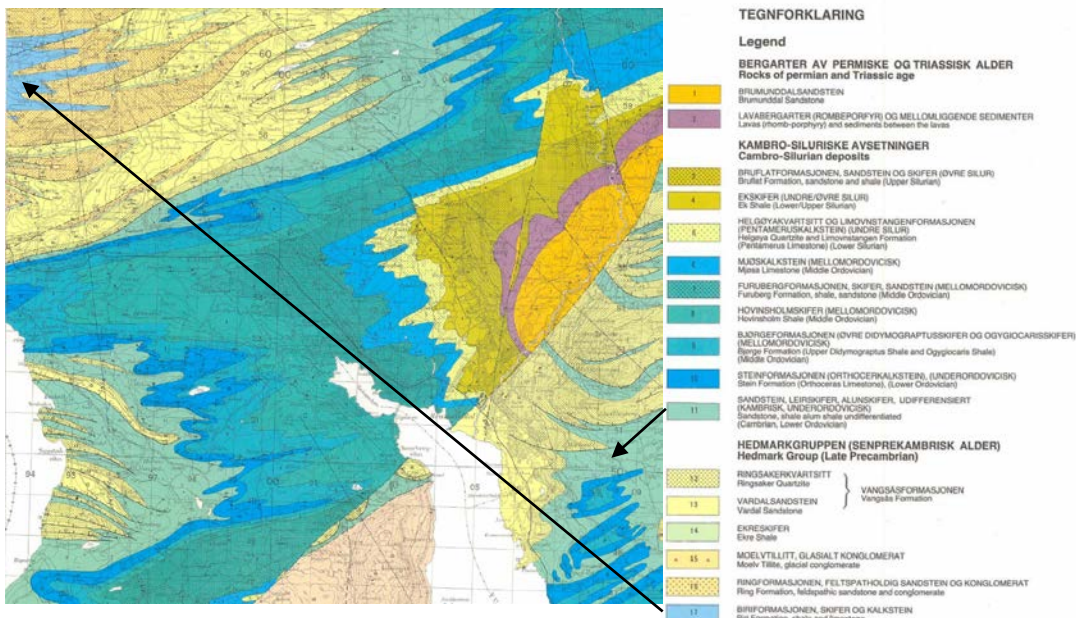
Figur 18 Utsnitt fra berggrunnsgeologisk kartblad 1:50.000 Asker (NGU).

6.3 Hamar regionen

6.3.1 Kartblad Hamar

Tegnforklaringen i kartblad Hamar (Figur 19) skal leses slik:

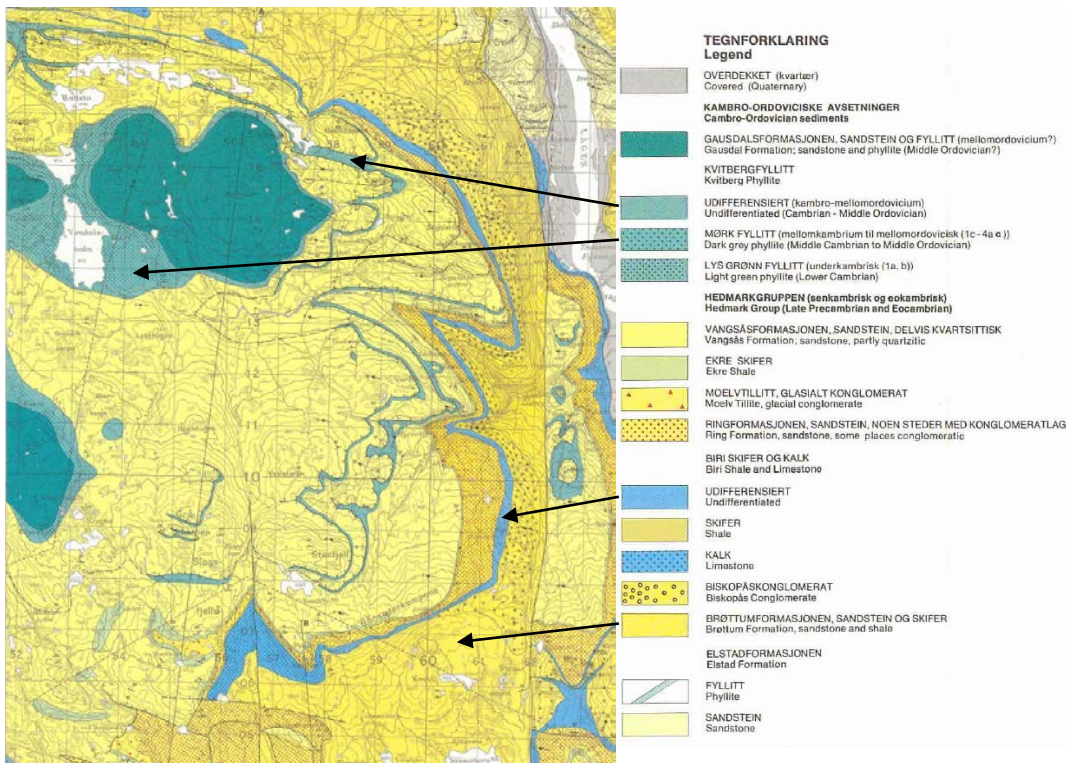
- Nr. 11 Sandstein, leirskifer, alunskifer, tidsepoke: kambrium til nedre ordovicium: Her er Alunskiferformasjonen (1-3aβ), Bjørkåsholmen (3aγ) og Tøyenformasjonen (3bα og 3bβ) slått sammen.
- Nr. 10 Steinformasjonen (Orthocerkalkstein) er den samme som Hukformasjonen (3c).
- Nr. 9 Bjørgeformasjonen tilsvarer Elnesformasjonen. Bjørgeformasjonen er et lokalt navn.



Figur 19 Utsnitt av kartblad 1:50.000 Hamar (NGU). Her er Alunskiferformasjonen vist med lys grønn farge. Her har Alunskiferformasjonen og Tøyenformasjonen nr 11 i kbl Hamar og nr 3 i kbl Løten. Steinformasjonen (etasje 3c, orthocerkalken) er samme formasjon som Hukformasjonen. Her er Biriformasjonen også vist. Denne kan også bestå av syredannende svart leirskifer.

6.3.2 Kartblad Fåvang

Som det fremgår av kartblad Fåvang (Figur 20) er det hovedsakelig gule arealer. Disse arealene består av Brøttum formasjonen (vist med pil) og kvartsrike sedimentære sandsteiner (sparagmitt).



Figur 20 Utsnitt kartblad 1:50.000 Fåvang (NGU). Mellom Hamar og Lillehammer er det to bergartsformasjoner som inneholder horisonter med svart leirskifer. Begge er eldre enn Alunskiferformasjonen. Brøttumformasjonen (pil mot gult areal) er til sammen 1500 meter mektig. I denne formasjonen ligger svarte leirskiferlag som kan være opptil flere meter mektige. Biriformasjonen (pil mot blått areal) inneholder også svarte leirskiferhorisonter med ukjent mektighet. Piler mot grønne arealer viser kambriske-ordoviciske leirskifer (Alunskiferformasjonen, Tøyenformasjonen og Hukformasjonen)

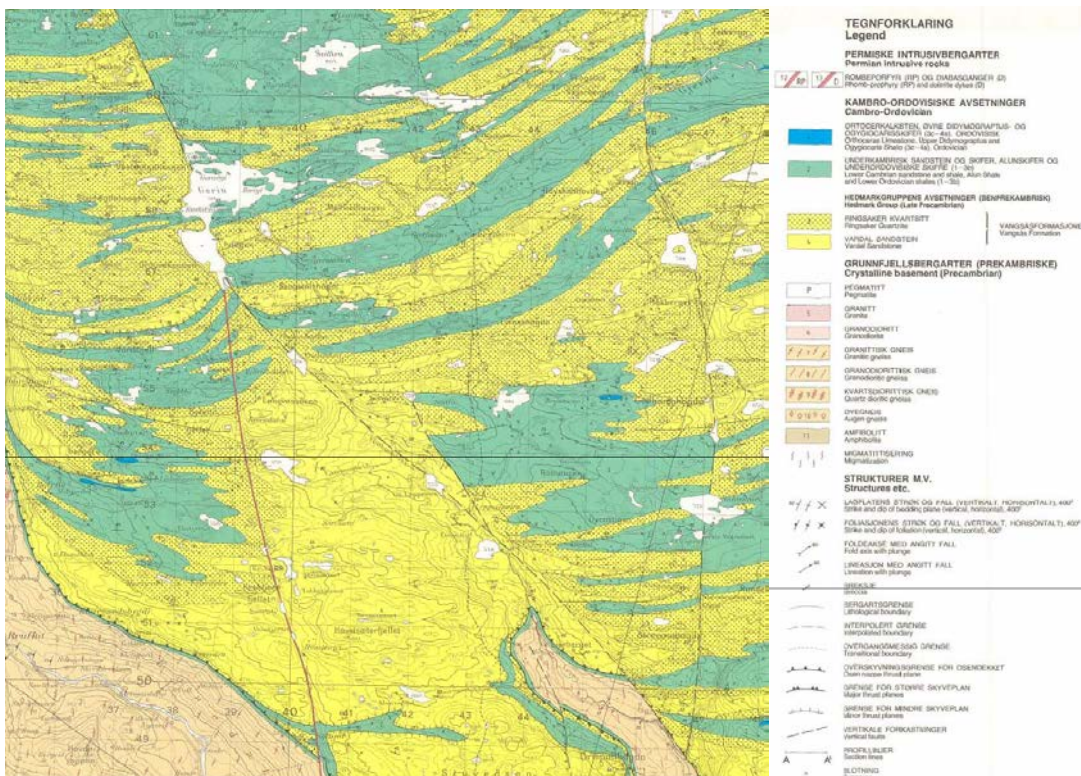
6.3.3 Lagrekken ved Mjøsområdet

I den geologiske tidsperioden eokambrium før kambrium perioden ble det også dannet svarte leirskifer med syredannende potensiale. Disse er mindre kjent og dermed også mindre påaktet. I tillegg er det store variasjoner i avsetningsmiljø i en og samme formasjon. Dette vises her med eksempel fra Biriformasjonen. Denne er kartlagt mellom Hamar og Lillehammer.

Brøttumsformasjonen er mellom Hamar-Lillehammer mer enn 1500 meter mektig. Brøttumsformasjonen beskrives som hovedsakelig turbidittavsetninger (avsatt under vann, der terrenget er steil) avbrutt av stille perioder uten erosjon på overflaten og dannelse av anaerobe miljø med organisk materiale som favoriserer svart leirskiferdannelse. Analyser fra Øyer-Tretten viser sammensetning av slik svart leirskifer. Svarte leirskiferhorisonter med opptil fem meter mektighet er kartlagt i Lillehammerområdet.

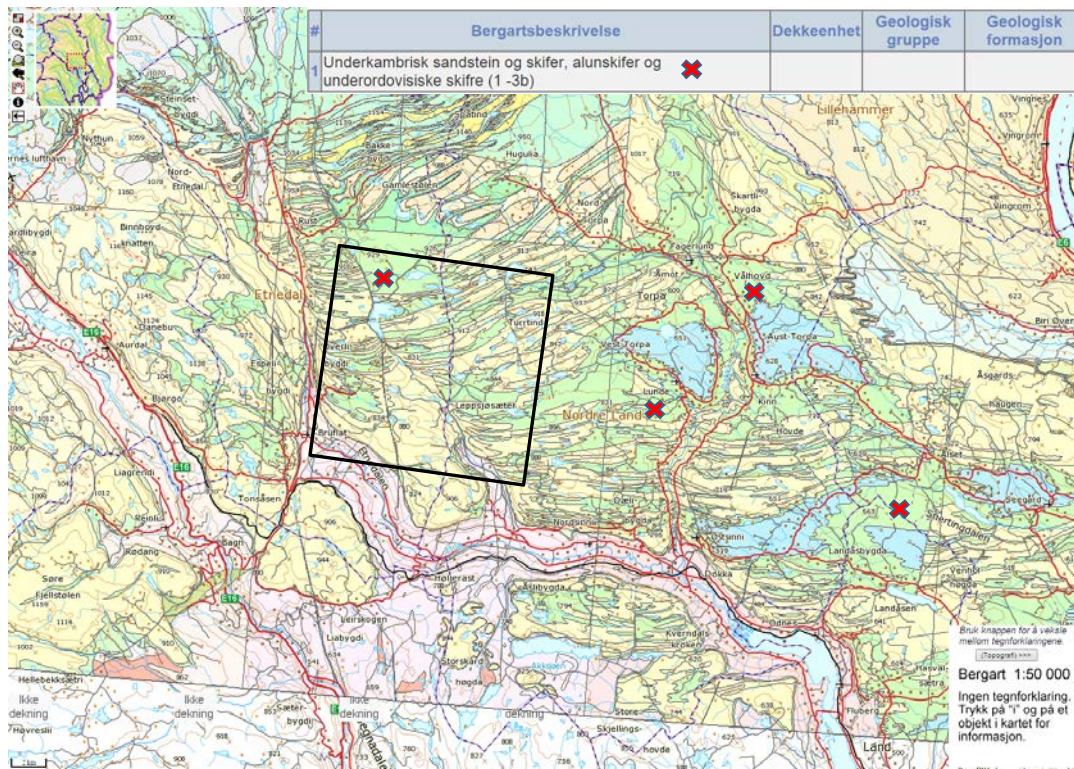
6.4 Synnfjellområdet

Synnfjellområdet er beskrivende for områder der den samme skiferhorisonten med svart leirskifer repeteres flere ganger i en lagrekke (Figur 21). Her er referansenavn på skyvedekke (alloktone bergarter). Dette skyldes at skiferformasjoner (og andre bergartsformasjoner) er komprimert sideveis slik at de brekker opp og skyves over hverandre. På et geologisk kart kan dette fremkomme som striper med samme farge som veksler med striper med en annen farge. I kartlegging av slike geologiske trekk søker en å identifisere skyvegrensene og hvilke bergartssekvenser som ble skjøvet samtidig. En navngir ofte skyvedekkene og de bergarter som kan knyttes til et skyvedekke med ulike geografiske navn.



Figur 21 Utsnitt av kartblad 1:50.000 Bruflat (NGU). Tegnforklaringen til kartet beskriver grønne arealer som kambriske skifre og underordoviciske skifre (1-3b). De grønne arealer i kartet er leirskifre fra kambrium-ordovicium (Alunskifer og Galgebergskifer).

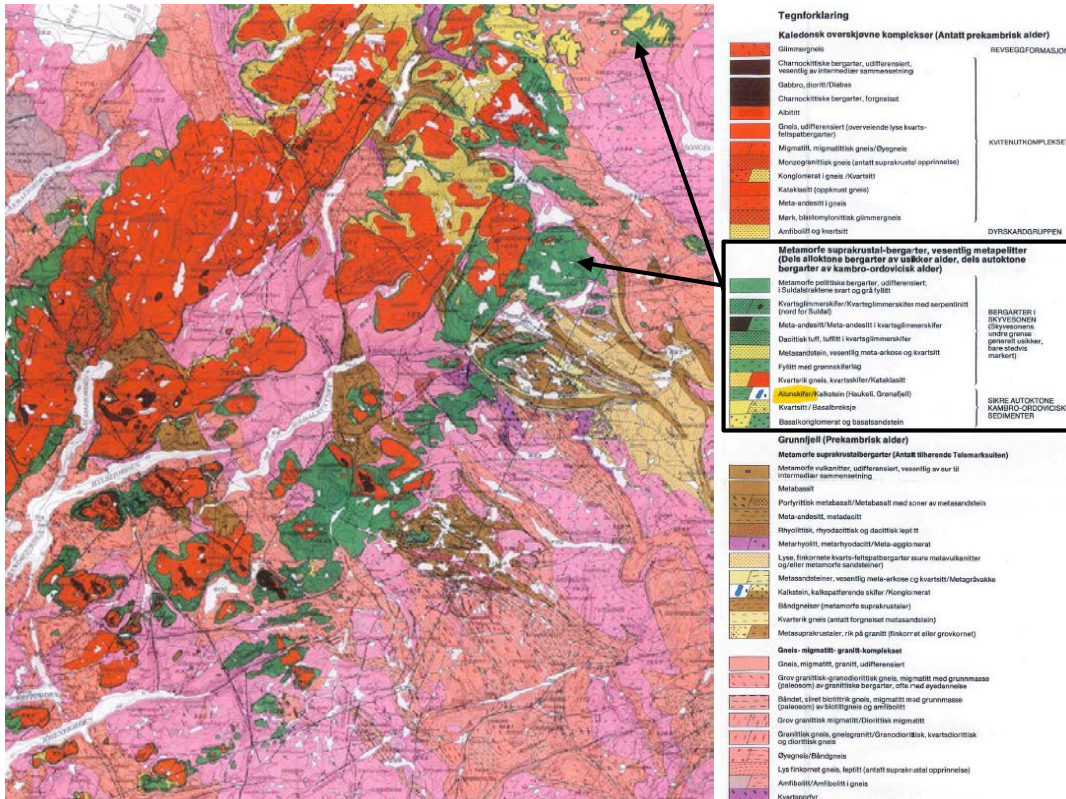
Utsnittet i kartblad Bruflat kan korreleres med kartutsnitt fra www.ngu.no vist i Figur 22. I figuren er sort rektangel omriss av utsnittet fra kartblad Bruflat i Figur 21. En kan ved å innhente informasjon fra tilgrensende 1:50.000 kartblad få mer detaljert og riktig informasjon enn den informasjon er som er tilgjengelig på ngu.no. En stor fordel med karttjeneste på ngu.no er muligheten å se arealer større enn ett kartblad.



Figur 22 Kartutsnitt som viser viktige formasjoner og informasjon (www.ngu.no). Røde stjerner viser grønne arealer der det kan være syredannende svart leirskifer. Infoknappen i skjermbilde forteller at dette er hele Alunskiferformasjonen og Tøyenformasjonen. Omriss av utsnitt fra kbl. 1:50.000 Bruflat (Figur 21) er vist som sort rektangel. Vekslende bånding av gule og grønne arealer forklares med at i dette området er formasjonene repetert i skyvedekker.

6.5 Sør-Vestlandet

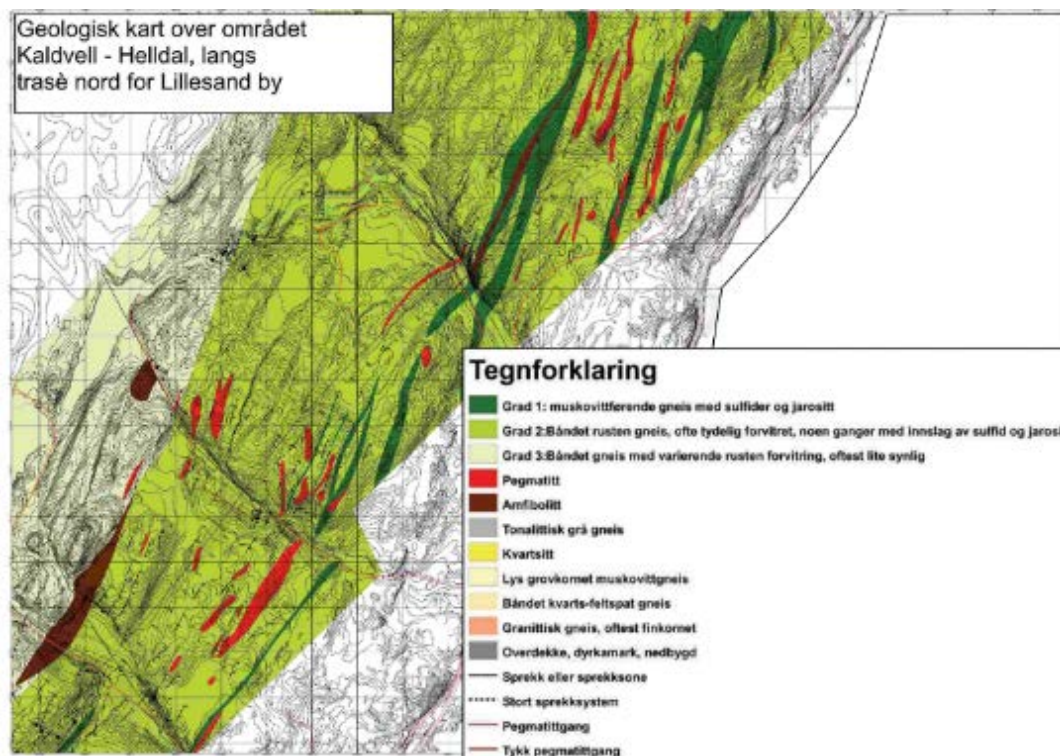
Området fra Haukeli til Haugesund/Stavanger kan ha store arealer med fyllitt som kan være rik på sulfider. Denne fyllitten kan være samme lag som Alunskiferen. Kartblad Sauda (Figur 23) har arealer med grønn farge som knyttes til tidsepoken kambro-ordovicium. Bergartene i de grønne arealer er mer omdannet fra øst mot vest.



Figur 23 Utsnitt av kartblad 1:50.000 Sauda (NGU). Grønne arealer knyttes til bergarter fra kambro-ordovicium.

6.6 Sørlandet

Sørlandet har områder med sulfidførende bergarter. Noe som kom tydelig frem i forbindelse med ny trasé for E-18 og arealbruk i Lillesand kommune. Lillesand har fått utført berggrunnsgeologisk kartlegging knyttet til arealene kommunen forvalter (Figur 24).

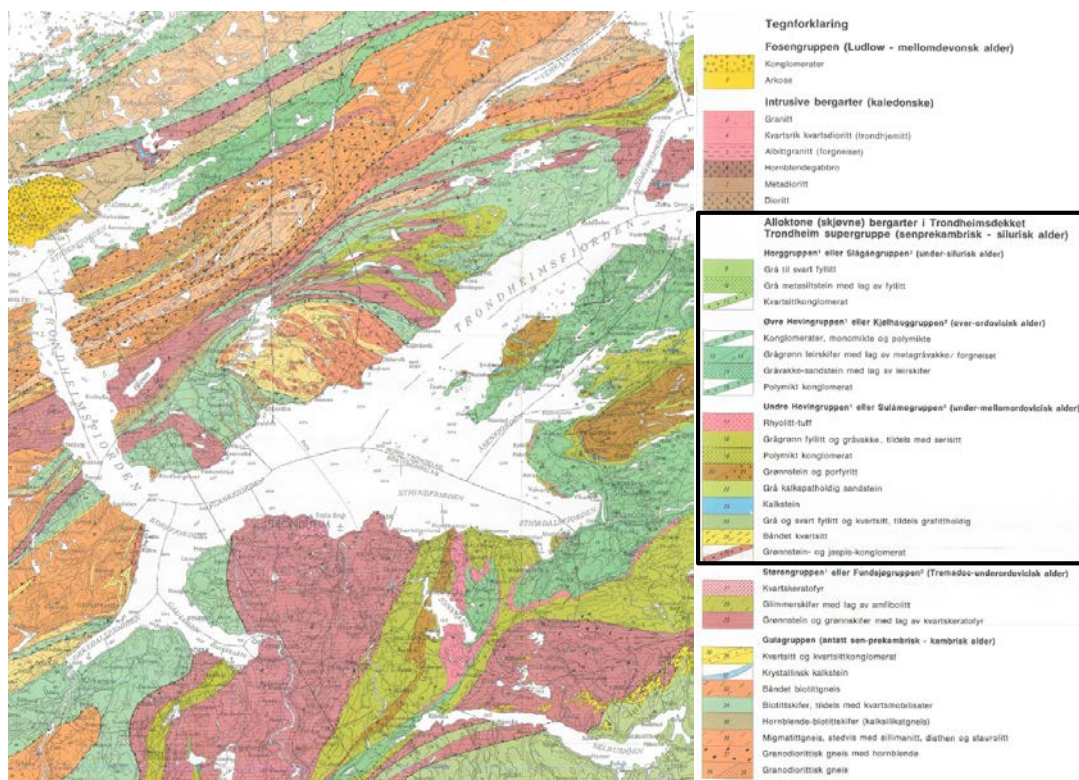


Figur 24 Utsnitt av utført kartlegging av geologi for Lillesand kommune og Statens vegvesen. Her er berggrunn delt inn i klasser, 1-3, etter mulige miljøkonsekvenser fra sulfidforvitring

6.7 Trøndelag

Trøndelag har leirskifre f.eks. i Støren dekket som beskrives som pyrittholdige. Dette kan godt være for eksempel den nedre del kambro-silur (etasje 1 – 3(4a)).

Det er i Trondheimsområdet veksling med innslag fra grønnsteiner og sedimentære bergarter som er omdannet ved metamorfose (Figur 25). Det er ikke tilstrekkelig kunnskap om de kjemiske egenskapene til metamorft omdannet Alunskifer og andre svarte leirskifre. Det mest sannsynlige er at de syredannende egenskaper er redusert og at forvitringsegenskapene med den karakteristiske fissile struktur (laminering i tynnere flak enn 1 millimeter) også er endret.

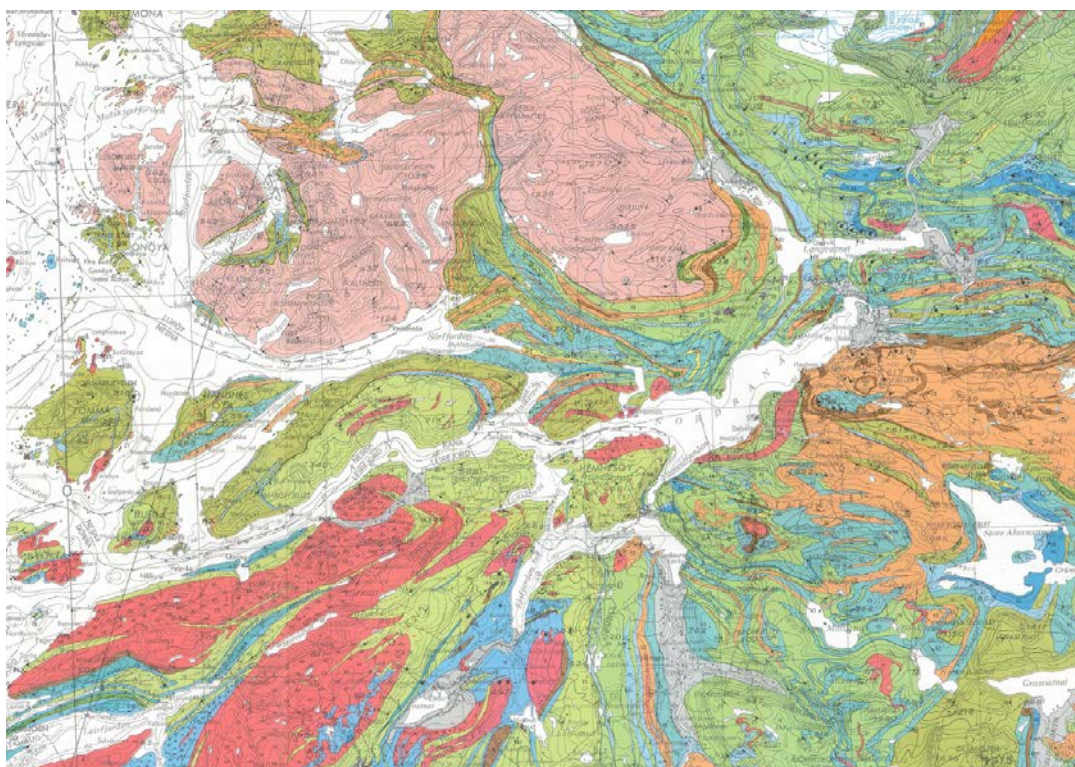


Figur 25 Utsnitt av kartblad 1:250.000 Trondheim (NGU). Den geologiske informasjon knyttet til kartet viser at de opprinnelige sedimentene er omdannet ved metamorfose. Inndelingen i bergartstyper viser at det er stor variasjon og at flere sekvenser har for liten mektighet til at de kan vises separat

6.8 Nordland

6.8.1 Mo i Rana

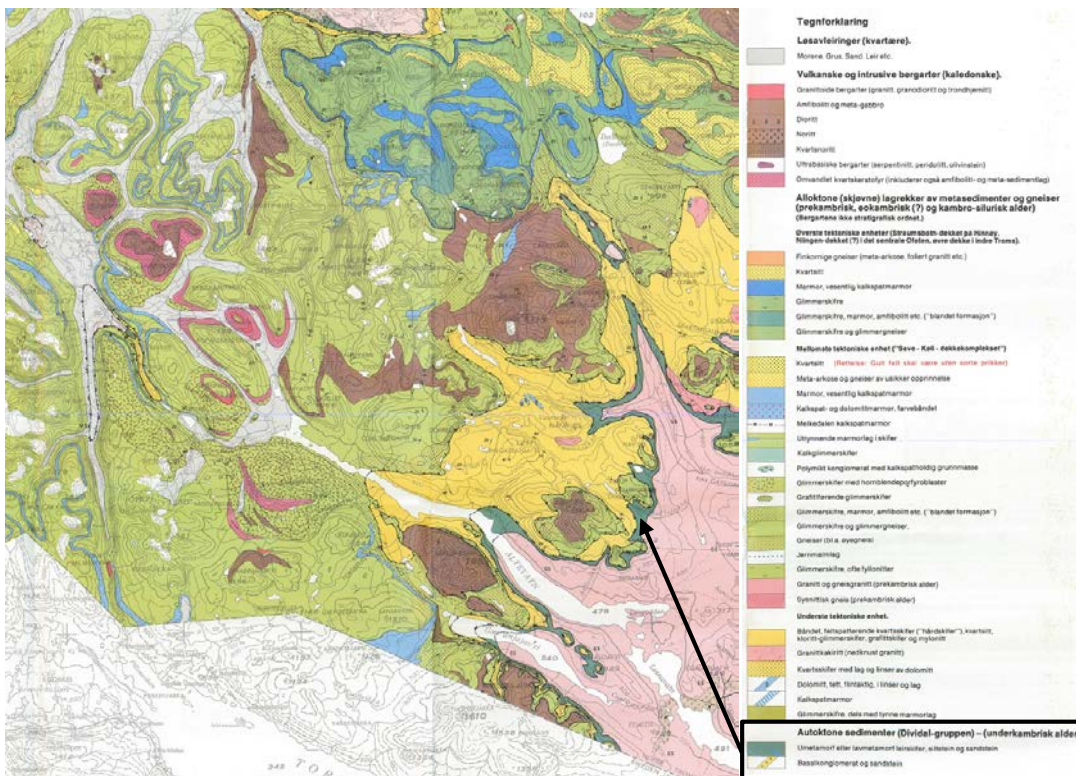
En bør, i arealer som beskrives som kambro-silur bergarter, kontrollere om de fortsatt er sulfider tilstede i leirskifrene og i hvilket omfang. Bergartene generelt i kartutsnittet fra Mo i Rana (Figur 26) kan være så omdannede at mineralene har fått en mer rasjonell form og samtidig har blitt større (og mer stabile). Det er graden av metamorfose som leirskifrene har vært utsatt for som påvirker hvordan egenskapene er endret.



Figur 26 Utsnitt av kartblad 1:250.000 Mo i Rana. Mesteparten av de grønne feltene er fra kambro-silur.

6.8.2 Narvik

I kartutsnittet fra Narvik (Figur 27) viser tegnforklaringen at det er flere tektoniske grenser mellom bergartene. Innrington er lavmetamorfe bergarter fra kambrisk tid. Dette er bergarter som kan ha felles trekk med de nedre formasjoner i Oslo-området kambo-silurlagrekke. Mesteparten av bergartssekvensene har en metamorf påvirkning med høyere temperatur og trykk slik at de opprinnelig sedimentære bergartene er meget omdannede.



Figur 27 Utsnitt fra kartblad 1:250.000 Narvik. Innrington enhet i tegnforklaring til kartet henviser til lavmetamorfe sedimenter av kambrisk alder.

7 Oppsummering

For å identifisere og karakterisere leirskifer har det blitt foreslått en trinnvis prosedyre som består av 3 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. Fremgangsmåte er oppsummert i sjekklisten nedenfor.

Geologisk informasjon	<ul style="list-style-type: none"> • Hva er sannsynlig forekomst av type(r) leirskifre i området? Sjekk tabellen (Figur 1) mot tilgjengelig geologisk informasjon. • Berører prosjektet flere typer leirskiferformasjoner? • Er det tilgjengelig geologisk informasjon? • Er det foretatt en geologisk kartlegging i tilknytning til uttak av prøve?
Geologisk/ ingeniørgeologisk kartlegging	<ul style="list-style-type: none"> • Prøveprogram - hensikt med prøvetaking. • GPS koordinater for prøver. • Hva er et sannsynlig antall prøver for å avdekke hvilke typer leirskifre som er tilstede og som prosjektet vil/kan komme i kontakt med? • Vurder om prøvene(e) er representative. • Hvordan er prøven fremskaffet (borekaks, kjerneboring, fra terreng, utsprengte masser)? • En skal være oppmerksom på at det kan være en blandprøve særlig der analys materialet er fra borekaks eller sprengstein fra tipp eller deponi. • Ta bilde(r) av området prøve er tatt. • Hvordan er prøvematerialet valgt ut.
Kjemisk karakterisering	<ul style="list-style-type: none"> • Se på konsentrasjoner av grunnstoffer i analysen. • Legg analysen (fortrinnsvis) inn i et regneark som kan regne ut verdier i et ternærplot (trekantplot). Sammenlign med diagram som viser referanseanalyser. • Legg analysen(e) inn i et diagram som viser forholdet mellom jern og svovel i mol/tonn. En må her regne konsentrasjoner om fra vektprosent til mol • Legg analysen(e) inn i et diagram som viser NP mot AP med omregningsfaktor for ekvivalenter for CaCO₃ som må tilføres for å nøytralisere en analyse. • TIC-TOC-S diagram. • Ca-Mg-Fe diagram. Hvor plasseres analysen? • Sammenlign diagrammene med referanser for leirskifrene i kambo-silurlagrekken. • Uran og bestemmelser for radioaktivt avfall. Analyser utføres tilpasset dette kravet.

8 Referanser

Evangelou, V.P., and Zhang, Y.L. (1995). A review, pyrite-oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.*, 25, 141-199.

Forurensningsforskriften (2012) Forskrift om begrensning av forurensning. Klima- og miljødepartementet, Oslo.

Lawrence, R.W., and Wang, Y. (1997). Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. In *Proceedings of the 4th Int. Conf. On Acid Rock Drainage*. MEND, NRC, Ottawa, ON, 1: 451-464.

NGF (2013) Landet blir til - Norges geologi. Norsk Geologisk Forening, Trondheim.

Norges Geologiske Undersøkelse (NGU). Berggrunnsgeologiske kart i 1:250000 og 1:50000 seriene.

Owen et al. (1990). The Ordovician successions of The Oslo Region, Norway; NGU, special publication 4

Statens strålevern (2012). Alunskifer – Kilde til radioaktivt avfall og radioaktiv forurensning. StrålevernInfo 7-12.

Statens strålevern (2011). Alunskiferkart for vurdering av hensynssoner for radon i henhold til plan- og bygningsloven.

Vedlegg A

ORDFORKLARINGER



Ord	Definisjon / forklaring
Allokton	Bergarter som er skjøvet til nåværende posisjon, de har da tektonisk kontakt
Alunskifer	Svartskifer i alunskiferformasjonen
Autokton	Bergarter med opprinnelig plassering (i motsetning til allokton)
Fjellkjede	Betegnelsen på et større område med sammenhengende fjellformasjon. Norske fjellkjeder tilhører Kaledonidene som ble dannet fra slutten av prekambriumtiden til permiden
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 (frostsprengning)
Forvitringspotensial	Bergartens potensial til forvitring i forhold til dagens tilstand
Fossiler	Bevarte rester eller spor av organismer fra fern 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
Geologisk tidsskala	Sammenstilling av den tiden som har gått siden Jorden skapt og frem til i dag. Definisjonen av jordas tidsenheter gjøres ved hjelp av (bio)stratigrafi og radiometriske dateringsmetoder.
Geologiske tidsepoker	Tidsavsnitt i jordens historie.
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
Jordarter	Leire, silt, sand, grus, stein og blokk. Defineres etter kornstørrelse og prosentvis fordeling mellom kornene.
Jordskorpebevegelser	Store bevegelser i jordskorpen knyttet til platetektonikk.
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 bergartdannende og kalles da kalkstein eller marmor.
Kambrium	Geologisk periode fra 542 til 596 millioner år siden
Kvartærgeologi	Læren om geologien i kvartærtiden. På Norges fastland omhandler mye av kvartærgeologien de geologiske prosesser som fant sted under siste istid.
Lagdelling	Struktur i sedimentære bergarter som kjennetegnes av primære forandringer i vertikal retning, eller i et 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	FeS. Kalles også Pyrrhotitt.
Metamorfose	Prosessen der bergarter omdannes til nye bergarter.
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.

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.
Overpreging	En struktur som dannes over en annen struktur.
Perm	Geologisk periode 299-347 millioner år siden
Platetektonitt	Jordskorpen er stiv og stivere enn mer flytende magma under. Det skjer kontinuerlige bevegelser på grunn av at magma flytter på seg.
Pyrrhotitt	Se Magnetkis
Pyritt	FeS ₂ , vanlig sulfidmineral, ofte terningformet
Radon	Naturlig forekommende edelgass som siver gjennom berggrunnen og løsmasser og utgjør en helseisisiko 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 og et annet oksidert.
Sediment	Bergart eller 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.
Stabilitets-område	Mineraler er kjemiske produkter. Mineraler er stabile eller ustabile under ulike fysiske og kjemiske forhold. I denne sammenheng er det viktig å være klar over at Fe III sulfater ikke er stabile når pH > ca 3,5 til 4. De vil da erstattes av Fe III hydroksyder.
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 grunnstoff (anionet). Eksempler er jensulfidet pyritt (FeS ₂)
Svartskifer	Leirskifer som er mørk i fargen pga. høyt organisk innhold
Svellepotensial	Potensial til å utvide seg på grunn av kjemiske / fysiske reaksjoner
Svovelkis	Se Pyritt
Syredannende potensial	Bergartens potensial til å danne syre ved tilgang på vann og oksygen
Syrenøytraliserende potensial	Bergartens potensial til å hindre syredannelse ved tilgang på vann og oksygen
Tektonikk	Se Platetektonitt
TIC	Total inorganic carbon – totalt uorganisk karbon.
TOC	Total organic carbon – totalt organisk karbon
Valenstrinn	Beskriver grunnstoffer evne til å gi fra seg eller å ta til seg elektroner. Elektroner er negativt ladet. Kjernen hos grunnstoffer er positivt ladet. S ²⁻ betyr at svovel har tatt til seg to elektroner mens S ⁶⁺ betyr at svovel har gitt fra seg seks elektroner

Vedlegg B

EKSEMPLER

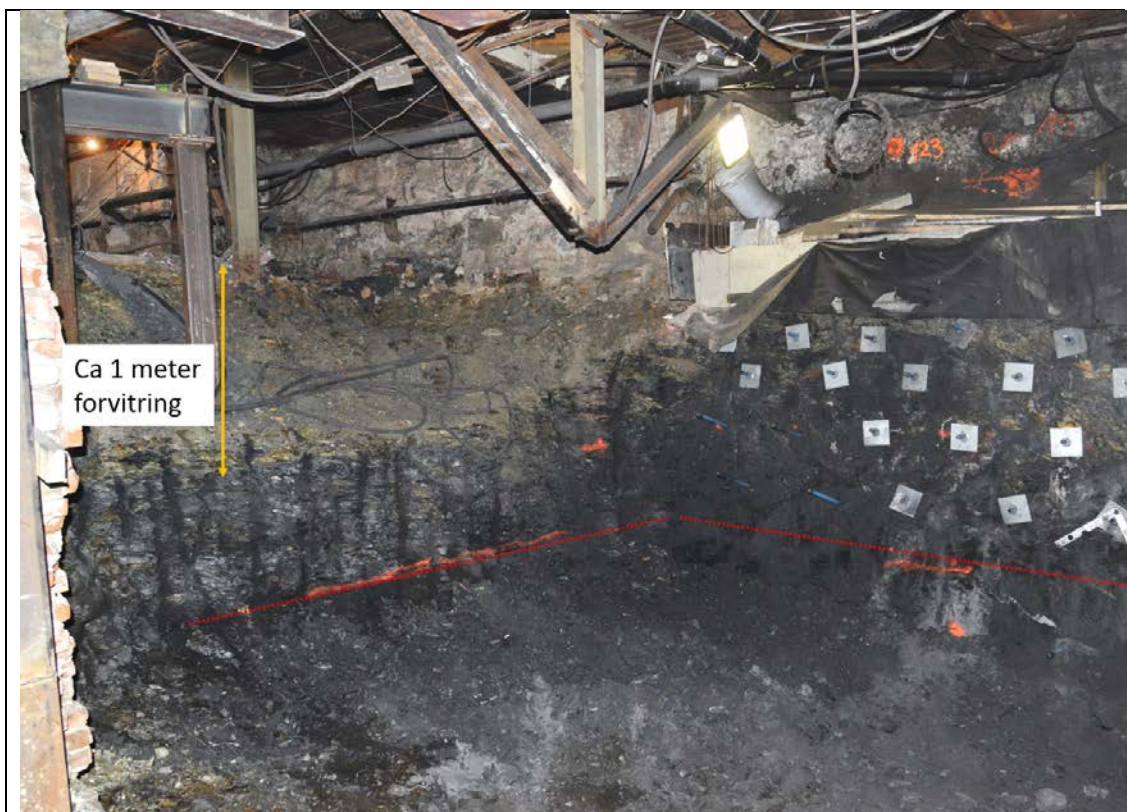
Innhold

1	Etablering av byggegrop	2
2	Vannsig	3
3	Massehåndtering	3
4	Deponering av masser	5

1 Etablering av byggegrop

Bygge- og gravearbeider i og på svartskifer fra alunskiferformasjonen og beslektede skifre kan/vil føre til forurensning. Prosjektering av løsninger ifm. bygging innebærer ofte etablering av avrettingslag i bunn av byggegrop med en drenert løsning. Har en tatt seg ned (pigget/sprengt) i syredannende skifre, vil en slik løsning medføre vannsig i byggegrop og stadig kontakt med skiferen og utlekking som ledes ut av eiendommen enten via grunnen eller kommunalt ledningsnett. Man etablerer med andre ord en meget ugunstig løsning, som kan medføre uheldige konsekvenser. Et annet vanlig scenario er når man har kommet ned under grunnvannsspeilet. Da vil det ofte etableres løsninger med en pumpesump som skal hindre innlekkasjer i bygningen. En slik løsning i syredannende bergarter akselerer imidlertid syredannende forvitningsprosesser og mengde forurensende grunnstoffer ut på ledningsnett/åpne vannkilder.

I figur B1 er vannspeilet identifisert. Her vil det prosjekteres vanntett og radontett løsning som vil hindre vannsig i skiferen.



Figur B1 Når en etablerer høydesprang i svarte leirskifre og særlig i alunskifer vil dette medføre risiko for akselerert forvitring i alunskiferen. Rød stiplet linje viser hvor nivå for ligger (her ca. 2 meter under terrengoverflaten). Det er svært viktig å etablere løsninger som ikke igangsetter gradienter slik av vann kan bevege seg.

Feil ved prosjektering og/eller utførelse oppdages ikke nødvendigvis umiddelbart. Det kan gå flere år før disse blir synlige. Vanligvis er skadene bygningsskader, skader på avløp, svært forurensende og aggressivt sigevann og radon i bygninger.

2 Vannsig

Vannsig på grunn av at det etableres høydesprang er en velkjent kilde til bygningsskader i Oslo sentrum (Figur B2). Når løsninger ikke ivaretar vannsig, vil levetid på tiltak forkortes.



Figur B2 Her var alunskifer brukt til å tilbakefylle under dekke i en bakgård. På grunn av at det er høydeforskjeller mellom naboeiendommer, oppsto et vannsig gjennom disse massene. Her var også dreneringen defekt og hadde åpen kum (ingen bunn). Det medførte at overflatevann fra takarealer ble ført ned i grunnen via kummene som var åpne i bunnen. Løsningen her ble å injisere skifervolumet slik at vannsaget ble stanset og samtidig oppgradere dreneringssystemet for eiendommen.

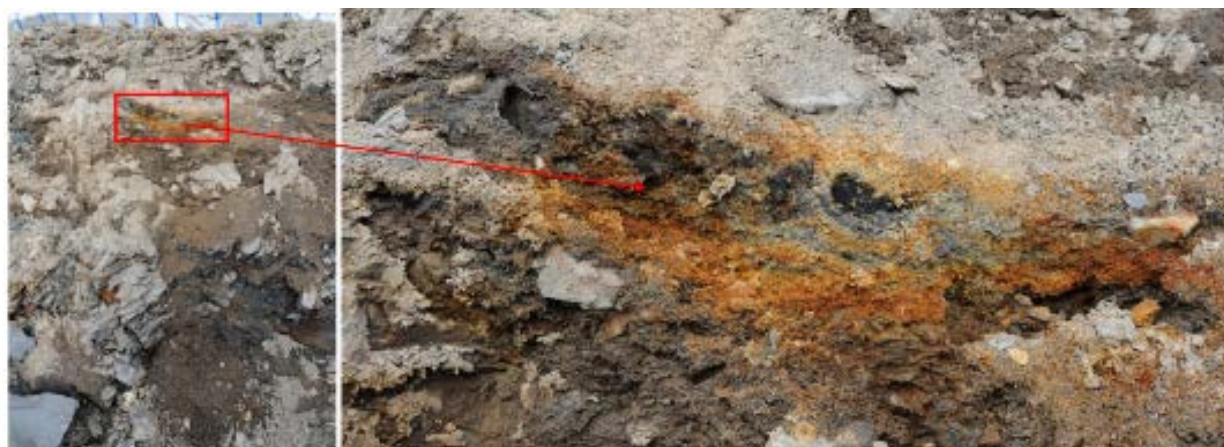
3 Massehåndtering

Vurdering av forurensende potensiale gir utfordringer i blandede masser, dvs. gravemasser med varierende tilført innslag av syredannende bergarter, se eksempel i Figur B3. Hittil har ofte grave-/fyllmasser med en mindre andel svartskifer/alunskiferfragmenter blitt behandlet som alunskifer og blitt fjernet fra byggeplass. Respekten for alunskifer som problemavfall og muligheten til å dokumentere overskuddsmassenes innhold av tungmetaller medfører ulike vurderinger med hensyn til klassifisering av slike masser og deponialternativer. I verste fall kan valgt håndtering være fordyrende for byggherre samtidig som feil bruk av deponier for farlig avfall. Tar en videre utgangspunkt kun i bakgrunnsverdier, og ikke de øvrige forhold nevnt i denne veilederen, kan slike masser også bli vurdert som ikke forurensende.



Figur B3 Blandmasser medfører usikkerhet i forhold til karakterisering. Her besto blandmassene av mindre enn 10% Galgebergskifer. Det er ikke her nødvendig å behandle disse massen som forurenset.

Omfang av skiferfragmenter i blandede masser må vurderes ut fra skifertype (viktig å skille om det er Alunskifer eller Galgebergskifer), størrelse på skiferfragmenter og farge på jordmasser i kontakt med skiferfragmentene. Det avgjørende er om forvitringen av skiferfragmentene kan medføre at det utvikles sulfater eller jernhydroksider (Figur B4).



Figur B4 Mindre område der sulfidforvitring har medført at sulfatet er utfelt i jordmasser nær sulfidet som forvittrer. Fargen i jordlaget viser dels rustbrun farge med innslag av gule farger. Rustbrune farger indikerer utfelling som jernhydroksyd, gule farger indikerer jern-III sulfater.

For etablerte deponier kan være en utfordring å avklare omfang av hvilke typer masser som er deponert. For rene sprengsteindeponier vil disse ofte være fylt suksessivt fra ulike byggeplasser (kildeområder). Om deponieier innehar en oversikt over hvor massene (adresse) kommer fra og hvilken transportør som har levert massene, kan en danne seg et bilde av omfang av ulike bergarter som er lagt i deponiet. En kan da planlegge prøveomfang for å dokumentere omfang av de ulike bergartstyper og hvor de ligger. Kan en identifisere de ulike bergartstyper i deponiet, kan en benytte denne informasjon videre i planlegging av eventuelle tiltak.

4 Deponering av masser

Det er gjennom tiden etablert deponier med syredannende svartskifre. Mangelfull kunnskap har ført til at det enkelte tilfeller legges deponier i søkk i terrenget blant annet for terrengetilpasning. Tildekking og bunntetting har ofte vært mangelfull eller feil løsning er valgt slik at man ikke har hatt kontroll på forvittrings- og spredningsmekanismene. Dessuten kan slike deponier utvikle varme på grunn av at de kjemiske forvittringsreaksjonene produserer varme (eksoterme reaksjoner). Samtidig vil forvittringsprosessen danne store mengder vannløselig jernsulfater. Om et slikt deponi har skiftende fuktforhold vil slike sulfatmineraler vaskes ut i sykler.

Figur B5 viser et tilfelle der eieren av de deponerte massene måtte fjerne disse grunnet grunneiers ønske om bruk av grunnen til annet formål. Skifertypene i deponiet ble identifisert til å tilhøre skifer fra etasje 4 i kambrosilurlagrekken. Svartskiferen stammet fra Elnesformasjonen. Prøvetaking ble meget rasjonell og opplasting kunne klareres med visuell kontroll.



Figur B5 Mellomlagret inneholdt leirskifre fra kambro-silurlagrekken. Skifrene ble identifisert til å tilhøre Enesskifer og Vollenskifer.

Vedlegg C

TOLKNING AV ANALYSEDATA

Innhold

1	Metode for karakterisering	2
1.1	Bakgrunn og målsetting	2
1.2	Bergarten som informasjonsbærer	2
1.3	Kambro-silur lagrekkens leirskifre og eldre underliggende leirskifre	3
1.4	Objektiv metode	4
1.5	Prøvetaking	5
1.6	Kjemisk analyse	5
1.7	Alternative analysemetoder - Håndholdt XRF	6
2	Oksidasjon av jernsulfider	7
3	Geokjemisk fingeravtrykk	8
3.1	Oversikt over metoden	8
3.2	Trekantdiagram	9
3.3	Fe-S diagram	16
3.4	AP-NP diagram	18
3.5	TIC-TOC-S - Diagram	20
4	Eksempler på tolkninger basert på diagram	21
4.1	Identifisering Galgebergskifer – Alunskiferformasjonen	24
4.2	Analyser fra håndholdt XRF	26
5	Vannanalyser	27
6	Referanser	30

1 Metode for karakterisering

1.1 Bakgrunn og målsetting

Her presenteres en metode for identifisering og karakterisering av leirskifer basert på kjemiske analyser og geologisk informasjon. Formålet med metoden er å kunne knytte analyser til en leirskiferhorisont i Oslofeltet kambro-silurlagrekke.

Bakgrunnen for utvikling av metoden var problemene relatert til alunskifer fra Alunskiferformasjonen og tilhørende miljørisiko (forsuring, metallforurensing, radongass), bygningsskader og håndteringskostnader.

Metoden baseres på to typer informasjon:

1. en kjemisk analyse av konsentrasjoner av grunnstoffer (hoved- og sporelementer).
2. bergartsbeskrivelse basert på anerkjente beskrivelsesmetoder.

Sammenstilling og vurdering av disse to informasjonskilder gir grunnlag for å vurdere de viktigste egenskaper til leirskifrene i kambro-silurlagrekken, deriblant de svarte leirskifre i Alunskiferformasjonen og Tøyenformasjonen. Metoden er i tillegg utviklet med mål å redusere risikoen for at bergartsprøver som sendes til analyse ikke er representative.

NGI har siden 2008 systematisk samlet referanseanalyser, der vi har identifisert hvilke(n) leirskifer(e) som er i grunnen og således hatt kontroll på hvilken type leirskifer som analyseres. Dette arbeidet er basert både på en geologisk forståelse av leirskifrenes, oppbygging av kambro-silurlagrekken. Analysene er samlet med det formål å kunne identifisere de ulike leirskiferenheter i kambro-silurlagrekken ut fra kjemiske analyser av leirskifre. Det er disse referanseanalysene som gjør det mulig å knytte nye analyser til en leirskiferenhet og således kunne dra nytte av de kjente egenskapene til de ulike leirskiferhorisonter.

Ved å velge denne metoden for identifisering og karakterisering har en den nødvendige dokumentasjon både for vurdering av risiko, prosjektering av løsninger og for vurderinger av deponering. Enkelte horisonter i Alunskiferformasjonen kan klassifiseres som radioaktivt avfall. Det må derfor foreligge dokumentasjon som avklarer evt. klassifisering.

1.2 Bergarten som informasjonsbærer

Metoden for identifisering og karakterisering baseres på at selve bergarten er informasjonsbæreren. En kan da knytte egenskaper til bergarten, og analyser og bergartsbeskrivelser kan anvendes på nye prøver fra andre lokaliteter av samme bergart. En vil da opparbeide et stadig bedre grunnlag for riktigere beslutninger knyttet til denne bergarten i ulike situasjoner.

Ulike bergarter har ulike egenskaper, hvor egenskapene bestemmes ut fra bergartens oppbygging og hvilke mineraler som bergarten inneholder. For sedimentære bergarter (som eksempelvis leirskifer) er det tilgang på materiale som bygger opp sedimentet, avsetningsmiljøet og de fysiske og kjemiske forhold sedimentet utsettes for videre, som bestemmer hva slags bergart som dannes. For smeltebergarter er det i hovedsak utviklingshistorien ved løsrivelsen fra mantelen (smelten som utgjør jordens indre) og hvordan denne smelten (magma) fraksjonerer mens den beveger seg oppover mot jordoverflaten.

De fleste bergarter i Norge er eldre enn 250 millioner år, og hovedvekten av bergarter som dekker landarealet i Norge er eldre enn 400 millioner år. Den siste store metamorfe hendelsen i Norge knyttes til dannelsen av den kaledonske fjellkjeden som følge av en komprimering og sammenpressing i jordskorpen for ca 400 millioner år siden. De fleste av bergartene er derfor påvirket av metamorfose, med en gradering der trykk og temperaturpåvirkning øker mot nordvest. Metamorfose påvirker bergarters egenskaper og særlig de sedimentære bergarter som leirskifrene i kambro-silurlagrekken.

1.3 Kambro-silur lagrekkens leirskifre og eldre underliggende leirskifre

Leirskifer, inklusive svart leiskifer, forekommer i hovedsak i lagrekken innenfor kambro-silur, og metoden som er utviklet har hovedfokus på denne geologiske lagrekken.

Tabell C1 viser lagrekken av leirskifer i kambro-silur og slutten av eokambrium. Lagrekken er inndelt i ulike formasjoner (Oslo-Asker-, Hadeland-, Hamar-formasjonen) med forskjellig mektighet. Leirskiferen kan være både lys grå, grå og svart avhengig av avsetningsforhold. Det er imidlertid ikke tilstrekkelig å identifisere en skifer basert på utseende.

Tabell C1 Lagrekken i kambro-silurskifrene, svarte leirskiferhorisonter er uthevet (mørk grå,) mens mulig forekomst er merket med lyse grå eldre enn kambro-silur som tilhører Biri og/eller Brøttum formasjonene er også inkludert. Lunner formasjonen er ikke en direkte parallell til Venstøp formasjonen selv om de er av omtrentlig samme alder.

Etasje	Oslo-Asker Formasjon	Hadeland Formasjon	Hamar Formasjon	NGU inndeling på kart	Mektighet (m)	Alder		
4d				Oslo		Sen ordovicisk	471-443 mill. år	
4cα	Venstøp	Lunner*		Oslo	Oslo 7-10m Lunner fm <185m			
4bδ	Solvang			Oslo	12-20	Midt ordovicisk		
4bγ	Nakkholmen			Oslo	13-20			
4bβ	Frognerkilen			Oslo	10-20			
4bα	Arnestad	Arnestad/Furuberg	Arnestad/Furuberg	Oslo	22-40			
4aβ	Vollen		Vollen/Hovins holm	Oslo	> 45			
4aα	Elnes	Elnes	Elnes/Bjørge	Oslo	60-80			
3c	Huk3	Huk3	Svartodden Herran/Stein	Røyken	2-5 m	Tidlig Ordovicisk		488-471 mill. år
3cβ	Huk2	Huk2		Røyken	2-5 m			
3cα	Huk1	Huk1		Røyken	2-5 m			
3bβ	Golgeberg	Golgeberg	Golgeberg	Røyken	5-10 m			
3bα	Hagaberg	Hagaberg	Hagaberg	Røyken	3-8 m			
3aγ	Bjørkåsholmen	Bjørkåsholmen	Bjørkåsholmen	Røyken	1-2 m			
3aα, 3aβ	Alunskifer-3	Alunskifer-3	Alunskifer-3	Røyken	~80 m men stor variasjon			
2a-2e	Alunskifer-2	Alunskifer-2	Alunskifer-2	Røyken		Sen kambrium	501-488	
1	Alunskifer-1	Alunskifer-1	Alunskifer-1	Røyken		Midt kambrium	513-501	
	-	-	Biri Brøttum	Biri Brøttum	1500 m	Eokambrium	<542	

Sedimentet alunskiferen er dannet av ble avsatt i et stort havområde som dekket store deler av syd-Norge i sen-kambrisk til tidlig ordovicisk tid. Alunskifer forekommer på en rekke steder i Norge (eksempelvis Trøndelag, Rogaland, Nordre Land, Hamar, Hadeland, Oslo), men kan ha svært ulike egenskaper.

1.4 Objektiv metode

En metode for identifisering og karakterisering bør baseres i størst mulig grad på objektive kriterier og i tillegg anerkjente geologiske kriterier. En kjemisk analyse er objektiv, mens en geologisk beskrivelse skal baseres på anerkjente kriterier. I en vurdering av egenskaper vil både den kjemiske analysen og anerkjente deskriptive (beskrivende kriterier) legges til

grunn. Når disse kunnskapene systematiseres, vil vi ha et stadig sikrere grunnlag for å identifisere hvilken skifertype analysen stammer fra.

De fleste bergarter har karakteristiske trekk som en geolog eller et trent øye kan nyttiggjøre seg. En må vite hva som skal observeres. For svarte leirskifre er spesielt forvitringsegenskapene viktig å ha kunnskaper om. Miljøet der de er eksponert enten i byggegrøp eller i deponi eller masselager bestemmer ofte om de kan utgjøre en potensiell forurensningskilde og bestemme mulig omfang av hva som kan frigis til miljøet rundt.

1.5 Prøvetaking

Prøvetaking er en viktig del av enhver dokumentasjon. Omfang av prøvetaking må tilpasses prosjektets omfang og risiko knyttet til feilvurderinger i prosjektet. Massebalansen i et prosjekt avhenger av om massene kan gjenbrukes, eller om det stilles spesielle krav til deponi. Det vil være store forskjeller i behov for forundersøkelser i ulike typer prosjekter, eksempelvis tunnelprosjekt, byggegrøp eller mindre grøft.

Prøver som tas bør stedefestes med GPS. Bakgrunnen for dette er at det i prosjekter kan det forekomme flere typer leirskifre. Uten tilstrekkelig stedfesting kan det bli problematisk å vurdere kvantitativt omfang av de ulike skifre, dermed kan en miste verdifull og nødvendig informasjon og foreta feilvurderinger. Videre kan oppgjør med grunnentreprenør bli usikker. En kan risikere blanding av masser i stedet for sorterte masser etter egenskaper og de ulike leirskifervarianter har ulike bergmekaniske egenskaper som fordrer ulike tilnærminger.

Størrelsen på prøvematerialet må vurderes. Som utgangspunkt er bergarter inhomogene materialer. Det kan være større forskjeller i sammensetning av berggrunnen over korte avstander enn det en kan se ut fra prøvematerialet. Antallet prøver må vurderes for hvert enkelt prosjekt, og flere prøver vil redusere usikkerhet i analysegrunnlaget. Det er ikke tilstrekkelig med kun en prøve til analyse.

1.6 Kjemisk analyse

En kjemisk analyse skal inneholde hovedelementer og sporelementer. Disse skal være representative for bergartenes sammensetning. I forurensnings sammenheng blir mange sporelementer omtalt som tungmetaller og finnes på listen over prioriterte miljøgifter. En oversikt over omfanget av en kjemisk analyse med tilhørende analysemetode er gitt i tabell 2. For at analysene skal ha verdi, må deteksjonsgrensene være tilstrekkelig lave til at de gjengir konsentrasjonene med tilfredsstillende nøyaktighet. Analysene skal utføres av akkreditert laboratorium for å sikre kvalitet.

Tabell C2 Kjemisk analyse av bergarter med hoved- og sporelementer, uorganisk karbon (TIC), og organisk karbon (TOC)

Element	Hovedelement (H) Sporelement (S)	Analysemetode	Deteksjonsgrense/ enhet
Tørrstoff	-	Gravimetrisk	%
TIC	-	Kolometrisk	0,01%
TOC	-	Kolometrisk	0,01%
Glødetap (LOI)	-	Gravimetrisk	%
Si /Silisium)	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Al/Aluminium	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Ca/Kalsium	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Fe/Jern	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Mg/Magnesium	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Na/Natrium	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
K/Kalium	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Ti/titan	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
Mn/Mangan	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
P/Fosfor	H	ICP- (MS/OES/AES)	mg/kg TS
As/Arsen	S	ICP- (MS/OES/AES)	3 mg/kg TS
Barium	S	ICP- (MS/OES/AES)	2 mg/kg TS
Beryllium	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,5 mg/kg TS
Cd/Kadmium	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,1 mg/kg TS
Co/Kobolt	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,08 mg/kg TS
Cr/Krom	S	ICP- (MS/OES/AES)	10 mg/kg TS
Cu/Kopper	S	ICP- (MS/OES/AES)	1 mg/kg TS
Hg/Kvikksølv	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,01 mg/kg TS
Mo/Molybden	S	ICP- (MS/OES/AES)	5 mg/kg TS
Nb/Niob	S	ICP- (MS/OES/AES)	5 mg/kg TS
Ni/Nikkel	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,5 mg/kg TS
Pb/Bly	S	ICP- (MS/OES/AES)	1 mg/kg TS
S/Svovel	H	ICP- (MS/OES/AES)	80 mg/kg TS
Sc/Scandium	S	ICP- (MS/OES/AES)	1 mg/kg TS
Sn/Tinn	S	ICP- (MS/OES/AES)	20 mg/kg TS
Sr/Strontium	S	ICP- (MS/OES/AES)	2 mg/kg TS
V/Vanadium	S	ICP- (MS/OES/AES)	2 mg/kg TS
W/Wolfram	S	ICP- (MS/OES/AES)	50 mg/kg TS
Y/Yttrium	S	ICP- (MS/OES/AES)	2 mg/kg TS
Zn/Sink	S	ICP- (MS/OES/AES)	4 mg/kg TS
Zr/Zirkon	S	ICP- (MS/OES/AES)	2 mg/kg TS
U/Uran	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,03 mg/kg TS
Th/Thorium	S	ICP- (MS/OES/AES)	0,1 mg/kg TS

1.7 Alternative analysemetoder - Håndholdt XRF

Håndholdte X-ray fluorescens (XRF) instrumenter blir stadig mer utbredt og er anskaffet av flere aktører i avfallsbransjen. Slike apparater har variabel deteksjonsgrense for de ulike grunnstoffer. Det er derfor ikke sikkert de har tilstrekkelig nøyaktighet for å måle

konsentrasjoner av alle de ulike sporelementer. Slike instrumenter må kalibreres mot ordinære kjemiske analyser for å sikre nøyaktighet.

Det er flere feilkilder ved bruk av håndholdt XRF, hvor selve utførelsen av analysen er avgjørende for et representativt prøveresultat. Instrumentet sender ut røntgenstråler med høy energi. Når røntgenstrålene treffer bergarten (mineralene) skytes elektroner i atomkjernen fra et elektronskall og ut til et annet elektronskall som ligger lenger vekk fra atomkjernen (eksitasjon). Det etableres en ustabil situasjon. Når elektronene går tilbake til sitt opprinnelige elektronskall (mer stabil situasjon) vil det samtidig frigjøres en energimengde som er spesifikk for grunnstoffet og som kan identifiseres. For at denne energien skal fanges opp av XRF instrumentet, må avstanden være kortest mulig mellom instrumentet's sensor og overflaten på prøven. Ideelt sett skal det heller ikke være luft mellom som analyseres og vanninnholdet vil også ha betydning. Ofte er dette vanskelig å holde kontroll på under feltforhold.

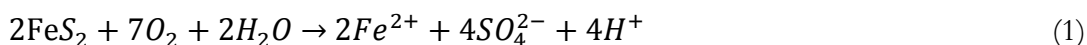
For å øke nøyaktigheten bør analysematerialiet knuses ned i en morter slik at det kan presses til en pille. Videre bør instrumentet stå i et stativ slik at en reduserer usikkerheten med hensyn til målevinkel fra analyse til analyse. Analyse på fjellflater som ligger i dagen kan gi store avvik. Den generelle regel er alltid å gjennomføre analyser på friske flater. Forvitrede flater kan ha en forvittringshud som ikke er representativ for kjemisk karakterisering av massene. Eksempler på analyser fra håndholdt XRF er omtalt i kapittel 4.

2 Oksidasjon av jernsulfider

De oksiderende reaksjonene som genererer sur avrenning fra syredannende bergarter er godt beskrevet i litteraturen. (e.g. Kleinmann et al., 1981; Evangelou and Zang, 1995).

Det syredannende potensialet i leirskifer skyldes i hovedsak pyritt (FeS_2) og pyrrotitt ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$, hvor $x=0,0,17$). Oksidasjonen av pyritt skjer normalt på to måter avhengig av hvilke elektronakseptorer som foreligger: oksygen (direkte oksidasjon) eller treverdige jern, Fe(III) (indirekte oksidasjon).

Den direkte oksidasjonen av pyritt med oksygen og vann kan skrives som følgende (Nicholson, 1994):



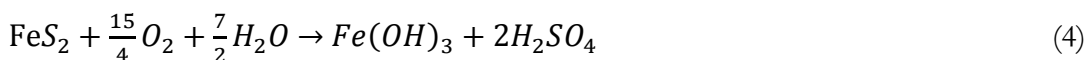
Toverdige jern, Fe(II), kan oksideres videre til treverdige jern, Fe(III), som igjen kan fungere som en elektronakseptor ved oksideringen av pyritt. Oksidasjon av Fe(II) skjer etter følgende formel:



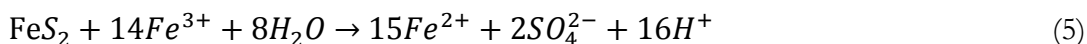
Så lenge pH er relativt høy (pH > 3 – 3,5; Nicholson, 1994), kan Fe(III) felles ut som hydroksider:



Basert på dette kan den overordnede ligningen for pyrittoksidasjon også skrives som:



Hvis pH blir lav nok (pH < 3,5), vil Fe(III) fungere som den viktigste elektronakseptoren i oksideringen av pyritt og den direkte oksidasjonen hemmes i stor grad (Moses et al. 1987). Oksidasjonen av pyritt kan da skrives som (Nordstrom and Southam, 1997):



Så snart reaksjon (5) er initiert, vil genereringen av sur avrenning (ARD) øke raskt, noe som kan resultere i en svært lav pH. Reaksjonen (5) er begrenset av hvor raskt Fe(II) blir oksidert. Bakterier (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) kan katalysere denne reaksjonen og er sentralt i dannelsen av ARD under feltforhold.

3 Geokjemisk fingeravtrykk

3.1 Oversikt over metoden

Avsetningsmiljø og tilgang på materiale er kriterier for identifisering av enhver sedimentær bergart. Dette gjenspeiles i det geokjemiske fingeravtrykket. Det er ikke nødvendigvis konsentrasjoner av de ulike hoved- og sporelementer som gjør det mulig å identifisere en bergart. Det er i stedet de relative forhold mellom grunnstoffene bergarten er bygget opp av som gir betingelsene. I metoden for identifisering og karakterisering av leirskifer inngår tre typer diagrammer:

1. *Trekantdiagrammer* basert på relative mengder mellom grunnstoff/parametere. Flere trekantdiagrammer mellom ulike parametere vurderes, og man trenger ulike trekantdiagrammer for å identifisere og differensiere mellom ulike leirskifre.
2. *Jern (Fe) – svovel (S) diagram* som gir informasjon om jern (og dermed også om tungmetaller relatert til jernholdige mineraler) kan sitte bundet i andre mineraler enn svovel. Forholdet mellom jern og svovel angis i mol/tonn for å kunne vurdere forholdet mellom antall molekyler jern og antall molekyler svovel (mol/tonn).
3. *AP (Acidification potential) – NP (Neutralisation potential) - diagram* som gir et bilde av bergarters syredannende potensiale. Diagrammet er basert på konsentrasjoner av svovel

(S) som uttrykk for AP og uorganisk karbon (total inorganic carbon, TIC) som uttrykk for NP. Diagrammet viser beregnet mengde kalsium karbonat (CaCO_3) i kg/tonn som foreligger i leirskiferne (basert på TIC konsentrasjon) i forhold til potensiell mengde CaCO_3 som trengs for å nøytralisere forsureningspotensialet i leirskiferen.

Disse tre diagram-typene gir samlet god informasjon om bergartstyper og er beskrevet mer i detalj i etterfølgende kapitler. I tillegg er det tatt med trekantdiagrammer som inkluderer uorganisk karbon (total inorganic carbon, TIC), organisk karbon (total organic carbon, TOC) og S. For kambro-silurlagrekken svarte leirskifre og tilstøtende leirskifre kan vi, når vi kjenner det karakteristiske fingeravtrykk for en leirskiferhorisont, identifisere i hvilken leirskifer analyse er tatt og hvor denne er plassert i kambro-silurlagrekken.

For å kunne identifisere en leirskifer ut fra analyser trenger en referanseanalyse. Referanseanalyser som presenteres i veilederen er samlet systematisk over flere år. Referanseanalyser er vist for etasje 2 t.o.m 4a i kambro-silurlagrekken. Plassering i trekantdiagrammer, Fe (jern) – S (svovel) diagrammer og AP-NP diagrammer er vist i diagrammer i påfølgende figurer videre utover i dokumentet. Når informasjon fra geologisk kartlegging er begrenset blir viktigheten av gode representative analyser viktigere. Slike vurderinger bør utføres for alle typer prosjekter tidlig i planleggingen.

3.2 Trekantdiagram

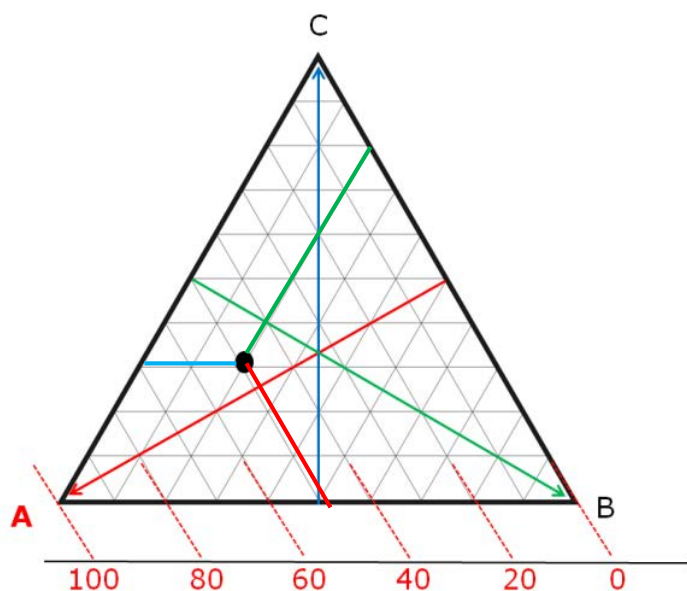
Trekantdiagrammer gjør det mulig å identifisere leirskifrene (både svarte, grå og kalkrike). Det er leirskiferen som er informasjonsbærer, og det er denne identifiseringen som gjør det mulig å systematisere informasjon om de ulike leirskifrene og kunne gjenbruke informasjon fra analyser. Vi får ved dette et stadig sikrere grunnlag i vurdering av leirskifertyper som kan forekomme i grunnen i et prosjekt og hvilke egenskaper som knyttes til de ulike svarte- grå og kalkrike leirskifre.

3.2.1 Konstruksjon av trekantdiagrammer

Trekantdiagrammer konstrueres på følgende måte: En tar konsentrasjoner fra tre grunnstoffer og summerer. Denne summen settes så til 100%. Deretter regner en ut mengde i prosent vekt for hvert av de tre grunnstoffer og plotter i et trekantdiagram. En detaljert beskrivelse av hvordan trekantdiagrammer (ternary plot) leses og konstrueres finner en på internett (eksempelvis:

<http://csmres.jmu.edu/gecollab/fichter/SedRx/readternary.html>).

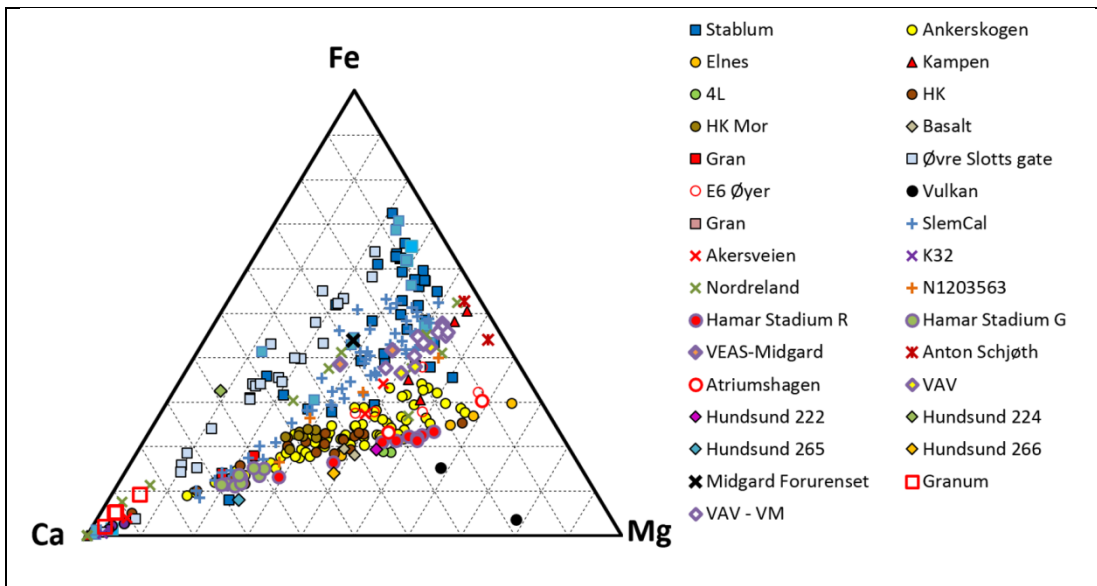
Eksempel på oppbygging av et trekantdiagram er vist i Figur C1.



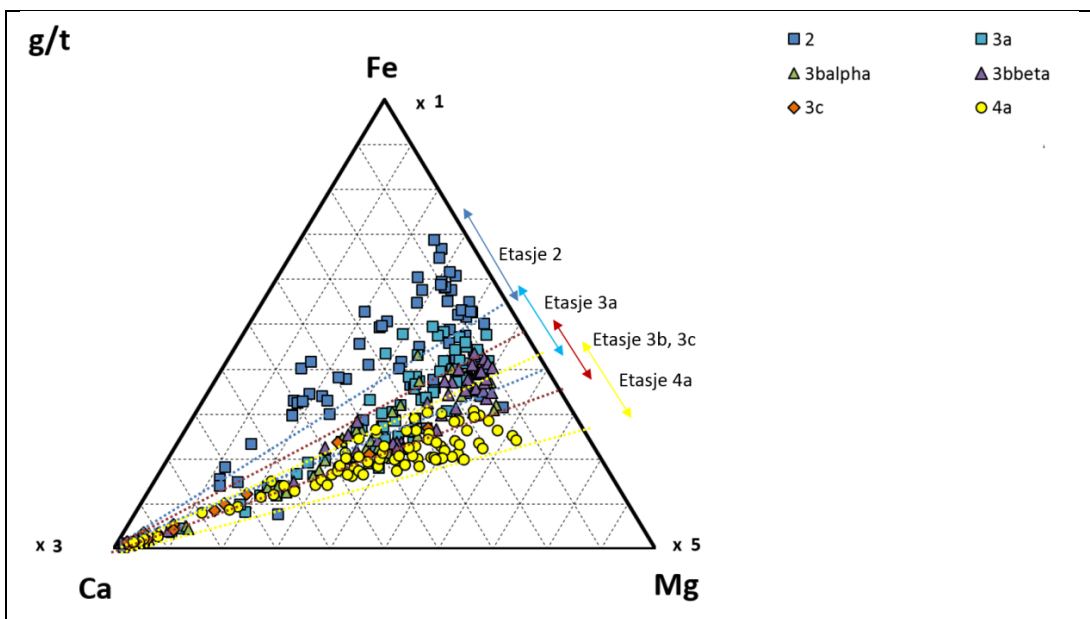
Figur C1 Prinsipp for trekantdiagram (ternary plot) for "parametrene" A, B og C. Sort sirkel representerer en prøve som inneholder A= 50%, B= 20% og C=30%

3.2.2 Identifikasjon av leirskifre basert på trekantdiagram

Generelle trekk i utvikling av kambro-silurlagrekken bidrar til å gi en overordnet forståelse av de ulike svarte-, grå- og kalkrike leirskifre og deres forskjellige egenskaper. Trekantdiagrammet i Figur C2 viser forholdet mellom kalsium (Ca), magnesium (Mg) og jern (Fe) for en rekke referanseprøver fra ulike leirskifer-formasjoner. I Figur C3 er disse referanseprøvene systematisert i samme type trekantdiagram (Ca, Mg, Fe) i tilhørende etasjer. Figuren viser at man på dette viset kan differensiere mellom de ulike etasjene, hvor det skjer en utvikling i forholdet mellom jern og magnesium der Fe:Mg er høyere i etasje 2 enn i etasje 3 og i etasje 4 (se også Tabell C1 for lagrekken). Siden magnesium kan inngå i flere typer mineraler, er kalsium inkludert i diagrammet.

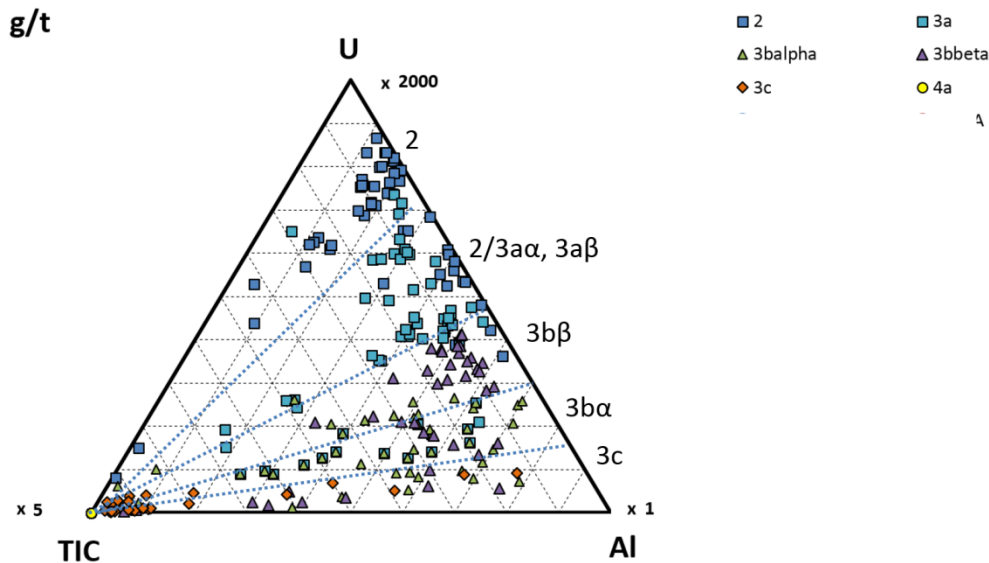


Figur C2 Utviklingstrekk i kambro-silurlagrekken. Firkanter tilhører Alunskiferformasjonen etasje 2, de som er påvirket av varme fra smeltebergarter (rød åpen firkant), Alunskiferformasjonen etasje 3a (blå kors), Elnesformasjonen 4a i Oslo (lilla åpne prismer), fylte gule og mørke brune sirkler tilhører Elnesformasjonen (4a) på Hamar. Lys brune, fylte sirkler er morenemateriale i Hamar sentrum. Lyse grønne og røde fylte sirkler er også fra Elnesformasjonen (4a på Hamar). Røde åpne sirkler (Atriumshagen) tilhører 4a, mens Røde sirkler med tynn strek tilhører skiferhorisonter i Biri og Brøttums formasjonene, som er eldre enn Kambro-silurlagrekken.



Figur C3 Diagram som viser forenklet utviklingstrender fra etasje 2 til etasje 4. Merk at dette er trender med noe overlapp mellom de ulike etasjer i kambro-silurlagrekken.

Figur C4 viser et tilsvarende forenklet diagram for uran (U), aluminium (Al) og uorganisk karbon (total inorganic carbon, TIC) hvor det ikke er differensiert mellom ulike lag i Alunskiferformasjonen. Diagrammet viser at det er et visst overlapp mellom de ulike skiferformasjonene (se tabell 1). Alunskiferformasjonen består av 6 ulike ledd. Fire av disse er vist med separate geokjemiske fingeravtrykk i figurer senere i teksten.



Figur C4 Eksempel på systematiserte analyser fra etasje 2-3b og 3c (Tabell C1). Det er spesielt viktig å ha kontroll på denne delen av kambro-silurlagrekken. Bakgrunnen for det er at lagrekken på nivå 3 består av tynne svarte, grå og kalkrike leirskiferhorisonter.

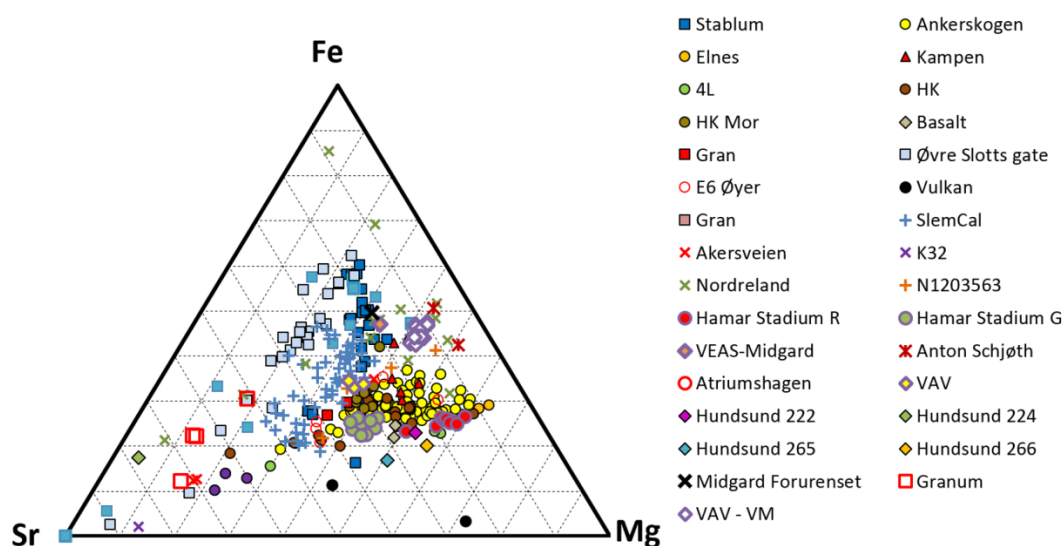
Uran er et element som anrikes i sedimenter ved oksygenfrie eller oksygenfattige forhold. Generelt kan en derfor også slutte fra diagrammet i Figur C4 at de såkalte redoks grunnstoffer kan anrikes i sedimentet ved reduserende (oksygenfri eller-fattige) forhold. Figuren viser at uraninnholdet er høyest i etasje 2 og avtar opp i etasje 3a og 3b. Det er derfor av betydning å vite hvor i Alunskiferformasjonen prosjektet er plassert. Urankonsentrasjoner kan benyttes til å skille svarte leirskifre fra mørke grå leirskifere. Det er særlig svarte leirskifre fra Alunskiferformasjonen og Galgebergskiferen i Tøyenformasjonen som har høyere konsentrasjoner av uran enn de andre leirskifrene.

Viser kjemiske analyser høyere urankonsentrasjoner enn ca. 60 mg/kg tyder det på at analyse materialet kan knyttes til Alunskiferformasjonen. Er urankonsentrasjonene større enn ca. 15 mg/kg er det sannsynlig at analysen kan stamme helt eller delvis fra alunskifer eller galgebergskifer. En skal være oppmerksom på at det kan være en blandprøve særlig der analyse materialet er fra borekaks eller sprengstein fra tipp eller deponi. Analyser som tar sikte på å avklare om en svart leirskifer (alunskifer) faller inn under bestemmelsene for

radioaktivt avfall skal utføres med omhu. Det er egne prosedyrer for dette nevnt i kapittel 5. Masser med en aktivitet på >1 Bq/g regnes som radioaktivt avfall.

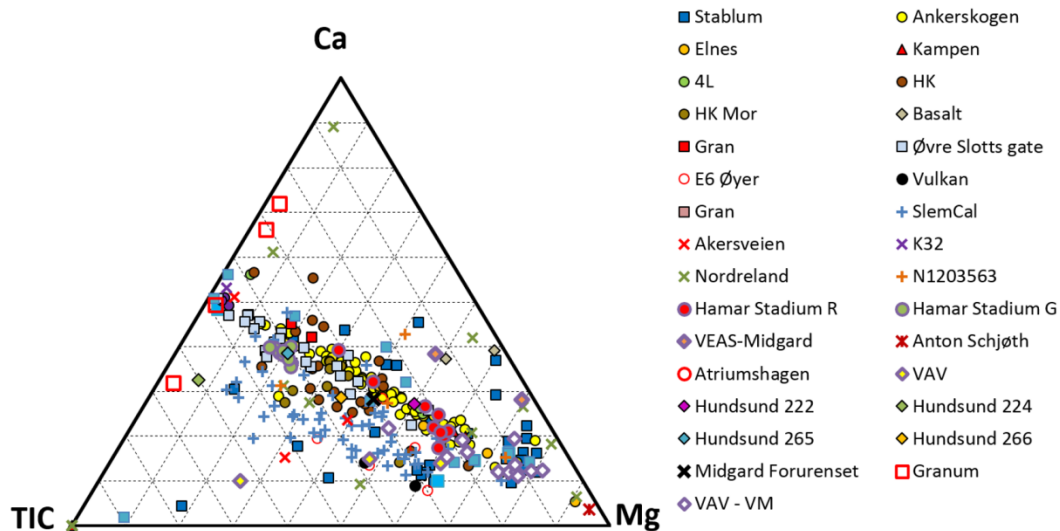
Figur C5 viser trekantdiagram for strontium (Sr), jern (Fe) og magnesium (Mg). Diagrammet viser variasjoner i Elnesformasjonen (4a) og er med å dokumentere regionale forskjeller i denne leirskiferhorisonten. Analysene fra etasje 4a på Hamar (gule og brune fylte sirkler) viser at det er store variasjoner i konsentrasjon for de enkelte grunnstoffene. Årsak til at det er så stort sprik i en og samme horisont som i Elnes på Hamar er at pyritt ikke er finfordelt i leirskiferen, men ligger som aggregater. Det samme gjelder knoller og konkresjoner av kalk (karbonater).

Morenematerialet som dekker berggrunn kan være langtransportert eller korttransportert. Analyser fra Hamar viser at morenematerialet er korttransportert og har karakteristiske trekk som knytter dette materialet til erosjon i Elnesformasjonen (Bjørge formasjonen lokalt navn i Hamar området).



Figur C5 Strontium (Sr) har relativt like kjemiske egenskaper som kalsium (Ca) tar plassen til Ca i mineraler. Forholdet mellom disse to elementene har variert over tid. Det er en trend der Sr/Ca avtar fra etasje 2 opp mot etasje 4.

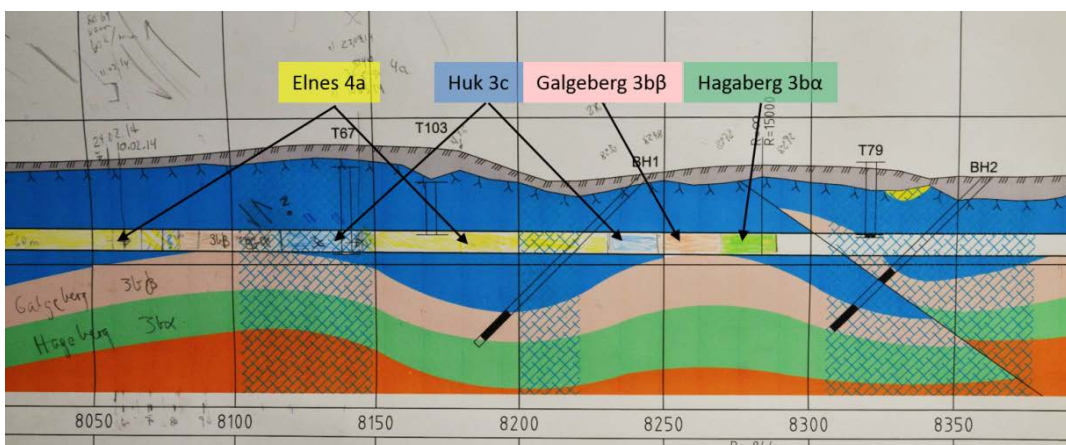
Ser en på forholdet mellom TIC (uorganisk karbon), Mg (magnesium) og Ca (kalsium), kan en danne seg et bilde av hvilke karbonater (mineraler med syrenøytraliserende egenskaper) som er tilstede i de ulike etasjer i kambro-silurlagrekken. Et eksempel er vist i Figur C6. Trenden her er at etasje 3a plasseres nærmere kanten TIC-Mg i diagrammet enn svarte og grå leirskifer fra andre nivåer i kambro-silurlagrekken.



Figur C6 TIC-Mg-Ca. Toppen (3a) av Alunskiferformasjonen (blå kors) skiller seg fra andre analyser fra Alunskiferformasjonen (etasje 2, blå fylte firkanter). Alunskiferformasjonen ved Granum viser et stort sprik i Ca/TIC forholdet. I dette diagrammet viser disse analysene ikke samsvar med Alunskiferformasjonen.

3.2.3 Eksempel: Tunnelprosjekt Gran-Jaren

I flere prosjekt kan det være vesentlig å ha kontroll også på de grå leirskifrene. Særlig gjelder dette der Elnes (4a) og/eller Huk (3c) forventes i byggegropp. Et godt eksempel her er tunnelprosjektet Gran-Jaren, der traséen går gjennom flere skiferhorisonter. Her logges kjerner boret foran stoff for å kunne bestemme/forutsi hvilke leirskiferhorisonter traséen vil gå i fremover. Her er vinkelen skifriheten danner med tunneltraséen viktig. Jo større vinkel skifriheten danner med traseen, jo raskere vil skifte i bergartstype skje, se Figur C7.



Figur C7 Tunneltraséen og opptreden av ulike leirskifre på stoff.

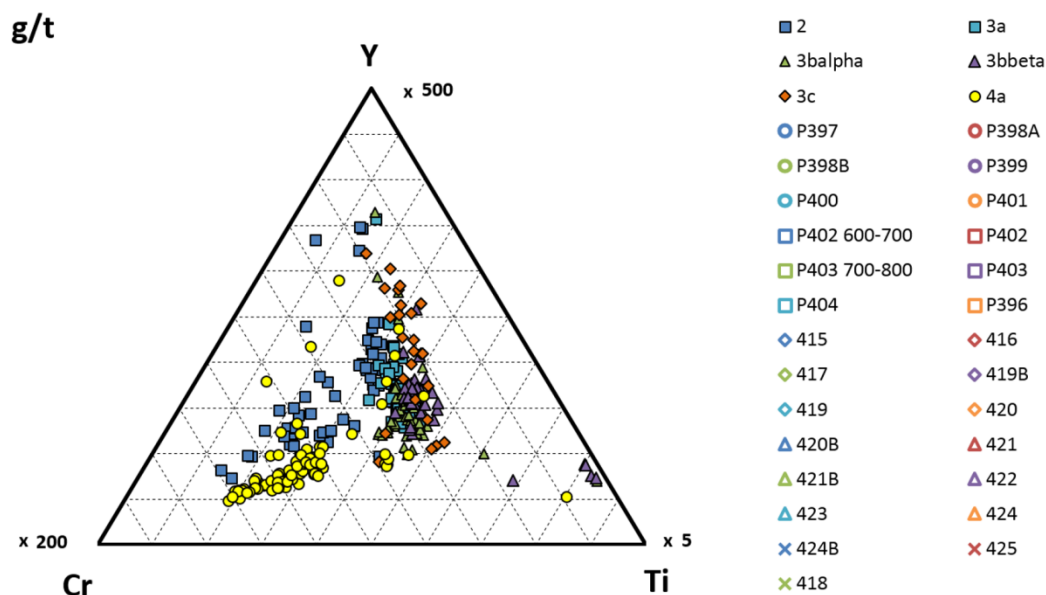
I kjernematerialet er Huk (3c) og Elnes (4a) ganske like av utseende. Bakgrunnen for å differensiere mellom Huk og Elnes er at om traséen går i Huk formasjonen som er kanskje mindre enn 20 meter mektig, så er sannsynligheten stor for at en kan nærme seg Galgebergledet (3b α) som er en mye mer potensiell forurensende skifer. Om en identifiserer Elnes formasjonen i kjerneloggen, betyr det at en først skal påtreffe Huk formasjonen før traseen kommer i kontakt med Galgebergledet (se også tabell 1).

Statens vegvesen har ansvaret for å identifisere og å karakterisere tunnelmassene. Kjerner logges derfor systematisk for ingeniørgeologiske parametere og for å identifisere type leirskifer som vil påtreffes i de kommende salver. Dette er også nødvendig som dokumentasjon på type leirskifer og håndtering av denne.

I prosjekteringsfasen ble det gjennomført geologisk kartlegging i dagen, bestemt plassering og orientering og lengde av kjerneboring fra terreng og ned i tunneltraséen. NGIs metode ble benyttet for identifisering av de ulike leirskifre (4a-2) og kjemiske analyser ble tatt systematisk og sammenstilt med referanseanalyser fra sentralt Oslo, Slemmestad og Hokksund. Analyse materialet ble benyttet som del av grunnlag i søknad til miljømyndighetene om en lokal deponering i veglinjen.

I oppfølging av kjerneloggingen er det avdekket at visse soner består av sammenblandinger av flere horisonter. Dette kan forklares med den skjærdeformasjon denne lagpakken har blitt utsatt for i forbindelse med den kaledonske (norske) fjellkjeden. Dette understreker igjen viktigheten av å utføre kjemiske analyser som identifiserer og karakteriserer type leirskifer, samtidig som en kan dokumentere avvik fra en referanseserie.

Trekantdiagram som skiller mellom Elnes og Huk formasjonen kan gi nøkkelinformasjon i forbindelse med tunneldrift og prosjektering av løsninger og utforming av byggegroper (se Figur C8). Huk formasjonen har en midtre del som er vanskelig å skille fra Elnes formasjonen. Siden Huk formasjonen (3c) er fra 6 til ca 20 meter mektig, kan en påtreffe svart leirskifer fra Galgebergskifer (3b β) innen få meter.



Figur C8 Diagram som skiller mellom Huk (3c) og Elnes (4a) (Tabell C1). Dette diagrammet er svært nyttig når det er viktig å vite om en er i Huk formasjonen eller i Elnes formasjonen. Bakgrunnen for dette er at Huk formasjonen kan være fra 6 til 20m mektig

Her følges kjernelogging opp med analyser med håndholdt XRF. Det er samsvar mellom visuell logging (NGI) og analyseresultater fra det håndholdte XRF instrumentet (Niton gold Xlt3) i forhold til tidligere utførte kjemiske analyser og identifisering.

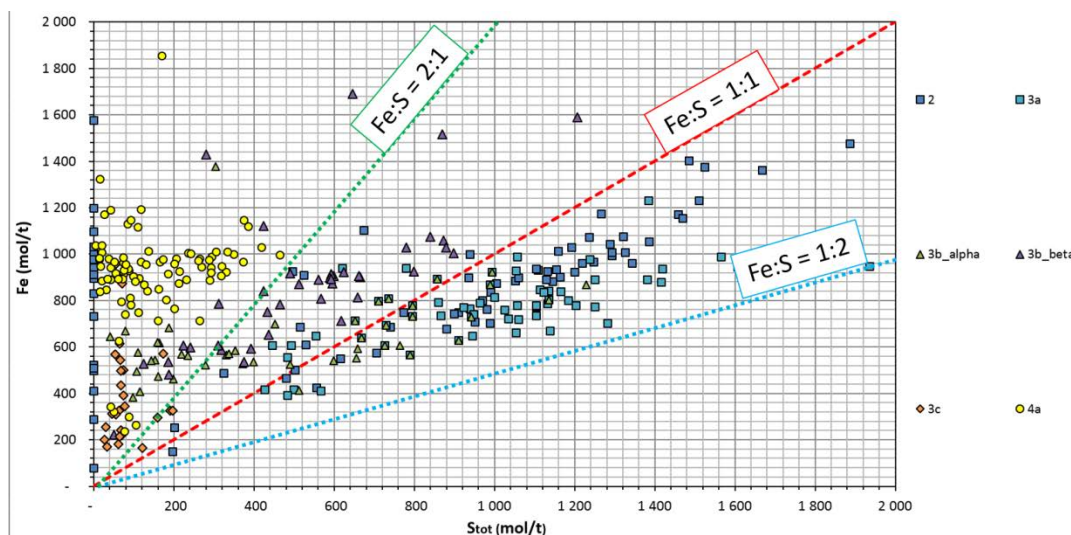
Dette er både nødvendig som dokumentasjon overfor miljømyndigheter og for bestemmelse av hvordan tunnelmassene skal håndteres, fritt eller i deponi. Det er her spesielt viktig å kunne identifisere Huk (3c) og Elnes (4a) fra hverandre med tanke på forutsigbarhet for deponi av tunnelsteinen.

3.3 Fe-S diagram

Forholdet mellom jern (Fe) og svovel (S) indikerer om en kan knytte innhold av sporelementer som kan medføre forurensning til sulfider og/eller silikater. Et overskudd av jern i forhold til svovel kan indikere at en del av tungmetallene i analysen er bundet i silikater eller oksider. Tungmetaller bundet i andre mineraler enn sulfider vil ikke frigjøres til omgivelsene (via en vannfase) før disse mineralene forvitrer. Ved lav pH (< 4), vil også silikatene gå i oppløsning og øke omfang av frigjøring av tungmetaller til omgivelsene. Dette vil kunne observeres ved å se på økte aluminiumkonsentrasjoner i vannanalyser. En skal være oppmerksom på at enkelte sporelementer (As, Cd, Co, Mo, Ni, Sb, U og Zn) kan frigjøres ved nøytrale pH forhold (NRD).

Figur C9 viser forholdet mellom Fe og total S (S_{tot}) for referanseprøver fra ulike etasjer. Et Fe:S forhold på 1:1 indikerer at alt jern er bundet som sulfider.

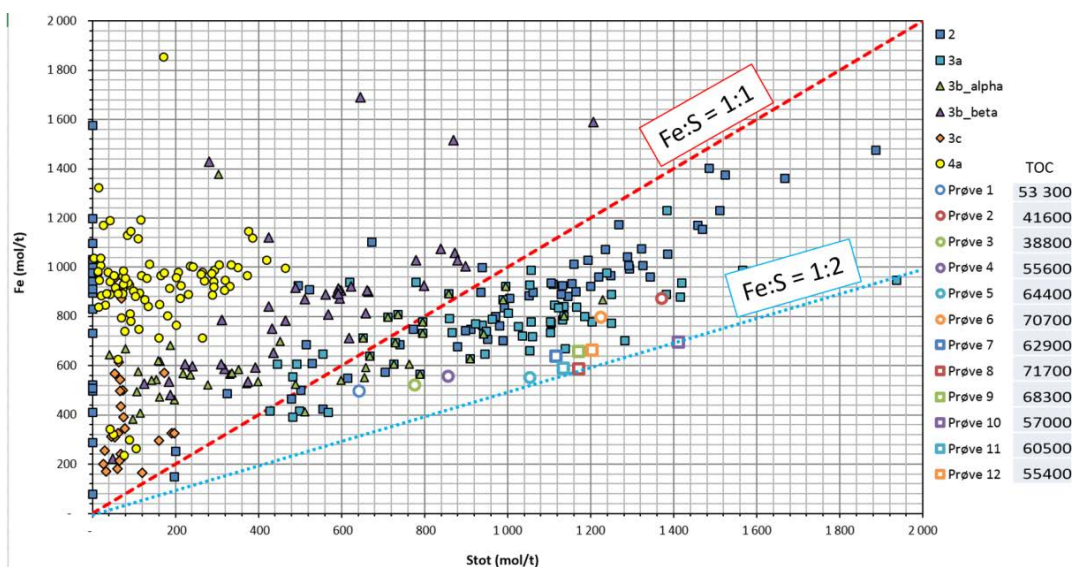
Generelt gjelder at det er sannsynlig at sulfider som forekommer i en svart skifer er både pyritt (FeS_2) og magnetkis (pyrrhotitt, $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$). Dette framkommer også av Fe-S diagrammet der hovedmengden av alunskifer plasseres i feltet mellom Fe:S = 1:1 og Fe:S = 1:2.



Figur C9 Fe (jern) – S (svovel) diagram i mol/t. Denne figuren indikerer hvor jern (Fe) er bundet. Overskudd på jern i analysen indikerer at jern (og dermed også en del av forurensende sporelementer) er bundet i andre mineraler enn sulfider. Analyser som plasseres under Fe:S = 1:2 indikerer at svovel er bundet i andre mineralforbindelser eller i organisk karbon (TOC) delen.

Det kan i Alunskiferformasjonen forekomme at analysene viser et høyere svovelinnhold enn det er jern i analysen til å danne sulfidmineraler. Et eksempel er vist under i Figur C10. Om svovelinnholdet (i mol) er høyere enn det er jern til å danne sulfider, må svovel være bundet enten i sulfater eller som organisk svovel i organisk karbon (TOC) delen. Det er identifisert CaSO_4 (Anhydritt) i friske prøver av alunskifer. Det er foreløpig ikke gjort analyser for å avklare om noe av svevelet er bundet i TOC.

De kjemiske analyser viser at det er mellom 5 og 8 % TOC i alunskifer i Oslo sentrum. Ser en på egenvekt (tetthet) på TOC og resten av skiferen, så er egenvekten lavere for TOC. Volummessig kan derfor TOC innholdet være større enn vektprosenten.



Figur C10 Fe-S diagram med 12 analysepunkter fra alunskiferformasjonen i Oslo sentrum (Prøve 1 – Prøve 12). For slike analyser må en vurdere om svovel kan være bundet i andre forbindelser som i sulfatmineraler eller i TOC. TOC er oppgitt i mg/kg.

3.4 AP-NP diagram

Syredannende potensiale (AP=Acidification potential) vurderes i forhold til nøytraliserende potensiale (NP=Neutralisation potential). Dette er en statisk metode basert på målte konsentrasjoner av TIC (uorganisk karbon) og S (svovel) i skiferen (Lawrence and Wang, 1997). Resultater fra målingene av TIC og S regnes om til mengde kalsium karbonat (CaCO_3) i kg/tonn som foreligger i leirskiferne (basert på TIC konsentrasjon) i forhold til potensiell mengde CaCO_3 som er nødvendig i leirskiferen for å hindre at det igangsettes kjemiske prosesser som reduserer pH og en akselerert forvitring (basert på S målingene). Det antas her at all TIC foreligger som karbonat (CO_3) og at all svovel foreligger som sulfid. Metoden kan derfor føre til en overestimering både det nøytraliserende og syredannende potensiale.

Det nøytraliserende potensiale (NP) kan beregnes ved følgende formel:

$$\text{NP} = 83,33 \times \% \text{TIC} \quad (6)$$

Hvor

NP: Nøytraliserende potensiale av karbonater [kg CaCO_3 /t]

%TIC: Uorganisk karbon innhold i prosent [-]

Det syredannende potensiale (AP) kan beregnes ved følgende formel:

$$\text{AP} = 31,25 \times \% \text{S}_{\text{sulfider}} \approx 31,25 \times \% \text{S} \quad (7)$$

Hvor:

AP: Syredannende potensial av sulfidene [kg CaCO_3 /t]

% $\text{S}_{\text{sulfider}}$: Sulfidinnhold i prosent [-]

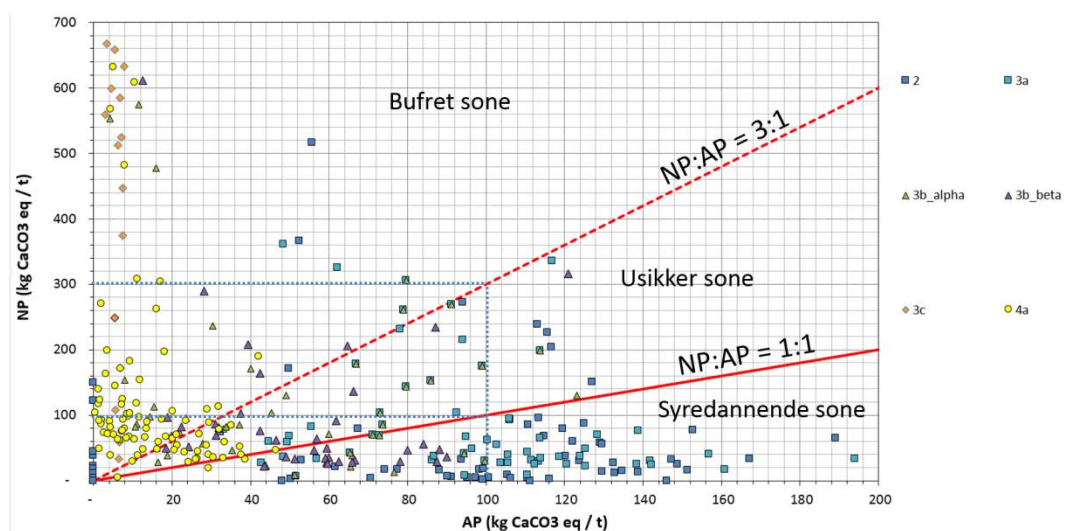
% S: Svovelinhold i prosent [-]

Beregningene forutsetter kun direkte oksidering av pyritt, dvs. en mol pyritt produserer to mol av H^+ som igjen er nøytralisert av to mol kalsitt ($CaCO_3$).

Netto nøytralisasjons potensialet (NNP) kan da beregnes til:

$$NNP = NP - AP \quad (8)$$

Figur C11 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. Dette deler diagrammet inn i tre soner; syredannende sone ($NP:AP < 1:1$), usikker sone ($1:1 < NP:AP < 3:1$) og bufret sone ($NP:AP > 3:1$).



Figur C11 AP-NP diagram som viser 3 soner: syredannende sone ($NP:AP < 1:1$), usikker sone ($1:1 < NP:AP < 3:1$) og bufret sone ($NP:AP > 3:1$).

Det understrekes at den statiske testen er basert på forenklinger, og jo lengre vekk en prøve befinner seg fra "Usikker sone" i diagrammet, jo sikrere kan man være på resultatet. Befinner prøven seg i nærheten av denne sonen, bør man være mer forsiktig med tolkningen.

Det er viktig å ta i betraktning at forvitningsreaksjoner som er nøytraliserende og forvitningsreaksjoner som er syredannende er ikke like raske. Karbonatmineralene eksempelvis (særlig $CaCO_3$) kan forvitte raskere enn sulfidene. I et slikt tilfelle kan kapasiteten til å bufre være brukt opp tidligere enn forvitningsforløpet for de syredannende mineralreaksjoner.

I tillegg er det viktig å vurdere hvordan en tar ut bergartene samt knusningsgraden. Det er størrelsen på de knuste fragmenter som styrer overflatearealet som eksponeres for

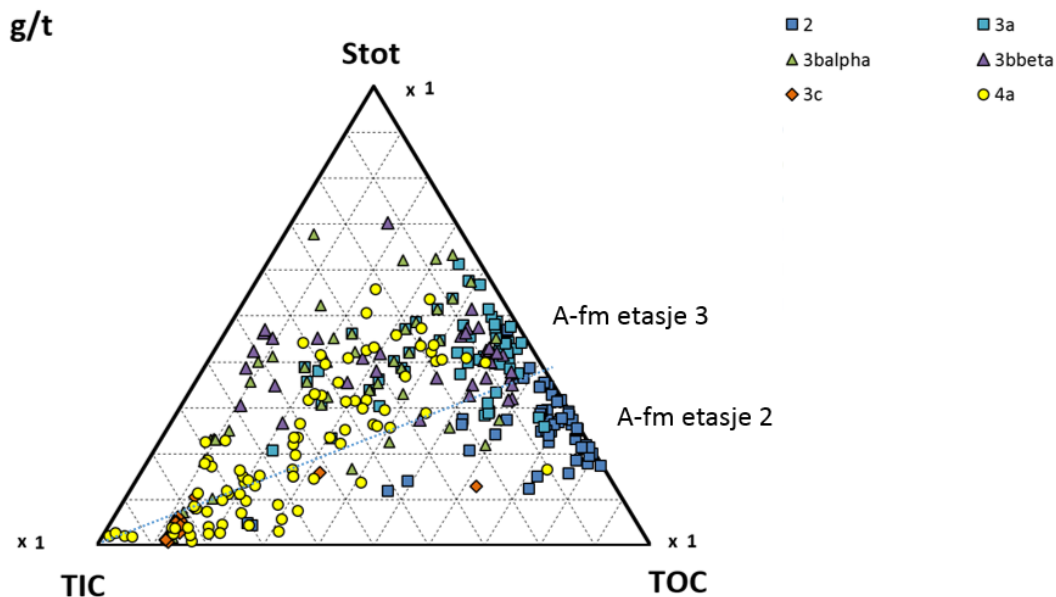
forvitring. Et stort overflateareal i forhold til volum medfører raskere forvitring enn et lite overflateareal i forhold til volum.

En minste konsentrasjon og et minste volum kreves for å kunne danne et forvittringsmiljø der sulfidforvitringen (redoksreaksjonene) akselererer. For at dette skal kunne skje, må pH verdien reduseres ned mot 4 og lavere. Da katalyseres forvittringsreaksjonene (redoksreaksjonene) med flere ti-potenser.

3.5 TIC-TOC-S - Diagram

Forholdet mellom TIC (uorganisk karbon, karbonater), TOC (organisk karbon, her karbonforbindelser som antrasitt) og S (svovel, her sulfider og i mindre grad sulfater) gir viktig informasjon og supplerende informasjon til AP/NP diagrammet. Innholdet av TOC påvirker forvitringsegenskapene til leirskifer da fissibiliteten (evnen til laminering i svært tynne lag, < 1mm) øker med TOC innholdet.

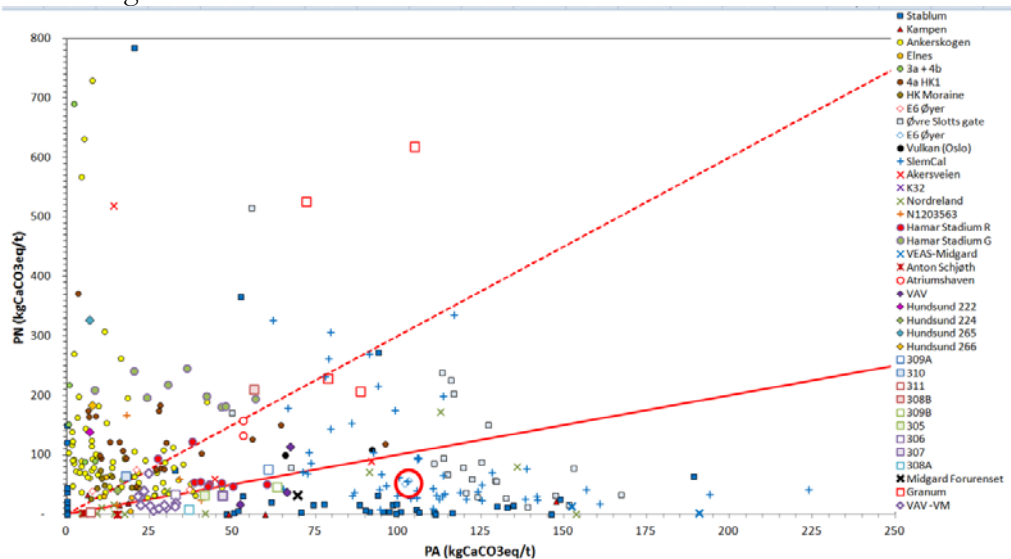
TOC i leirskifer er på kullmineralform, vanligvis antrasitt. Dette er ikke biologisk nedbrytbart organisk materiale, og vil ikke representere noe potensiale for gassdannelse.



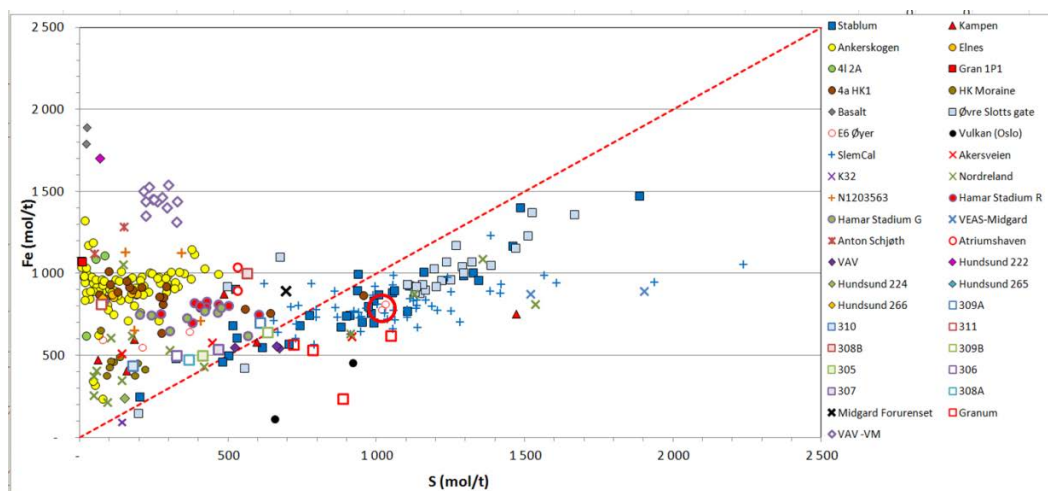
Figur C12 TIC-TOC-S. Trekantdiagram som viser uorganiske karbon (TIC, karbonat) -organisk karbon (TOC)-svovel (S). Dette diagrammet gir i tillegg til AP/NP diagrammet informasjon om relative forhold mellom de tre elementer og særlig viktig er TOC, da denne påvirker forvitringsegenskapene. A-fm = Alunskiferformasjonen.

4 Eksempler på tolkninger basert på diagram

Figur C13 og Figur C14 viser eksempler på henholdsvis AP/NP diagram og Fe/S diagram. Diagrammene viser stor spredning i punkter med samme symbol og illustrerer således at en kan gjøre feilvurderinger av analyser basert på dette diagrammet alene. Diagrammet understreker nødvendigheten av å knytte en analyse til en skiferhorisont med hjelp av trekantdiagrammer.



Figur C13 AP/NP diagram. Diagrammet er basert på kjemisk analyse. Legg merke til spredning i punkter med samme symboler. Rød ring markerer svart leirskifer fra Biri eller Brøttumformasjonen som er eldre enn Alunskiferformasjonen.



Figur C14 Fe/S diagram. Rød ring markerer svart leirskifer som er eldre enn kambro silurlagrekken. Analysene kan knyttes til Biri eller Brøttum formasjonene mellom Hamar og Lillehammer. Generelt gjelder at analyser av bergarter som plasseres under stiplede linje må vurderes som potensielt syredannende. Når analyser plasseres langt under rød stiplede linje, indikerer det at svovel kan være bundet i sulfater eller i karbon (TOC).

Eksempel 1

Ser en på de gule fylte sirkler i diagrammet i Figur C13, plasseres prøvene i både syredannende ($NP/AP < 1$), mulig syredannende ($1 < NP/AP < 3$) og bufrende ($NP/AP > 3$), dvs. stor spredning i det syredannende potensialet. I Fe/S diagrammet i Figur C14 plasseres disse godt over den stiplede linjen ($Fe:S=1$). Det er altså overskudd av jern i forhold til svovel. Jern og tungmetaller er derfor også knyttet til andre mineraler enn sulfider.

Denne skiferhorisonten (4a, Hamar) som disse prøvene representerer (gule fylte sirkler) er ikke syredannende. Lokalt kalles denne Bjørgeformasjonen. Årsak til at det er så stor spredning i AP/NP diagrammet er at mineralene ikke er jevnt fordelt i slike leirskifre. Det vil derfor være sannsynlig at en feilvurderer et bergartsvolum basert på enkelte analyser. Det er derfor viktig å kunne knytte en analyse til en leirskiferhorisont i kambro-silurlagrekken ved hjelp av trekantdiagrammer med utvalgte elementer.

Eksempel 2

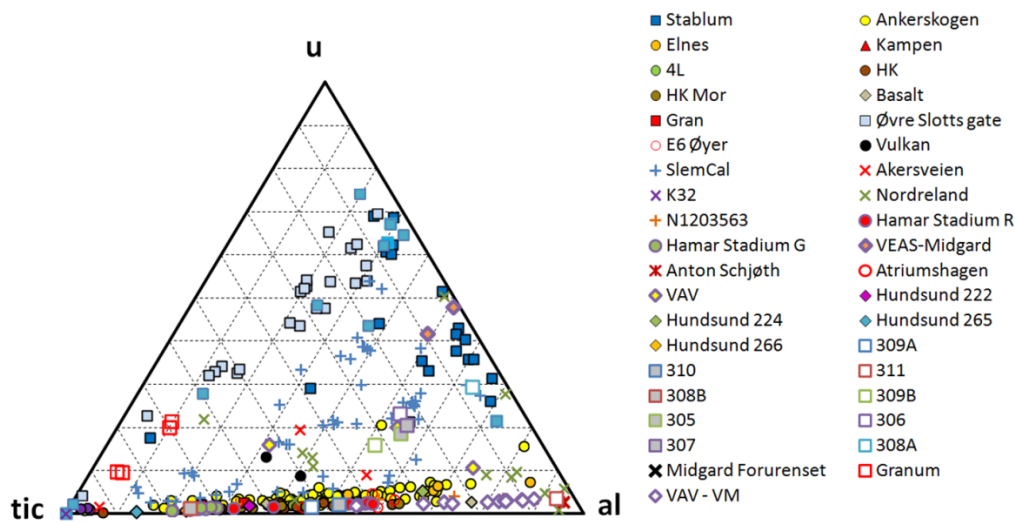
Ser en på blå fylte firkanter i Figur C13 og Figur C14 er disse tilknyttet Alunskiferformasjonen. De aller fleste av analysene i Figur C13 plasseres ned mot linjen for AP aksens i diagrammet. Det forekommer derimot enkelte "slengere" over stiplet linje. Disse er "slengere" som er kalkrike, enten kalkkonkresjoner eller tynne kalkrike lag som kan forekomme i Alunskiferformasjonen. Betrakter en disse isolert kan en feiltolke alunskifer som en leirskifer med gode buffringsegenskaper, hvilket absolutt ikke er tilfelle. I Fe/S diagrammet i Figur C14 ligger analysene på en linje med en slakere helning enn $Fe:S = 1$, med andre ord klassisk plassering for alunskifer.

Eksempel 3

Røde firkanter uten fyll (Granum) i Figur C13 tilhører Alunskiferformasjonen ved Gran på Hadeland. Ut fra AP/NP diagrammet kan de tolkes dit hen at de har god buffringsevne. Alle fire analyser viser høyt kalsium (Ca) innhold. Ca innholdet kan her muligens forklares med påvirkning fra smeltebergarter i nærheten.

I Fe/S diagrammet i Figur C14 har de samme prøvene overskudd av svovel i forhold til jern $Fe:S < 1$. Ser en også på mengden jern (Fe) ser en at antall mol Fe er mellom 650 og 200 mol/tonn. Det må derfor her korrigeres for sulfidmengden som fremkommer i AP/NP diagrammet, da AP vurderes for høyt.

I Figur C15 plasserer de røde firkanter seg i linjen mellom TIC hjørnet og analyser fra Øvre Slottsgate. Granum-analysene har således felles trekk med analysene fra Øvre Slottsgate i Oslo. Granum-analysene kan være påvirket av smeltebergarter.



Figur C15 Trekantdiagram som viser forholdet mellom TIC (uorganisk karbon), Al (aluminium) og U (uran). I dette diagrammet vil analyser fra leirskiferformasjoner med lite uran plasseres nede langs TIC-Al linjen (Hagabergskifer, Hukskifer og Elnesskifer), mens mer uranrike svarte leirskifre som alunskifer og galgebergskifer vil legge seg høyere i diagrammet.

Eksempel 4

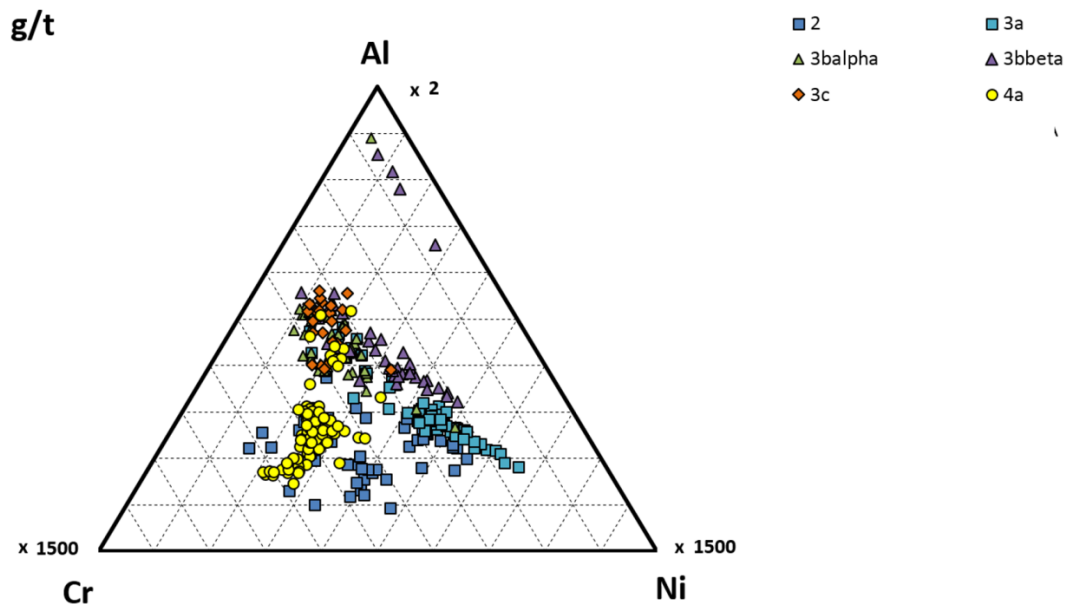
Fiolette doble pyramider tilhører Elnesformasjonen i Oslo ved Grunerløkka. Ut fra AP/NP diagrammet (Figur C13) karakteriseres denne som potensielt syredannende da analysepunktene plasseres under den heltrukne røde linje ($NP/AP=1$). Elnesformasjonen i Oslo området har et annet kjemisk fingeravtrykk enn tilsvarende formasjon i Hamar området. Det er regionale forskjeller for de fleste av leirskifrene i kambro-silurlagrekken. I Fe/S diagrammet (Figur C14) kan en ut fra plasseringene i diagrammet lese av at $Fe:S \gg 1$. Det er mellom 5 og 7 ganger mer jern enn svovel i analysene. Det er således et betydelig overskudd av jern i forhold til svovel. I de kjemiske analysene vil derfor tungmetallene være bundet både i silikater og i sulfider.

Eksempel 5

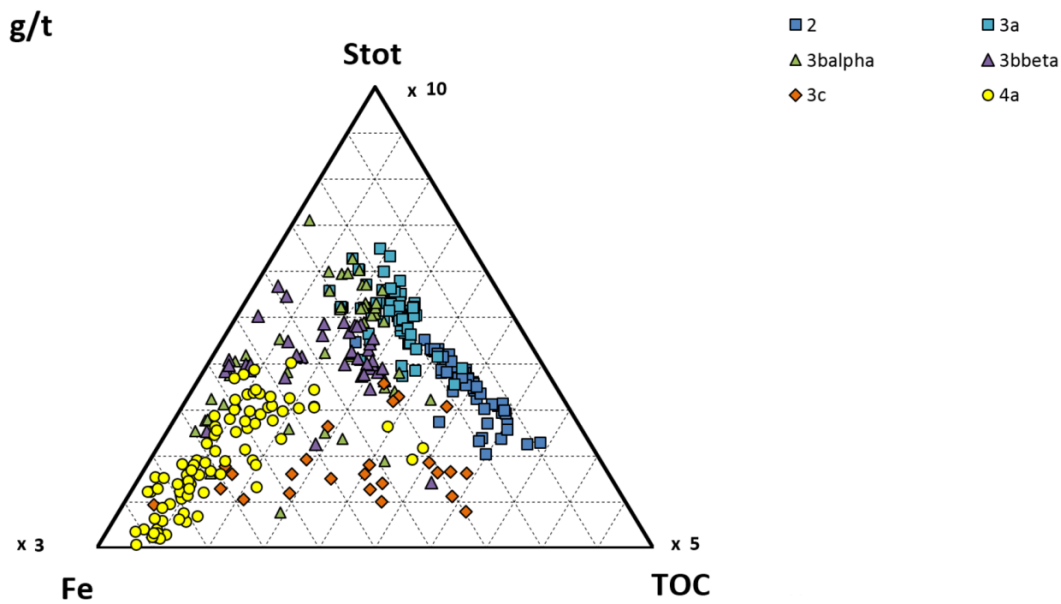
Det er svarte leirskifre som er eldre enn kambro-silur. Disse tilhører Biri og/eller Brøttum formasjonene med hovedutbredelse mellom Hamar og Lillehammer. Disse skiller seg fra de svarte leirskifrene fra kambro-silur ved at det har lavt innhold av uran. Ellers har de likhetstrekk med syredannende svarte leirskifre (Fe/S diagrammet, AP/NP diagrammet og Fe-TOC-S diagrammet).

4.1 Identifisering Galgebergskifer – Alunskiferformasjonen

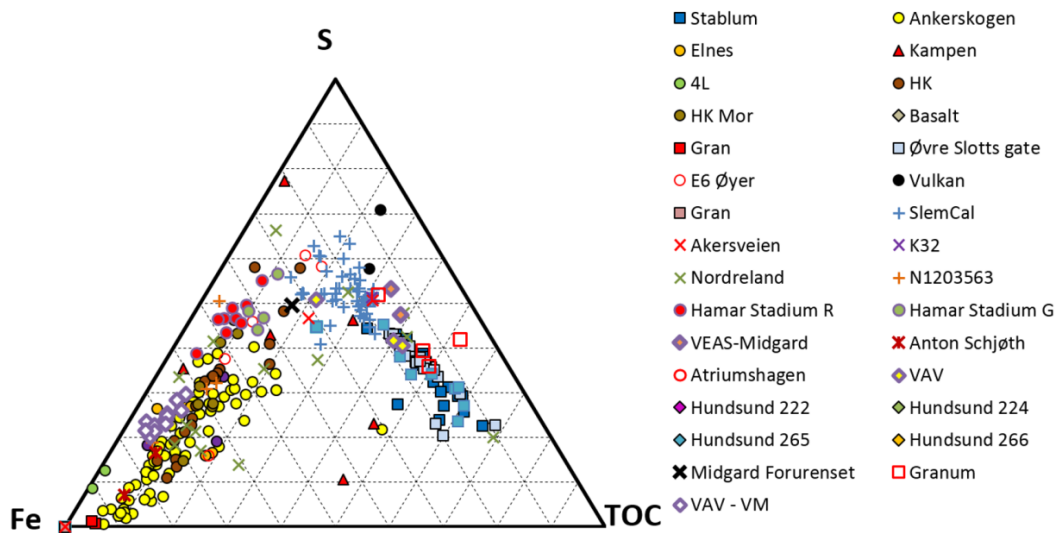
Galgebergskifer og alunskifer er begge svarte leirskifre. De har derfor også en del overlappende geokjemiske fingeravtrykk. Her presenteres to trekantdiagram (Figur 16 og 17) som begge differensierer mellom Galgeberg og da særlig den øverste del av Alunskiferformasjonen (3a) og Galgebergskifer (3bβ). Normalt har Alunskiferformasjonen et høyere innhold av TOC, og evnen til å spalte i løvtynne lag er derfor bedre utviklet i Alunskiferformasjonen. Galgebergskifer har et noe høyere innhold av aluminium og silisium. Mineralogisk betyr det at alunskifer har et noe høyere innhold av leirmineraler og Galgebergskifer har et noe høyere innhold av feltspat. Fe-TOC-S diagrammet i Figur 17 samler analysene fra de ulike enheter ganske bra. Unntaket her er etasje 3c, Huk formasjonen.



Figur C16 Cr (krom)-Ni (Nikkel)-Al (aluminium) kan anvendes for å skille Galgebergskifer (3bβ) fra Alunskiferformasjonen (2-3a)



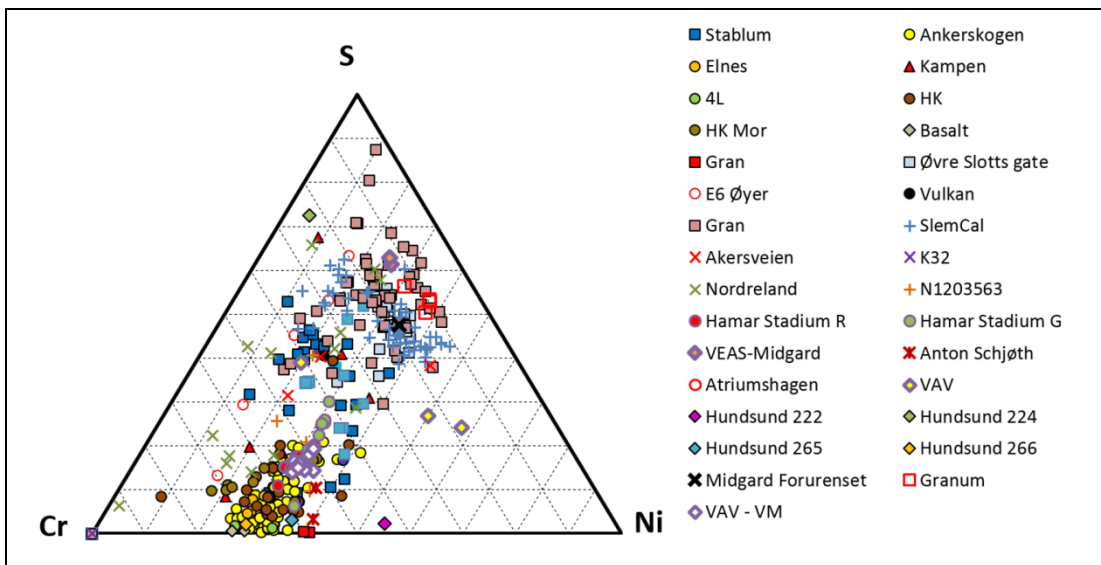
Figur C17 Fe (jern) - TOC (organisk karbon) - Stot (totalt svovel) diagram. Her er brøgt inn en tredje komponent i forhold til Fe-S diagrammet. Etasje 2 i Alunskiferformasjonen har et høyere TOC innhold enn etasje 3a



Figur C18 Forholdet mellom Fe (jern), TOC (organisk karbon) og S (svovel). De karakteristiske svarte leirskifre har som hovedregel. Her vises mer detaljerte differensierte analyser enn i Figur C17

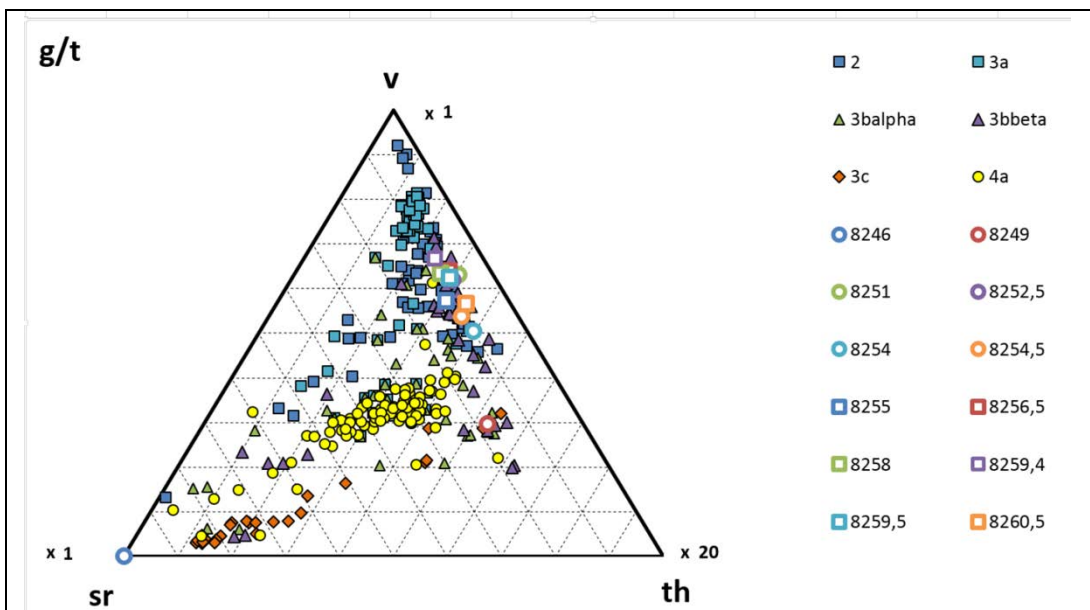
4.2 Analyser fra håndholdt XRF

Håndholdte XRF analyseinstrumenter har en større usikkerhet enn kjemisk analyse (ICP-OES) jfr. Tabell 2. Det er derfor vesentlig at det håndholdte XRF instrumentet kalibreres mot kjemiske analyser til det formålet slik instrumenter skal brukes. Det er også viktig å vite hva som er deteksjonsgrensen for de enkelte elementer i de ulike analyseprogrammene på slike instrumenter.



Figur C19 Analyser fra ukalibrert XRF. Rosa fylte kvadrater gir stor spredning og i dette tilfelle for høye svovel verdier. Nikkel har dårlig deteksjonsgrense i håndholdt XRF.

Statens vegvesen har kalibrert XRF instrument med referanse i kjemiske analyser. Det er rimelig godt samsvar med de kjemiske analysene (Figur 20).



Figur C20 Sr (strontium) –Th (thorium) – V (vanadium). Det er god overensstemmelse med analysen fra det kalibrerte håndholdte XRF instrumentet og referanseanalysene. Analysene er utført på utborede kjerner i forbindelse med tunneldrivingen.

Personer som utfører analyser med håndholdte XRF instrumenter bør ha tilstrekkelig kjennskap til begrensningen i slike instrumenter og hvilke innstillinger som skal benyttes. Ved identifikasjon av leirskifer på bakgrunn av analyseresultater fra XRF instrumenter, må en samtidig vurdere hvilke grunnstoffer som har lavest deteksjonsgrense og lavest usikkerhet. Som utgangspunkt velges tunge grunnstoffer. I tillegg må det tas hensyn til karbonat innholdet(TIC). Da karbonater ikke kan registreres ved hjelp av XRF analysemetoden kan det antas at alt kalsium (Ca) er bundet i karbonatmineraler. Magnesium (Mg) og Mangan (Mn) kan også inngå i karbonater, men her er det usikkerhet knyttet til hvilke leirmineraler (kvalitativt og kvantitativt) som finnes i leirskifrene. Dette på grunn av at det kan være Fe-Mg-(Mn) sjiktsilikater. Kalsium forventes ut fra mineralsammensetning i slike lavmetamorfe leirskifre å inngå i Kalkspat (CaCO_3). Det er kjent at det i enkelte av disse leirskifrene kan være dolomitt (MgCO_3) og magnesitt ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$). for vurdering av syredannende potensiale (AP/NP diagram) bør en derfor kalibrere mot kjemisk analyse der TIC er direkte målt.

5 Vannanalyser

Vannanalyser er et supplement til bergartsanalyser. Vannanalyser gir grunnlag for å vurdere forvittringsomfang særlig i svarte leirskifer. En vannanalyse fra vann i kontakt med frisk skifer vil være lite påvirket av frigjorte grunnstoffer fra skiferen, mens en vannanalyse fra vann i kontakt med en forvitret skifer kan inneholde svært høye konsentrasjoner av

tungmetaller, uran og aluminium. Vannanalyser gir derfor et godt bilde av hvilken tilstand (frisk - grad av forvitring) skiferen er i

Vannanalyser bør omfatte både hoved- og sporelementer, pH, ledningsevne, SO_4 , HCO_3 , NO_3 , og evt Cl, F, og PO_4 .

Ved å analysere filtrerte og ufiltrerte prøver, får en et grunnlag for å vurdere om de ulike elementer er partikkelbundet. Ser en på aluminium, vil Al^{3+} være fritt løst ved lave pH og partikkelbundet ved nøytrale pH. Ni^{2+} ser ut til å være fritt løst uavhengig av pH.

Vannanalyser er nødvendig for prosjektering av tiltak. Vannanalyser gir også informasjon om det er et grunnvannsig eller det kan være tilførsel av overflatevann.

Tabell C3 Eksempler på vannanalyser fra ulike kilder, både forvitret og uforvitrede masser.

Element	Enhet	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 4	Prøve 5	Prøve 6	Prøve 7	Prøve 8	Prøve 9
pH		2,62	5,76	6,18	6,89	7,18	6,54	6,92	7,59	7,54
Ledningsevne	mS/m	1210	1933	1969	1368	1370	1406	1423	1026	1028
DOC	mg/l	2,24	1,35		<0.50		0,73		0,61	
Ca	mg/l	475	450	444	288	284	278	281	203	200
Fe	mg/l	2810	<0.002	0,626	<0.002	0,518	<0.002	0,766	0,0095	0,781
K	mg/l	<20	7,19	7,31	8,4	8,67	8,38	9,36	8,22	8,91
Mg	mg/l	1200	19,4	18,7	17,7	17,3	26,9	27,4	12,6	12,1
Na	mg/l	61,3	0,523	0,689	0,385	<0.5	0,429	0,511	0,404	<0.5
Al	µg/l	1E+06	20,1	934	1,71	817	1,35	1510	11,8	1850
As	µg/l	1470	<0.3	<0.5	<0.3	<0.5	<0.3	<0.5	<0.05	0,741
Ba	µg/l	<50	53,2	53,1	33,5	54,1	35,2	60,4	46,4	94,4
Cd	µg/l	828	94,4	116	28,5	30	64,1	65,4	2,66	2,85
Co	µg/l	6470	120	124	112	117	110	116	1,39	1,82
Cr	µg/l	1470	0,0782	<0.9	<0.05	1,31	0,0629	1,41	0,122	1,76
Cu	µg/l	17600	47,1	37,5	1,72	3,86	3,76	4,5	3,1	4,31
Hg	µg/l	<0.02	<0.002	<0.02	<0.002	<0.02	<0.002	<0.02	<0.002	<0.02
Mn	µg/l	32600	2280	2370	3360	3450	2890	3060	50,2	55,8
Ni	µg/l	43600	1370	1350	1300	1280	1380	1400	55,5	64,5
Pb	µg/l	<30	0,166	0,517	<0.05	0,691	<0.05	1,12	0,197	1,1
Zn	µg/l	30800	1720	1660	425	402	625	615	17,1	30,8
U	µg/l	25200	3,35	5,6	10,7	14,7	2,85	4,74	33,4	39,5
Alkalinitet	mmol/l	<0.150								
Klorid (Cl-)	mg/l	58,8	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
Sulfat (SO4)	mg/l	19,1	1340	1290	804	843	826	822	580	570
Bikarbonat (HCO3)	mg/l	0	9,79	10,3	56,8	56,9	40,1	39,3	67,5	68,7
Nitrat (NO3)	mg/l	<0.38	<0.33	<0.33	<0.58	<0.27	<1.19	<1.19	<0.66	<0.66

6 Referanser

Evangelou, V.P., and Zhang, Y.L. (1995). A review , pyrite-oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. *Critical Rev. Environ. Sci. Technol.*, 25, 141-199.

Kleinmann, R.L.P, Crera, D., and Pacelli, R.R. (1981). Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Mining Eng.*, 33, 300-306.

Lawrence, R.W., and Wang, Y. (1997). Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. In *Proceedings of the 4th Int. Conf. On Acid Rock Drainage*. MEND, NRC, Ottawa, ON, 1: 451-464.

Moses, C.O., Nordstrom, D.K., Herman, J.S. and Mills, A.L. (1987) Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 1561-1571

Nicholson, R.V. (1994). Iron-sulfide oxidation mechanisms , Laboratory studies. In *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*, Chapter 6. Edited by D .W. Blowes and J.L. Jambor, pp.164-183.

Nordstrom, D.K., and Southam, G. (1997). Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation. In *Geomicrobiology, Interactions between microbes and minerals*. *Rev. Mineral.*, 35, 361-385.

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Identifisering og karakterisering av syredannende bergarter. Veileder for Miljødirektoratet.		Dokumentnr./Document No. 20120842-01-R
Dokumenttype/Type of document Rapport / Report	Distribusjon/Distribution Ingen/None	Dato/Date 2015-02-09
		Rev.nr.&dato/Rev.No.&date 0 /
Oppdragsgiver/Client Miljødirektoratet		
Emneord/Keywords Black shale, excavation, deposit sites, landfills, construction, sampling, chemical characterization, stratigraphy		

Stedfesting/Geographical information	
Land, fylke/Country Norge, Oslo	Havområde/Offshore area
Kommune/Municipality Oslo	Felt navn/Field name
Sted/Location NGI	Sted/Location
Kartblad/Map	Felt, blokknr./Field, Block No.
UTM-koordinater/UTM-coordinates	

Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev/Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemanns- kontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter- disciplinary review by:
0	Originaldokument	2015-02-09 Erlend Sørmo	2015-02-09 Erik Endre	2015-02-09 Gijs Breedveld	

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 9. februar 2015	Prosjektleder/Project Manager fungerende PL, Gijs Breedveld
--	-------------------------------------	---

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

