



Lillesand kommune

LILLESAND KOMMUNE

Høringsutkast -

Reviderte retningslinjer: undersøkelser og klassifisering av potensielt syredannende gneis

Høringsutkast – Reviderte retningslinjer: undersøkelser og klassifisering av potensielt syredannende gneis

Sammendrag

I denne revisjonen legges det opp til å revidere kapitlene 4.2 *miljøgeologiske undersøkelser*, 4.3 *prøvetaking av berggrunn* og kapittel 5 *klassifisering av steinmasser som syredannende gneis*.

Øvrige kapitler omfattes ikke i denne omgang og de reviderte kapitlene i dette høringsutkastet må ses i sammenheng med [øvrige deler av retningslinjen](#).

Høringsutkastet starter med en innledning og gjennomgang av kunnskapsgrunnlaget for revideringen. Kunnskapsgrunnlaget rundt den syredannende gneisen i Lillesandsområdet har økt betraktelig de siste årene, og sentrale deler av dette kunnskapsgrunnlaget gjennomgås.

Viktige endringer i denne revideringen:

- Hydrogenperoksid-testen utgår som ledd i klassifiseringen.
- NAG-pH og paste-pH er innført som nye testmetoder. NAG-pH er viktigste klassifiseringsmetode, paste-pH brukes som indikator på hastighet på eventuell syredannelse.
- Forvittringsgrad og svovel-% er ikke egne kriterier i klassifiseringen, men skal brukes som støtteparametere i vurdering av geologisk kontekst og potensiale for forurening.
- Det legges større vekt på innledende undersøkelser og geologisk kartlegging.
- Det stilles krav om bruk av håndholdt XRF i de innledende undersøkelsene.
- Det stilles krav om utføring av kinetiske utlekkningstester som kolonnetester eller feltbaserte tester i større utbyggingsprosjekter med anslått utsprengt fast masse over 10 000 m³.

Høringsinnspill

Lillesand kommune ber i denne høringen spesielt om innspill knyttet til bruken av de statiske testene NAG-pH og paste-pH. Vi ber om innspill på om det er grunn til å vurdere lokale tilpasninger til metodene, slik det er anbefalt å gjøre i AMIRA Test Guide, og eventuelt hvilke tilpasninger som burde gjøres.

Vi ber også om innspill knyttet til bruken av håndholdt XRF i felt, og hvordan dette oppleves blant utførende konsulenter.

Vi ber også om innspill på rammeverk eller geostatistiske metoder for å sikre god representativitet i prøvetakingen.

Høringsinnspill kan merkes med «Innspill til reviderte retningslinjer» og sendes til postmottak@lillesand.kommune.no

Kontaktperson for denne revideringen er Bjørn Loland – bjorn.loland@lillesand.kommune.no.

Innhold

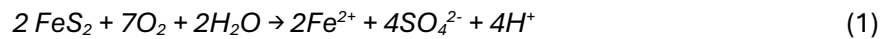
Sammendrag.....	1
1. Innledning og bakgrunn.....	3
1.1 Primær syredannelse.....	3
1.2 Sekundærmineraller og «lagret syre»	3
1.3 Sekundær syrekapasitet fra jern og aluminium	4
1.4 Syredannende gneis i Lillesandsområdet	6
1.5 Regional kontekst.....	18
1.6 CASE: IBC-forsøk fra Brønningsmyr i Lillesand.....	20
REVIDERTE RETNINGSLINJER	24
4.2 Innledende undersøkelser	24
4.2.1 Bruk av håndholdt XRF i feltkartleggingen.....	26
4.2.2 Innledende undersøkelser – spesielt for gneiser i Lillesandskomplekset.....	26
4.3 Representativ prøvetaking	27
4.3.1 Uttak av prøvemateriale	28
5 Klassifisering av steinmasser.....	29
5.1 Mineralogiske undersøkelser	29
5.2 Statistiske tester	29
5.2.1 Paste-pH.....	29
5.2.2 NAG-pH	30
5.2.3 Tolkning av data fra de statistiske testene.....	30
5.3 Store prosjekter – langtids utlekkings-tester.....	31
5.4 Sammenstilling og klassifisering av prøvemateriale	31
5.5 Miljøgeologisk rapport	32
Litteraturliste:.....	33
Vedlegg I Metodebeskrivelse: Umettet kolonnetest – enkelt oppsett	
Vedlegg II Metodebeskrivelse: IBC-forsøk	

1. Innledning og bakgrunn

1.1 Primær syredannelse

For å forstå miljørisikoen ved inngrep i sulfidførende bergarter er det nødvendig å forstå de grunnleggende kjemiske prosessene som styrer syredannelse og tungmetallutlekking. I en uforvitret bergart vil sulfider (*pyritt* eller *pyrhotitt*) være kilde til primær syredannelse.

Syredannelsen fra oksidasjon av sulfidmineraler skjer i flere trinn. For **svovelkis** (pyritt, FeS₂) starter prosessen når mineralet eksponeres for oksygen og vann:

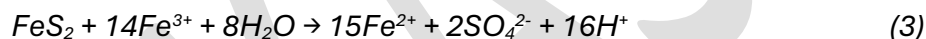


Magnetkis (pyrrhotitt, Fe_{1-x}S), synes å være utbredt i Lillesandsområdet (Pearce, 2018; Hagelia, 2023; Svendby et al, 2026). Det er veldokumentert at magnetkis oksiderer betydelig raskere enn svovelkis, med rater som er rapportert å være 20 til 100 ganger høyere (Nicholson & Scharer, 1994; Blowes et al., 2014). Selv om den teoretiske syreproduksjonen per mol er lavere enn vist i ligning 1, kan den *høyere reaktiviteten* utgjøre en økt risiko.

Det toverdige jernet (Fe²⁺) fra sulfidoksidasjonen i trinn 1 kan oksideres videre til treverdige jern (Fe³⁺), en prosess som forbruker protoner, men som er kritisk for den videre reaksjonskjeden:



Treverdige jern (Fe³⁺) kan oksidere sulfider, uten tilgang på oksygen. Dette er den raskeste og mest syredannende reaksjonen, hvor det frigjøres 16 mol H⁺ per mol pyritt:



Denne prosessen danner store mengder syre og skaper en selvforsterkende jern-redoks-syklus (Nordstrom, 1982). Treverdige jern fungerer som en katalysator som betydelig øker hastighet på syredannelsen, sammenlignet med ren oksygenoksidasjon. I et surt miljø vil denne jern-syklusen være «motoren» som bestemmer hastigheten på syredannelsen (Nordstrom, 1982; Nordstrom et al., 2015).

For syredannelse i felt spiller mikrobiologiske prosesser også en sentral rolle. Mikroorganismer som *Acidithiobacillus ferrooxidans* og *Leptospirillum ferrooxidans* kan oksidere både Fe²⁺ og reduserte svovelforbindelser (ie. S₂O₃²⁻). Ved å katalysere disse reaksjonene kan mikroorganismer øke hastigheten på sulfidoksidasjon med flere størrelsesordener (Nordstrom & Southam, 1997; Johnson & Hallberg, 2003). Den mikrobiologiske komponenten gjør at sulfidoksidasjon og syredannelse i felt kan være betydelig raskere og mer omfattende enn det som observeres i laboratorieforsøk uten disse mikroorganismene.

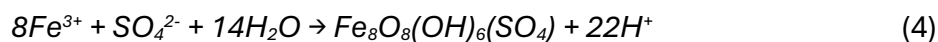
1.2 Sekundærmineraler og «lagret syre»

Oksidasjon av sulfider (pyritt og/eller pyrhotitt) er den primære kilden til syredannelse, men dannelse og senere omdanning av sekundære jern- og aluminiumsulfatmineraler spiller en kritisk rolle for vannkvaliteten over tid (Bigham & Nordstrom, 2000).

I Lillesandsområdet er det veldokumenterte forekomster av sekundærmineraler som jarositt og schwertmannitt i forvitringssoner og på sprengsteinsfyllinger (Pearce, 2018; Hagelia, 2023; Svendby et al., 2026).

Disse mineralene utgjør en latent syrekapasitet og fungerer som «syrelagre». De dannes og er stabile ved lav pH, men når miljøforholdene endres blir de ustabile og frigjør lagret syre (Bigham & Nordstrom, 2000; Hammarstrom et al., 2005).

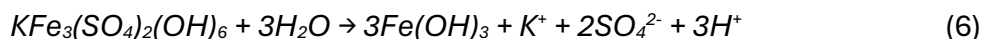
Schwertmannitt ($\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6(\text{SO}_4)$) dannes ved pH 2.5 – 4.5:



Jarositt $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ dannes ved svært sure forhold (typisk pH < 2.5):



Disse sekundærmineralene er lite løselige i vann, men er såkalt metastabile. Hvis pH i porevannet stiger vil de gjennomgå hydrolyse og omdannes til mer stabile jernoksider, som goethitt FeOOH , eller amorft $\text{Fe}(\text{OH})_3$, og frigjøre den lagrede syren (Welch et al, 2008):



Det er dokumentert at jarositt i Lillesandsområdet ofte kan være jernfattig og hydronium-bærende, dvs. at H_3O^+ erstatter K^+ i krystallstrukturen (Hagelia, 2023). Dette gjør mineralet enda mer ustabil og potensielt mer syredannende ved nedbrytning enn vanlig jarositt (Welch et al, 2008). Reaksjonen for hydrolyse av hydronium-jarositt skiller seg fra vanlig jarositt ved at kationen i krystallstrukturen (H_3O^+) også bidrar til forsuringen. Der nedbrytning av vanlig K-jarositt teoretisk frigjør 3 mol syre (H^+) per mol mineral, frigjør hydronium-jarositt 4 mol H^+ .

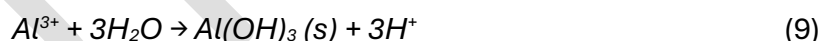
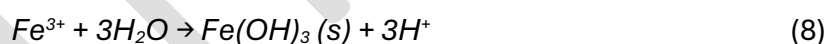


1.3 Sekundær syrekapasitet fra jern og aluminium

I et surt miljø vil metaller fra silikater i bergarten «lekke» ut. Jern og aluminium vil vanligvis være de dominerende kationene. Hydrolysereaksjoner fra disse metallene vil i mange tilfeller utgjøre mesteparten av syrekapasiteten fra sur avrenning (Nordstrom, 2020).

Jern er svært løselig som treverdige jern (Fe^{3+}) i løsninger med pH under 3. Om pH øker over dette vil jern begynne å hydrolysere og felle ut. Aluminium er løselig opp til et litt høyere pH-intervall, og forekommer for det aller meste som oppløste Al^{3+} -ioner i løsninger med pH under 4 (Nordstrom, 2020).

Når sur avrenning med løst jern og aluminium blandes med vann med høyere pH vil disse metallene begynne å hydrolysere og felle ut. I denne prosessen frigjøres mye syre:



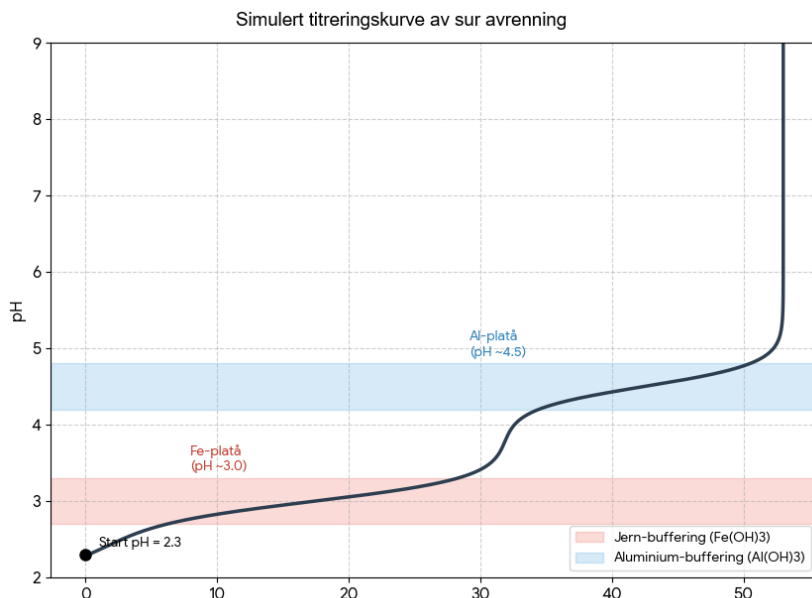
Merk at 1 mol Fe^{3+} danner 3 mol H^+ og tilsvarende for Al. Dette er med å danne «buffer-plataer» rundt pH 3 (jern) og pH 4 (aluminium). For å heve pH ytterligere må disse buffer-plataene brytes og mesteparten av oppløst jern og aluminium felle ut.



Figur 1. Fra utbyggingsprosjekter i Lillesandsområdet ser man ofte jern-dominerte rustfargede utfellinginger der pH er under 3,8-4 og grå-hvite utfellinginger med aluminiums-forbindelser der pH øker over dette.



Figur 2. "Fluffy" grå-hvite utfellinging av aluminium. pH i de avbildete bassengene var 6,4.



Figur 3. Simulert titreringskurve av sur avrenning etter data fra Nordstrom, 2020. Merk Fe-platå rundt pH 3 og Al-platå rundt pH 4,5.

Hydrolysereaksjonene kan i mange tilfeller utgjøre mesteparten av syrekapasiteten i sur avrenning. Dette understreker at måling av pH alene ikke gir et komplett bilde. Man må også vurdere løste metaller som en potensiell syrekilde, i tillegg til å være en problematisk forurensningskilde (Pearce, 2018; Nordstrom, 2019; Nordstrom, 2020).

Disse hydrolysemekanismene er med på å stabilisere pH på et lavt nivå, og er en av grunnene til at både behandlet og ubehandlet avrenning fra syredannende gneis ofte holder seg i dette intervallet (pH 3-4,5).

Som konsekvens av disse hydrolysereaksjonene kan sur avrenning fra små nedbørsfelt med høye nivåer av jern og aluminium ha en uproporsjonalt stor påvirkning på større vassdrag. Det er syrekapasiteten fra hydrolyse av metallene som kan forsterke påvirkningen på pH, langt utover det en ren forholdsmessig blanding av vannstrømmene skulle tilsi.

Om den syrenøytraliserende kapasiteten i mottakende vassdrag er lav, kan den labile fraksjonen av aluminium øke drastisk. Om den syrenøytraliserende kapasiteten i mottakende vassdrag er høy, vil hydrolyse og utfelling av jern og aluminium finne sted som vist i figur 1 & 2, med en potensiell reduksjon i pH, men redusert påvirkning fra labilt aluminium.

1.4 Syredannende gneis i Lillesandsområdet

Kunnskapsgrunnlaget rundt den syredannende gneisen i Lillesandsområdet har vokst betydelig de siste årene. Flere master-oppgaver og andre vitenskapelige arbeider har bidratt til denne kunnskapsbyggingen, i tillegg til at dyrekjøpte erfaringer fra utbyggingsprosjekter har bidratt med økt kunnskap. Under følger en kort gjennomgang av de viktigste bidragene til ny kunnskap på området.

A Mineralogical and Geochemical Description of Potentially Acid-producing Gneisses from the Lillesand Area - Implications for Leaching Behaviour» (Pearce, 2018)

I master-oppgaven «*A Mineralogical and Geochemical Description of Potentially Acid-producing Gneisses from the Lillesand Area - Implications for Leaching Behaviour» (Pearce, 2018)* ble det gjennomført kolonneforsøk og grundige mineralogiske undersøkelser av steinprøver fra fire lokaliteter i Lillesandsområdet.

I kolonneforsøkene ble det vist at synlig forvitrete overflater i betydelig grad bidrar til sur og metallholdig avrenning. Samtidig viste resultatene at syredannelse og påfølgende metallutlekking også forekommer i bergartsprøver med mindre eller ingen synlige tegn til forvitring.

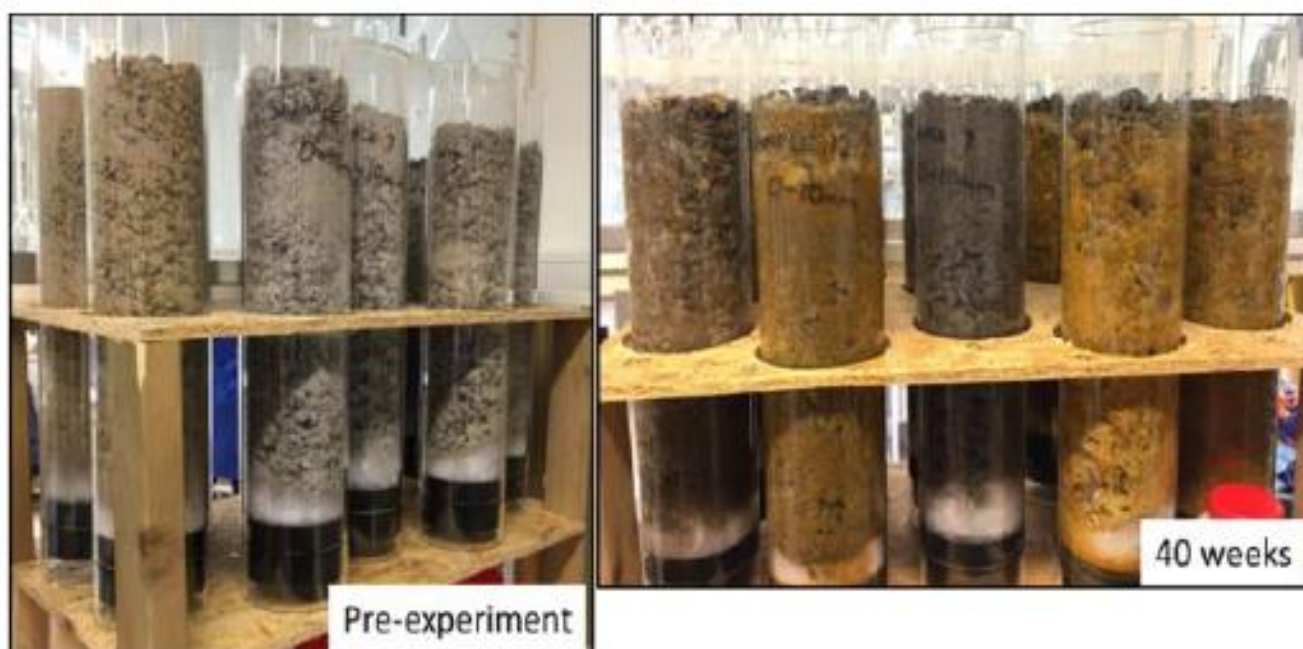
I 10 av 12 kolonner var prøvene syredannende ved første prøvetaking (4-6 uker), med pH mellom 2,6 - 4. I de 10 kolonnene med syredannende materiale holdt pH seg konsekvent lav i prøveperioden på 40 uker, og så ut til å stabilisere seg i intervallet pH 2,3-2,8 mot slutten av prøveperioden.

I kolonner med forvitret og uforvitret materiale fra samme lokalitet var differansen i pH mellom forvitret og uforvitret materiale «bare» 0,3- 0,5 pH-enheter – men utlekkingen av jern og aluminium var 10 ganger høyere fra forvitret materiale, og utlekking av kobber og kadmium henholdsvis om lag 200 og 100 ganger høyere fra forvitret materiale.

Denne effekten ble tilskrevet den latente syrekapasiteten fra sulfatmineralene jarositt og schwertmannitt som frigjøres og akselerer sulfidoksidasjonen, med påfølgende høyere konsentrasjoner av tungmetaller. Forsøkene viste også at schwertmannitt og jarositt ble dannet på kornoverflatene i de ikke-forvitrete bergartsprøvene i løpet av forsøksperioden, se figur 6.

De mineralogiske undersøkelsene viste at pyrhotitt sannsynligvis er det dominerende sulfid-mineralet i Lillesandsområdet.

De to kolonnene som ikke viste tegn til syredannelse, hadde forekomster av kalsitt i prøvematerialet.

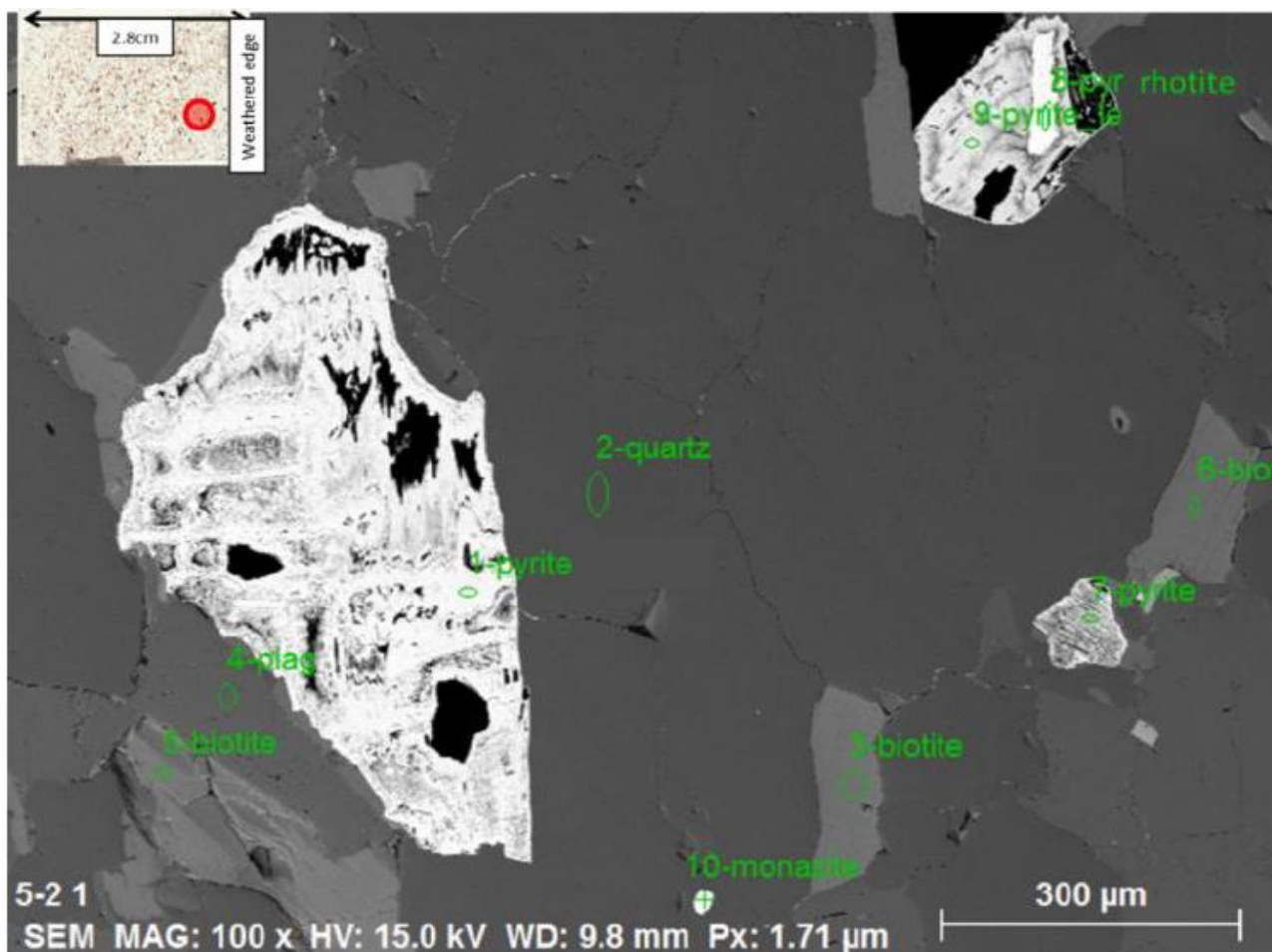


Figur 4. Fra Pearce, a. (2018). Tydelig endring i farge i kolonnene før og etter 40 uker.

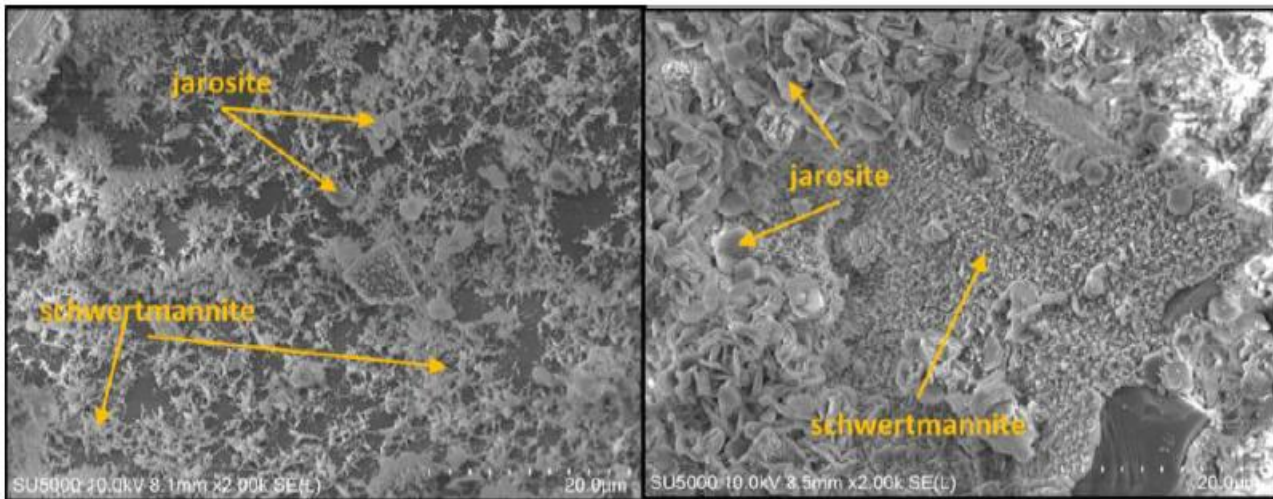
Selv om forsøkene viste at forvitret materiale øker risikoen for betydelig miljøskade, viste forsøkene at *uforvitret* materiale fra Lillesandsområdet også er i stand til rask og omfattende syredannelse (pH mellom 3 og 4 etter fire uker), og at tilstedeværelse av synlig forvitring ikke er en tilstrekkelig faktor for å identifisere syredannende bergarter.

Men forekomst av forvitret materiale med innhold av sulfatholdige sekundærminerale kan øke risikoen for betydelig miljøskade med flere størrelsesordener, og er en svært viktig parameter å hensynta både i utformingen av retningslinjer for karakterisering, og i planlegging for håndtering av syredannende gneis.

Foruten svært interessante resultater inneholder oppgaven grundige og detaljerte beskrivelser av mineralogien og kvalitative vurderinger av tynnslip, og anbefales å leses i sin helhet for en god innføring i lokal mineralogi.



Figur 5. Bilde fra Pearce, 2018. SEM-bilde fra tynnslip, omtrent 4 mm innenfor forvitningskanten (som vist med rød sirkel i innfelt bilde øverst til høyre). Omdanning av sulfidminerale pågår, der de lyseste partiene er mindre forvitret pyritt/pyrhotitt, mens de «mørkere» hvite områdene er et sekundært sulfatmineral som fyller oppløsningshulrommene.



Figur 6. Bilde fra Pearce, 2018. SEM-bilder av utfelt materiale fra en prøve hentet fra toppen av en kolonne med stein uten synlig forvitring ved forsøksstart. Bildet viser at schwermannitt og jarositt dannes på kornoverflater.

«Sur avrenning frå rusta svovelførande gneis» (Hagelia, 2023)

I rapporten «**Sur avrenning frå rusta svovelførande gneis**», (Hagelia, 2023) er fokuset rettet mot **svovelrike sekundærmineraler** i sprekkeplan og **svovelrike omvandlete bergartsvariasjoner**. I rapporten dokumenteres det også at **pyrhotitt/magnetkis** tilsynelatende er det mest fremtredende sulfid-mineralet i Lillesandsområdet.

Mange av de utførte analysene som er vedlagt i rapporten viser forekomster av jarositt i forvitret materiale.

Mikrosondeanalyser fra to lokaliteter i Lillesand viste at jarosittene i disse prøvene var undermettet på jern og om lag 20 % av jarosittene i de undersøkte tynnslipene var hydroniumførende fremfor kalium-førende.

En av de viktigste observasjonene i denne rapporten er at bulkprøver eller store blandprøver ikke er egnet til å fange opp det reelle syredannende potensiale der det er stor kontrast mellom høyt syredannende potensiale i svak forvitring og lavere potensiale i større volum med uforvitret bergart – «*analyse av svovel i bulkprøver av denne slag fører til at den syregivende komponenten blir sterkt underrepresentert*».

Rapporten er ellers full av interessante resultater og observasjoner og bør leses i sin helhet.

«An evaluation of methods for acid rock drainage production» (Skjønberg, 2023)

Skjønberg undersøkte i sin masteroppgave «**An evaluation of methods for acid rock drainage production**» sammenhengen mellom resultater fra ulike statiske tester, mineralogiske undersøkelser (ARDI – Acid Rock Draining Index) og kolonnetester fra 5 lokaliteter i nærheten av Lillesandsområdet. I denne oppgaven ble det dokumentert en viss sammenheng mellom potensiale for syredannelse og resultater fra hydrogenperoksid-testen. Men triplikater utført av samme testen viste svært varierende resultater, og potensialet for feilklassifisering basert på denne testmetoden ble vurdert som stort. NAG-pH-testen viste resultater som

Utbygging
Fagresurser Utbygging
Geotag Utbygging
28.06.2023


Statens vegvesen

Sur avrenning frå rusta svovelførande gneis

FoU-prosjektet MILGRO 2022-2024

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 922



sammenfalt med resultater fra kolonnetestene (n=5), og ble i oppgaven vurdert som en pålitelig metode for å identifisere syredannende potensiale.

Tabell 1. Triplikater utført med hydrogenperoksidtesten viser lite konsistente resultater. Kun 3 av 8 prøver får samme resultat alle tre prøverundene.

Replicate	Parameter	Sample ID							
		Gjerdemyra	Sannidal	Birkeland	Blåbæråsen	Sangreidtjørna	Vallesverdveien	Tingsaker	PRF1
1	ΔT °C	1,3	0,0	2,2	4,4	1,7	0,0	0,4	3,9
2	ΔT °C	0,0	0,2	7,7	0,3	1,3	0,3	0,0	16,5
3	ΔT °C	0,6	0,5	6,7	3,1	0,4	1,3	0,0	0,8
	Mean ΔT °C	0,6	0,2	5,5	2,6	1,1	0,5	0,1	7,1
	S.D. ΔT °C	0,7	0,3	2,9	2,1	0,7	0,7	0,2	8,3

«Karakterisering av syredannende gneis – kunnskapsgrunnlag for utforming av retningslinjer 2021-2024»

Lindum AS har i sin rapport «Karakterisering av syredannende gneis – kunnskapsgrunnlag for utforming av retningslinjer 2021-2024» evaluert presisjonen i «Agder-metoden» for syredannende gneis.

Et enkelt oppsett for umettete kolonnetester ble brukt som kontroll for å se om gneisprøver faktisk produserte syre over tid, se figur 7 og resultater i tabellene under.

Resultatene avslørte betydelige svakheter i dagens retningslinjer. Av totalt 26 prøver ble kun 11 riktig klassifisert ved bruk av «Agder»-metoden, se tabell 2 under.

Om man regner med de «usikre» resultatene fra kolonnetestene – med pH mellom 4 og 5 – så er en større andel kanskje riktig klassifisert, avhengig av hvor man setter grensen for hva som regnes som syredannende i en umettet kolonnetest.



Figur 7. I denne rapporten ble det brukt en svært enkel metode for umettet kolonnetest. Brusflasker med bunnen skåret av, plassert opp-ned i et enkelt stativ. Dette er en metode med svært lave etableringskostnader som krever lite areal og nesten ingen kostnader til drift.

Falske positive:

Flere prøver som ble klassifisert som syredannende i henhold til retningslinjene, viste ikke tegn til syredannelse i kolonneforsøkene. Dette kan forårsake unødvendig deponering av rene masser.

Falske negative:

Noen prøver består hydrogenperoksid-testen, men viser likevel kraftig syredannelse i kolonnetestene. Dette medfører risiko for at forebyggende og avbøtende tiltak ikke settes inn der det trengs, med påfølgende risiko for betydelig miljøskade og økonomiske konsekvenser for tiltakshavere.

Tabell 2. Tabellen viser manglende samsvar mellom klassifisering fra "Agder-retningslinjene" og utførte kolonnetester ved Lindum Sør

Prøve #	Endelig klassifisering fra retningslinjene	Laveste pH fra kolonnetest	Stemmelse med kolonnetest
Arendal legevakt #1	Ikke syredannende	5,48 (42 uker)	riktig
Arendal legevakt #2	Syredannende	6,56 (42 uker)	falsk positiv
Arendal legevakt #3	Ikke syredannende	4,19 (105 uker)	kanskje riktig
Arendal legevakt #4	Syredannende	6,96 (42 uker)	falsk positiv
Arendal legevakt #5	Syredannende	6,43 (42 uker)	falsk positiv
Sangereidåsen	Syredannende	5,80 (37 uker)	falsk positiv
Natveitåsen	Syredannende	3,49 (15 uker)	riktig
#5 Birkeland	Syredannende	2,32 (59 uker)	riktig
#12 Glamsland	Syredannende	2,8 (40 uker)	riktig
E	Syredannende	2,51 (40 uker)	riktig
# 7 Glamsland	Syredannende	7,5 (40 uker)	falsk positiv
Groos #1	Syredannende	2,49 (32 uker)	riktig
Groos #2	Syredannende	2,73 (32 uker)	riktig
Nordbø #1	Ikke syredannende	4,31 (32 uker)	falsk negativ (kanskje)
Nordbø #2	Syredannende	2,54 (32 uker)	riktig
RV420 #1	Syredannende	2,64 (32 uker)	riktig
RV420 #2	Syredannende	2,48 (32 uker)	riktig
Blakstad 3	Ikke syredannende	3,19 (32 uker)	falsk negativ
Blakstad 5	Syredannende	4,17 (32 uker)	kanskje riktig
Eyehavn #1a	Syredannende	4,54 (32 uker)	kanskje riktig
Eyehavn #1b	Syredannende	7,85 (32 uker)	falsk positiv
Eyehavn Skole #1	Ikke syredannende	4,24 (32 uker)	kanskje riktig
Eyehavn Skole #2	Syredannende	3,97 (32 uker)	riktig
Tingsaker Skole #1	Ikke syredannende	3,64 (22 uker)	falsk negativ
Tingsaker Skole #2	Ikke syredannende	3,36 (22 uker)	falsk negativ
Tingsaker Skole #3	Ikke syredannende	3,20 (22 uker)	falsk negativ

Tabell 3. Tabellen viser gjennomsnitt av XRF-analyser på steinmateriale sammenstilt med laveste pH fra kolonneforsøkene.

Lokalitet	Svovel-% (XRF)	Laveste pH fra kolonnetest
Arendal legevakt #1	0,076	5,48
Arendal legevakt #2	0,05	6,56
Arendal legevakt #3	0,103	4,19
Arendal legevakt #4	0,051	6,96
Arendal legevakt #5	0,051	6,43
Sangereidåsen	0,571	5,8
Natveitåsen	0,712	3,49
#5 Birkeland	1,01	2,32
#12 Glamsland	0,735	2,8
E	0,5	2,51
# 7 Glamsland	0,4	7,5
Groos #1	0,008	2,49
Groos #2	0,005	2,73
Nordbø #1	0,004	4,31
Nordbø #2	0,008	2,54
RV420 #1	0,008	2,64
RV420 #2	0,004	2,48
Blakstad 3	0,015	3,19
Blakstad 5	0,008	4,17
Eyehavn #1a	0,003	4,54
Eyehavn #1b	0,004	7,85
Eyehavn Skole #1	0,007	4,24
Eyehavn Skole #2	0,007	3,97
Tingsaker Skole #1	0,006	3,64
Tingsaker Skole #2	0,01	3,36
Tingsaker Skole #3	0,005	3,2

Resultatene fra XRF-analyser for svovelinnhold fra samme prosjekt viser også at det er stort potensiale for sur avrenning i steinmateriale der svovelinnholdet er lavt og/eller kan være vanskelig å påvise.

Tabellen viser gjennomsnittet av XRF-analyser fra materialet brukt i kolonne-testene, sammenstilt med laveste pH registrert i forsøkene. Merk hvordan svært lave svovelverdier fra XRF-analysene også kan resultere i syredannelse.

I tillegg til kolonnetestene etablerte Lindum flere IBC (Intermediate Bulk Container)-forsøk.



Figur 8. IBC-forsøk der steinmateriale står ute for vær og vind er velegnet til å simulere syredannelse under naturlige forhold. På grunn av store mengder prøvemateriale er metoden også egnet til å redusere usikkerhet knyttet til representative prøver.

Fem containere (1m³) ble fylt med ulike fraksjonsstørrelser med stein fra et utbyggingsprosjekt ved Tingsaker skole og sto utsatt for vær og vind.

Målet med forsøket var å se på hvilken effekt fraksjonsstørrelse har på syredannelsespotensialet på kort og lang sikt, med en hypotese om at mindre fraksjoner er mer syredannende enn store fraksjoner på grunn av større reaktiv overflate.

Resultatene fra forsøkets første halvår tydet på at det var en sammenheng mellom steinstørrelse og syredannende potensiale, hvor de mindre fraksjonene viste mer syredannelse enn de større fraksjonene. På lengre sikt endret dette bildet seg hvor syredannelsen fra de minste steinfraksjonene avtok, mens syredannelsen for de større fraksjonene økte.

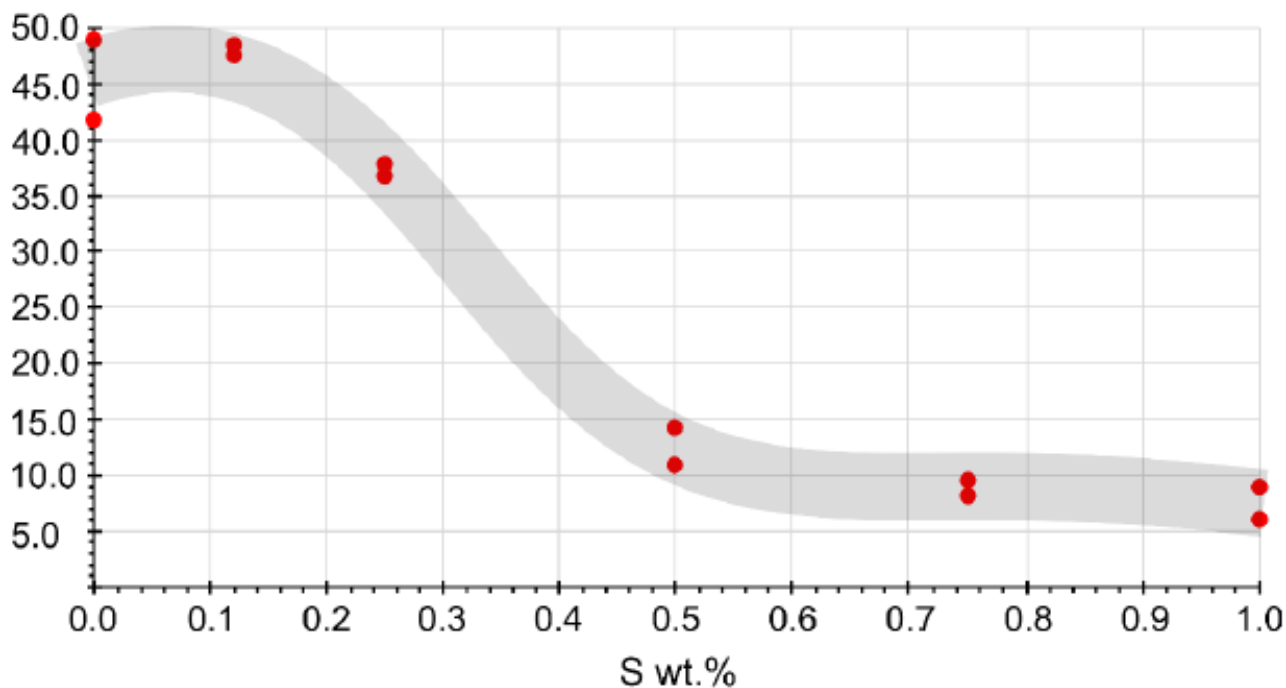
«Acid leaching of gneisses in southern Norway: An evaluation of H₂O₂ oxidation testing for the determination of the acid-producing potential of sulphide-rich rocks» (Karlsen, 2024).

Hydrogenperoksidtesten og «Agder-metoden» ble ytterligere undersøkt i masteroppgaven «**Acid leaching of gneisses in southern Norway: An evaluation of H₂O₂ oxidation testing for the determination of the acid-producing potential of sulphide-rich rocks**» (Karlsen, 2024).

I denne oppgaven er det satt søkelys på hvordan tilstedeværelse av sekundærmineraller, og særlig jernoksider, kan bidra til feilklassifisering ved bruk av hydrogenperoksidtesten.

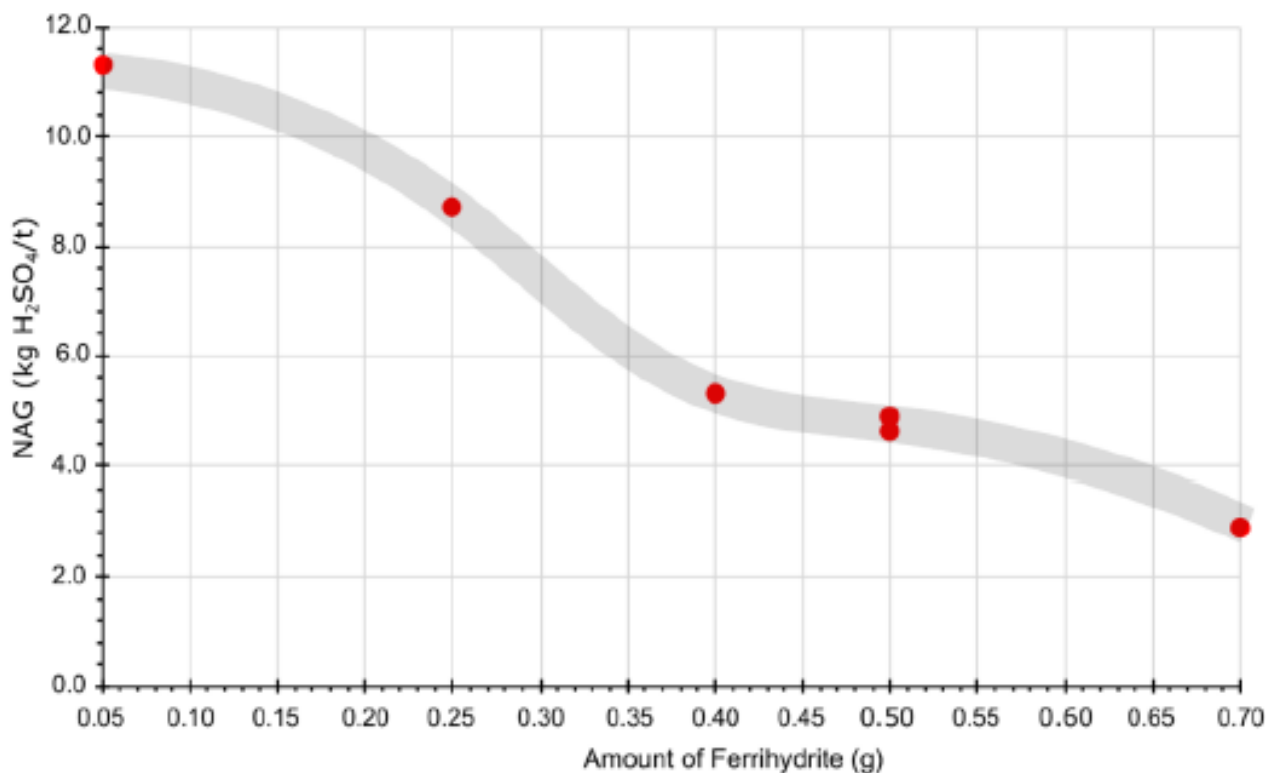
Tre steinprøver fra serien med kolonneforsøk utført ved Lindum ble benyttet. Steinprøvene ble analysert med XRD, XRF og testet med NAG-pH og paste-pH. Resultatene fra NAG-pH-testen viste god overensstemmelse med resultatene fra kolonnetestene (n=3). Paste-pH viste god overensstemmelse for den ene prøven med dokumentert innhold av sekundærmineralet jarositt, og underbygger den raske syredannelsen assosiert med tilstedeværelse av jarositt.

I kontrollerte forsøk ble påvirkning fra ferrihydritt (et jernoksid), pyritt og ulike kombinasjoner av disse på temperaturøkningen i hydrogenperoksidtesten undersøkt. Det ble vist at ferrihydritt reagerer sterkt med hydrogenperoksid, og at denne reaksjonen kan være en kilde til falske positive resultater i prøver der ferrihydritt eller andre jernoksider forekommer. Resultatene viste også kontraintuitivt at en blanding av ferrihydritt og pyritt førte til kraftig redusert reaksjon med hydrogenperoksid, se figur 9.

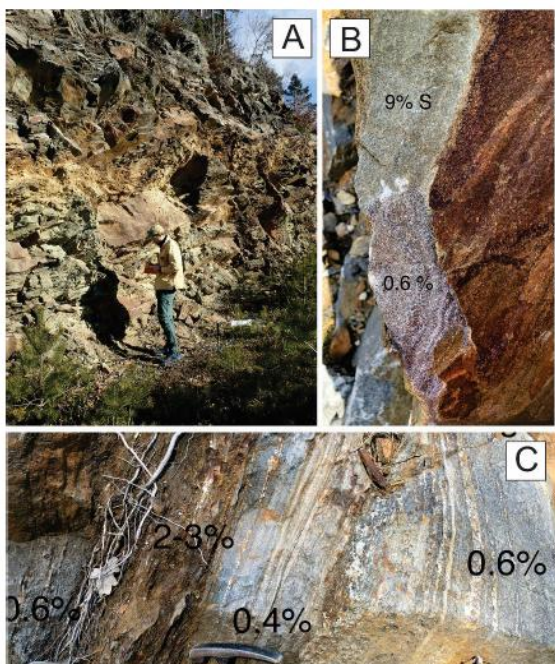


Figur 9. Temperaturreaksjon med hydrogenperoksid - med 0,5 g ferrihydritt og økende S-%. Temperatur C på Y-aksen. Økende mengde svovel reduserer noe overraskende den eksoterme reaksjonen med hydrogenperoksid.

Påvirkning fra ferrihydritt på hydrogenperoksid brukt i NAG-pH-testen ble også undersøkt i kontrollerte forsøk. Der ble det vist at ferrihydritt kan motvirke effekten av hydrogenperoksid, da ferrihydritt er effektiv på å bryte ned H_2O_2 . Den resulterende NAG-verdien kan være påvirket av mengden ferrihydritt i prøvematerialet, se figur 10 under. Dette kan være viktig å huske på i vurdering av resultater fra NAG-test av rustne og forvitret prøver.



Figur 10. NAG-verdi plottet mot økende innhold av ferrihydritt, med samme svovelinnhold (0,5%). Mer ferrihydritt fører til lavere NAG. Y-aksen er NAG-verdi etter titrering til pH=7.



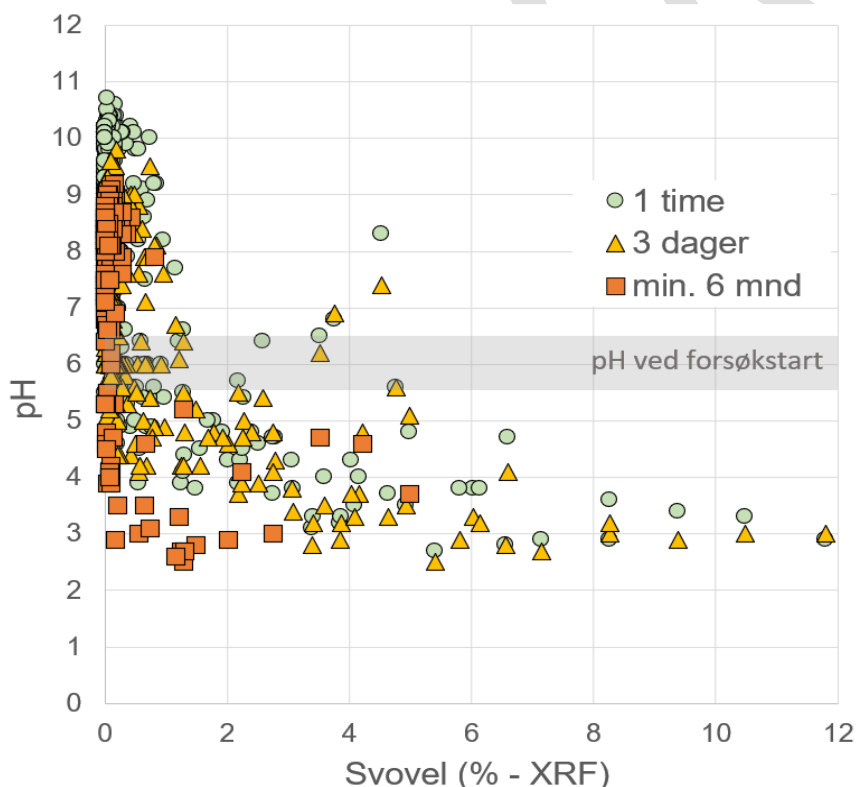
Figur 11. Bilde fra BRUK. Store variasjoner i svovelinnhold over små avstander.

I NGU sitt kartleggingsprosjekt i Kristiansand, **Berggrunnsressurser og – utfordringer i Kristiansand kommune (BRUK)**, ble det ved bruk av håndholdt XRF i felt demonstrert at det er store forskjeller i svovelinnhold på små avstander i den regionalt forekommende gneisen. I kartleggingen ble det avdekket at høye svovelverdier ofte er knyttet til sprekkeplan, foliasjonsplan og bergarter med tegn på sterk omvandling.

I prosjektet ble det utført et stort antall tester med en metode kalt abrasjons-pH, der knust prøvemateriale legges i deionisert vann og pH-utviklingen måles over tid.

Fire bergartstyper viste tegn til syredannelse i NGU sine undersøkelser: blant glimmerskifer, fyllitt og metasandstein var om lag halvparten av prøvene syredannende. Men de sterkt omvandlede bergartene (skifrige, sandete prøver med tilstedeværelse av jernhydrokso-sulfatmineraler) nesten uten unntak viste seg å være syredannende.

Testene viste at svovelinnhold alene ikke kan forklare det syredannende potensialet i prøvematerialet, og at det ikke ser ut til å være en pålitelig nedre grense for svovelinnhold kontra syredannelse.



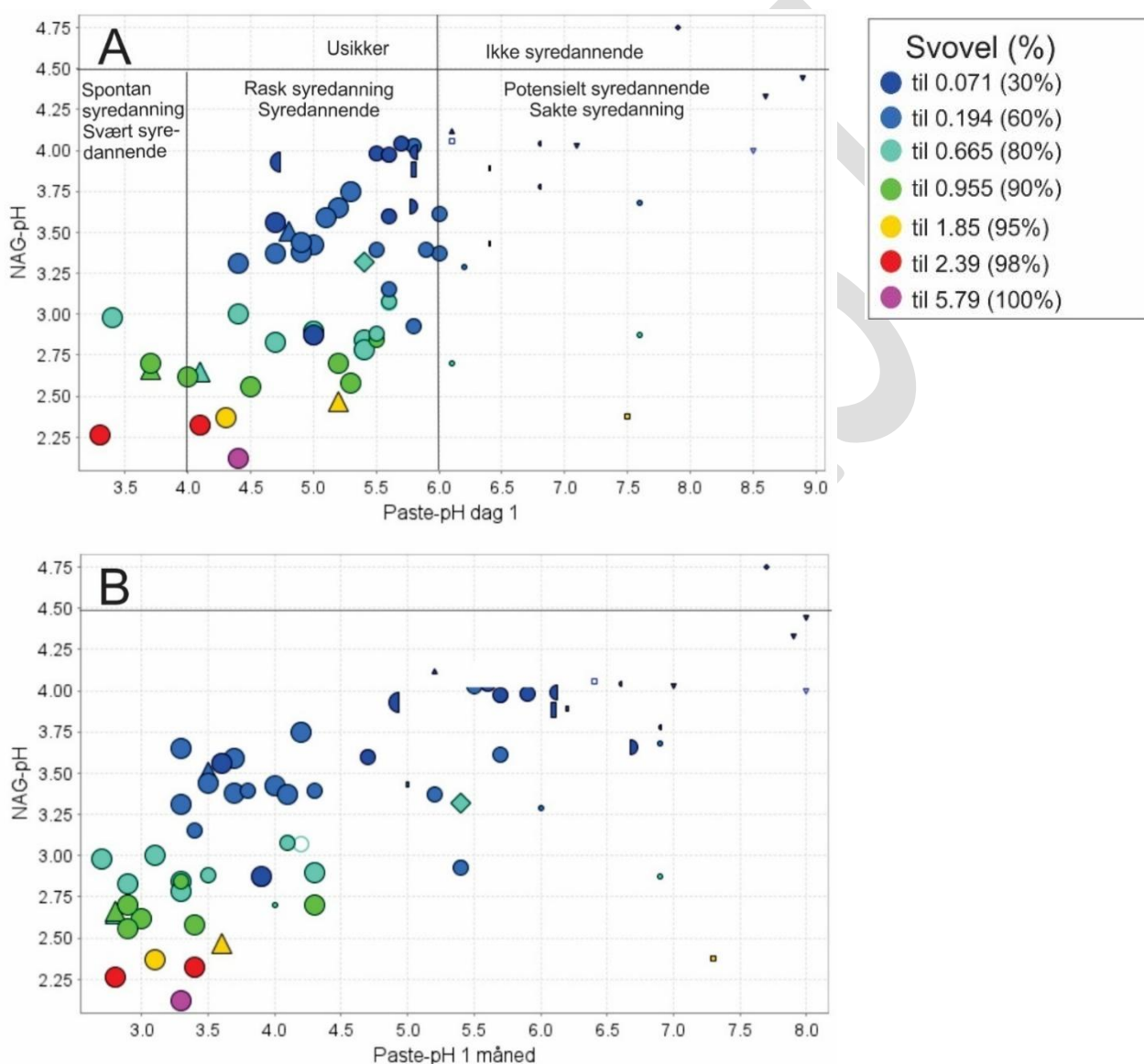
Figur 12. Figur med resultater fra BRUK. Utvikling i pH plottet mot svovel-%. Merk differanse mellom 1 time, 3 dager og min. 6 mnd.

Syredannende bergarter i Lillesand – Innledende kartlegging, pH-målinger og geokjemiske analyser – NGU Rapport 2026.013.

I samarbeidsprosjektet **SYL (Syredannende bergarter i Lillesandsområdet)** mellom NGU og Lillesand kommune har observasjonene fra kartleggingen i Kristiansand blitt ytterligere underbygget, og prosjektet har bidratt med ny og grunnleggende viktig kunnskap om de mest problematiske bergartstypene i Lillesand. Rapporten bør leses i sin helhet.

Metasandstein, meta-arkose og glimmergneis fra Lillesandsområdet viser nesten uten unntak tegn til syredannelse, og det ser ikke ut til å være en klar nedre grense for svovelinnehold og potensiale for syredannelse.

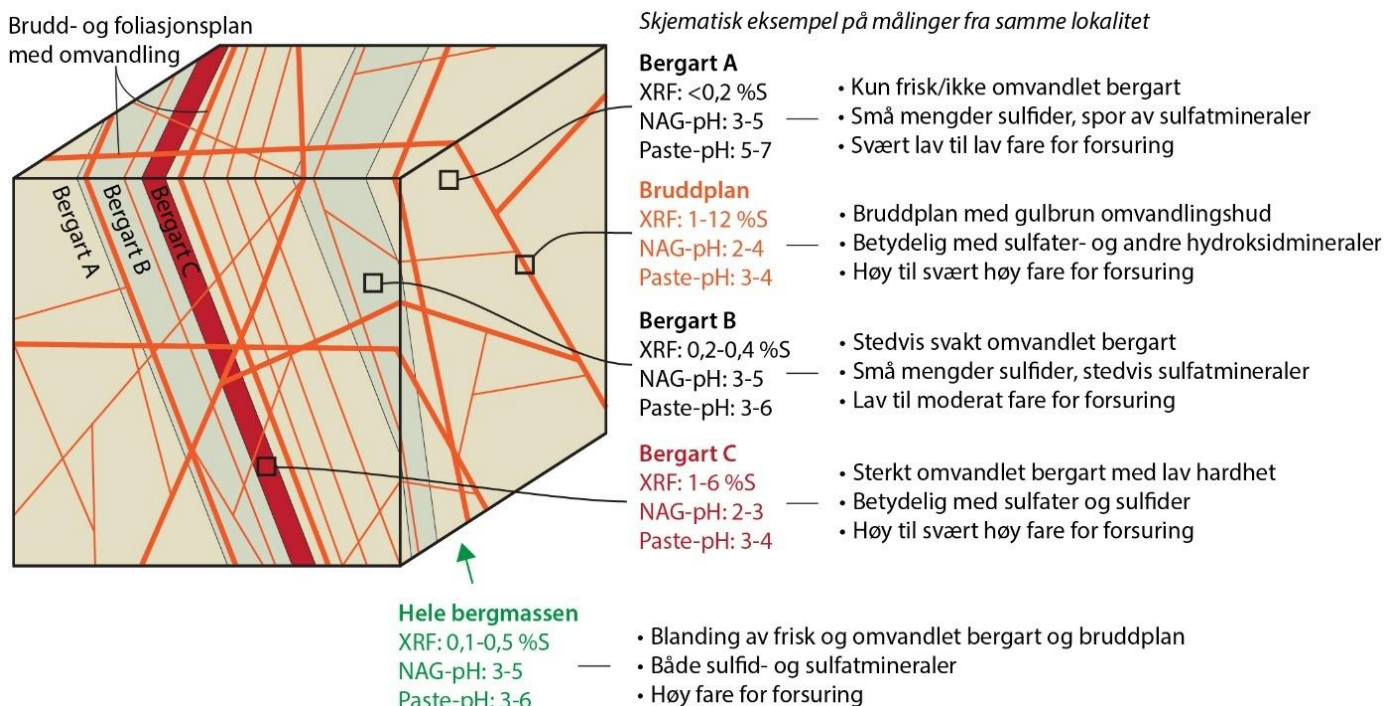
I prosjektet har paste-pH-testene stått i 30 dager, og det er en klar trend at pH fortsetter å falle i de fleste tilfeller der paste-pH ved første måling er under 6, jf. figur 13 under.



Figur 13. Figur fra SYL. Figuren viser NAG-pH, sammenstilt med Paste-pH-verdi ved dag 1 og dag 30. I mange tilfeller fortsetter pH å falle dersom Paste-pH er 6 eller under ved første prøvetaking, og en vesentlig større andel prøver havner i kategorien spontan/svært syredannende og rask syredannende. Merk blå punkter med lavt svovelinnehold.

Kartleggingen i felt med flittig bruk av håndholdt XRF viste at det er svært stor variasjon i svovelinnehold over korte avstander. Svovelkonsentrasjonene er høyest i sprekkeplan og foliasjonsplan med synlige utfellinger av

sekundærminerale, samt i bergartsvariasjoner med synlig omvandling. Denne fordelingen av svovelholdige sulfider og sekundærminerale er vist som et eksempel i figuren under.



Figur 14. Fra SYL (Syredannende bergarter i Lillesandsområdet). Prinsippskisse over fordeling av svovel i en representativ bergmasse fra Lillesandsområdet. Figuren viser også eksempler på målinger av håndstykker fra samme lokalitet. Representativ prøvetaking i en slik bergmasse kan være en utfordrende øvelse.

Denne fordelingen og romlige variasjonen skaper utfordringer for både representativ prøvetaking og korrekt behandling av prøvene. Denne fordelingen skaper også et paradoks der det i mange tilfeller kan være slik at mesteparten av volumet i bergmassen har et lite syredannende potensiale, men overflatene i sprekker og bruddplan – som utgjør de reelle overflatene etter utspregning - har et betydelig akutt syredannende potensiale:

«Den viktigste konklusjonen fra dette arbeidet er at tilstedeværelsen av tallrike sulfatførende brudd- og foliasjonsplan, enkelte svovelrike omvandlete lag og fravær av nøytraliserende minerale gjør at bergmassen innenfor Lillesandkomplekset kan føre til utbredt og katastrofal syredanning, selv om flere enkeltmålinger av bergartene indikerer det motsatte. Arbeidshypotesen for hvorfor dette skjer, er at de reaktive/lett løselige sekundære svovelførende mineralene først bidrar til en rask senkning av pH i og rundt de utspregte bergmassene. Dette akselererer en rekke reaksjoner, blant annet oksidasjonen av sulfidminerale og nedbrytningen av aluminiumførende mineral.»

Videre er det tett mellom variasjonene og det kan være vanskelig å avdekke ulike soneringer i en ren overflatekartlegging.

«På utspregte skjæringer er de gulfargete brudd- og foliasjonsplanene lett gjenkjennelige, men i naturlige blotninger i skogen er disse vanskelig å få øye på. Dette er dels fordi de ytterste delene av gamle bergflater (eksponert siden siste istid for ca. 10 000 år siden) har blitt «utvasket», slik beskrevet av Hagelia (2023), men også fordi brudd- og foliasjonsplan er mindre fremtredende på ikke-utspregte blotninger og utslåtte prøver ofte viser en grå båndet gneis. Slike observasjoner er lite egnet til å friskmelde bergarter som ikke akutt forsurende.»

«Lag av meta-arkose og metasandstein opptrer ofte i veksling med hverandre, gjerne med en vekslingsfrekvens på noen meter. En konsekvens av dette er at deler av en større skjæring eller blotning kan se nokså frisk ut og ha en (svak)rødbrun omvandlingsfarge (meta-arkose), mens tilgrensende lag har en gulgrå til gulbrun omvandlingsfarge eller hud (metasandstein). I slike tilfeller må skjæringa behandles som metasandstein. (...) Vesentlig her er at et bruddplan ofte kutter gjennom flere lag, og at sulfatminerale utfelt fra svovelholdige lag (i

metasandstein) vil utfelles langs bruddene, og over tid føre til omvandling av lag som i utgangspunktet har relativt lavt syredanningspotensiale.»

Med håndholdt XRF i felt ble den store variasjonen i svovelinnhold i bergmassen i Lillesandskomplekset godt dokumentert:

«Målinger med HH-XRF viser at bergartene innenfor Lillesandskomplekset gir enkelte eller flere høye svovelkonsentrasjoner (> 1 % S) per lokalitet, men at det kan være store forskjeller innad i hver lokalitet avhengig av om analysene er gjort på frisk bergart, sprekkeflater med utfellinger eller helt omvandlet bergart. Generelt kan man se at friske overflater viser lave svovelkonsentrasjoner (ofte <0,2 % S), men hvis overflaten har blitt eksponert i lengre tid kan konsentrasjonen være høyere på overflaten, til tross for at bergarten ikke er sterkt omvandlet. Gulfarget omvandlingshud på brudd- og foliasjonsplan har ofte svært høye svovelverdier (median > 4 % S).

Prøvekolleksjonen i denne studien viser at laboratorieanalyser (XRF eller LECO) av prøver fra Lillesandskomplekset oftest gir relativt lave svovelkonsentrasjoner (median_{XRF} = 0,13 % S og median_{LECO} = 0,18 % S). Kun 9% av prøvene har > 1 % S (LECO), som er langt lavere enn resultatene fra HH-XRF. Dette viser viktigheten av utvidet bruk av HH-XRF i felt og av et omfattende (antall) og variert (ulik grad av omvandling, tilstedeværelse av sprekker etc.) prøvesett for labanalyser.»

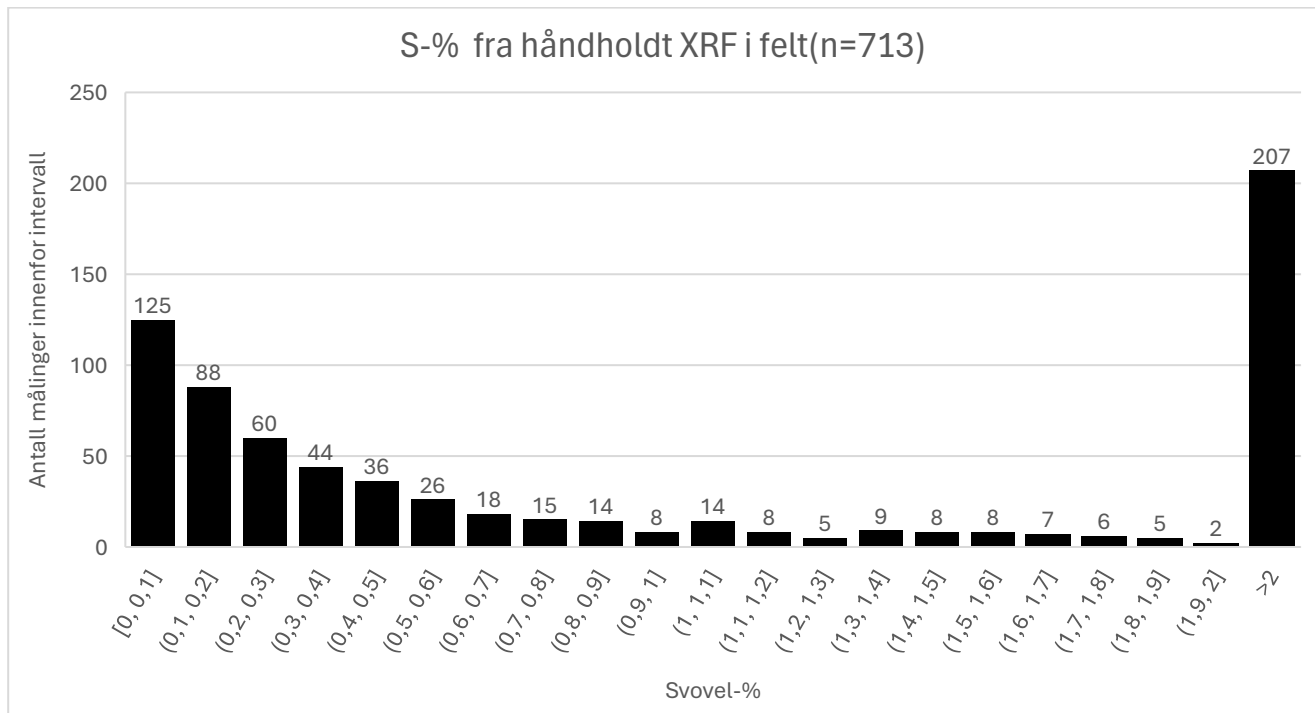
I tabellen under er flere av de viktigste observasjonene i NGU Rapport 013.2026 oppsummert.

Tabell 4. Oppsummering av typiske egenskaper for raskt eller spontant syredannende bergarter i Lillesandskomplekst.

Bergart	Metasandstein, meta-arkose og glimmergneis/-skifer i Lillesandskomplekset. Kartlagt som udifferensiert båndgneis på eksisterende kart. Også beskrevet som paragneis.
Feltkarakter	Gulfarget omvandlingshud på brudd- og foliasjonsplan i en ellers grå fin- til middelskornet gneis. Stedvis sterkt omvandlete lag som knuses lett med hammer.
Hovedmineraller	Kvarts, feltspat (oftest plagioklas) og biotitt
Svovelmineralogi	Oftest blanding av svovelkis og magnetkis. Magnetkis vesentlig omvandlet. Sekundære hydroksidmineraller er utbredt, deriblant jarositt og schwertmannitt på brudd- og foliasjonsplan.
Paste-pH	Oftest paste-pH < 6, stedvis også < 4
NAG-pH	Oftest NAG-pH < 4, mange også < 3
Svovel (HH-XRF)	0-20 % S. Ofte lave (< 0,2 % S) svovelverdier på friske flater, mens brudd- og foliasjonsflater med gulfarget omvandling er vesentlig høyere (1–20 % S).
Svovel (Lab-XRF)	Oftest < 0,2 % S, kun stedvis > 0,5 % S
Svovel (LECO)	Oftest < 0,2 % S, kun stedvis > 1 % S
Karbonat (LECO)	Tilnærmet intet målbart karbon, som indikerer totalt fravær av karbonatmineraller

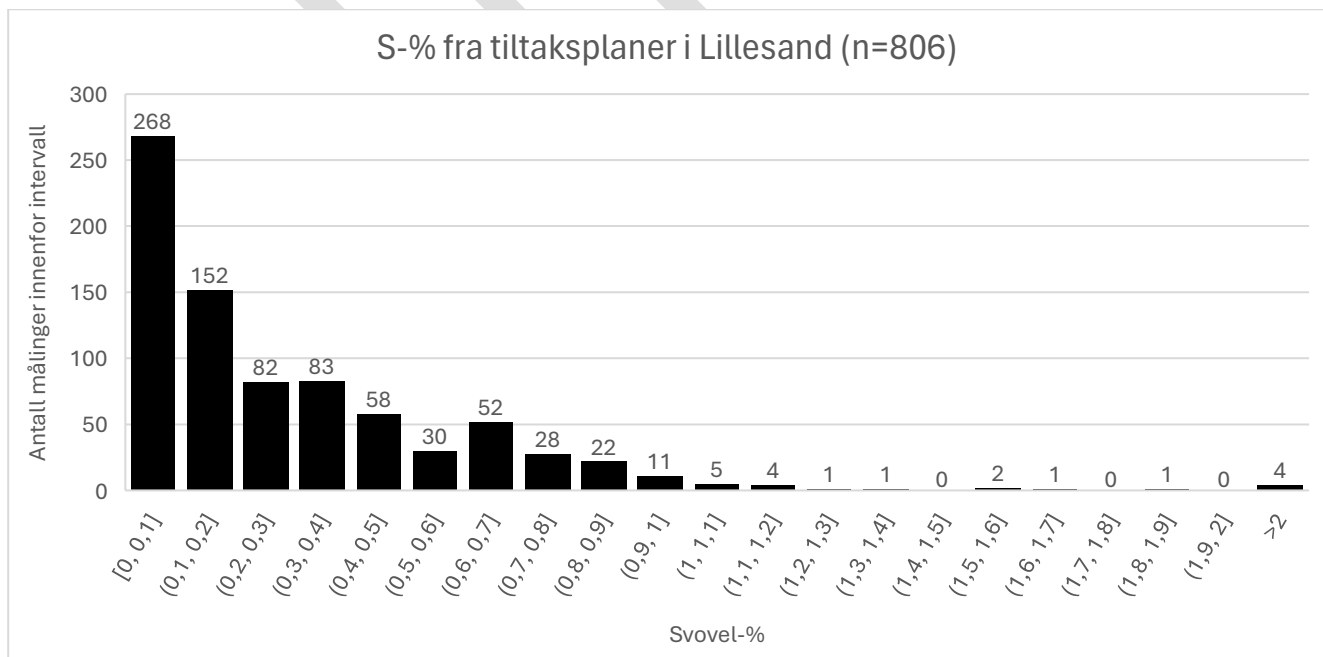
XRF-analyser fra tiltaksplaner og med håndholdt XRF i felt i Lillesand

Under er sammenhengen mellom XRF-analyser fra henholdsvis lab og i felt visualisert i to histogrammer, ett med S-% fra håndholdt XRF i felt (figur 15), og ett histogram med sammenstilt S-% fra tiltaksplaner i Lillesand, der prøvematerialet stort sett stammer fra pulverisert prøvemateriale fra borestøv og analysene er utført med fastmontert håndholdt XRF (figur 16).



Figur 15. Histogram som viser svovel-% fra målinger utført med håndholdt XRF på eksponerte flater i felt.

Av histogrammet med målinger av S-%, der målingene er gjort på eksponerte flater, sprekker og forvitringssoner med håndholdt XRF, ser man tydelig at det er et stort antall målinger som viser svært høye svovelkonsentrasjoner (over 2%, n=207). Analysene er her fokusert mot svovelinnhold på eksponerte flater, som sprekkeplan, bruddplan og foliasjonsplan samt målrettede målinger på gule og rustne flater.



Figur 16. Histogram som viser svovel-% fra målinger utført på pulverisert materiale, i all hovedsak fra borestøv og utført med fastmontert håndholdt XRF.

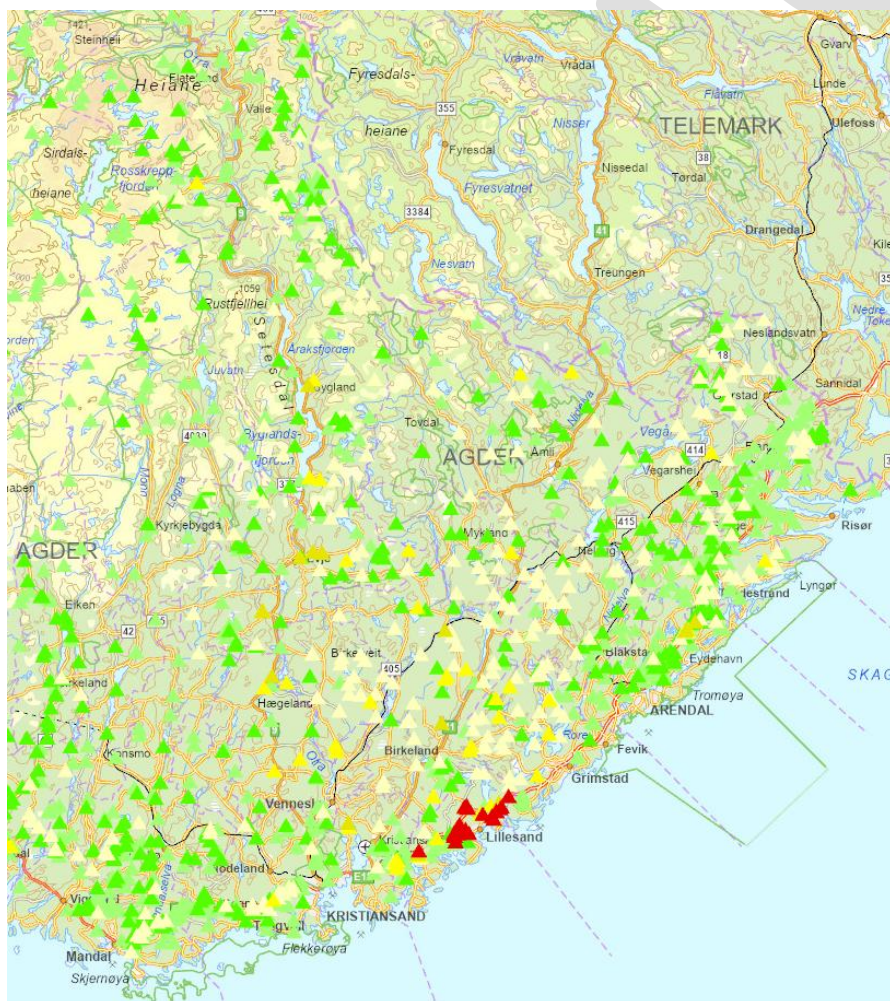
En lignende sammenstilling av resultater fra S-% fra mottatte tiltaksplaner i Lillesand, fra i all hovedsak borestøvsprøver, viser en helt annerledes fordeling. Av 806 prøver har kun 4 prøver vist verdier over 2%, og det forekommer nesten ikke verdier over 1 %. Dette underbygger observasjonen fra Hagelia (2023) om at bulkprøver og blandprøver ikke fanger opp det reelle syredannelsespotensialet der kontrasten mellom syredannende potensiale i mesteparten av volumet og sprekesett er stort.

1.5 Regional kontekst

Det er viktig å understreke at kunnskapsgrunnlaget i denne revisjonen i all hovedsak stammer fra undersøkelser gjort i Lillesandsområdet.

Erfaringer fra utbyggingsprosjekter i Lillesand viser, tross et stort fokus på syredannende bergarter og mange eksempler på omfattende forurensning de siste fire tiår, at det i prosjekter i nyere tid fremdeles skjer en underestimering av hvor stor andel av bergmassen som er syredannende, og en underestimering av hvor syredannende denne bergmassen faktisk er.

Erfaringer fra andre steder i regionen skiller seg noe fra erfaringene fra Lillesand. Det er behov for mer kunnskap om andre bergarter som er registrert med høy sannsynlighet for syredannelse i det regionale prognosekartet for syredannende gneis. I figur 17 under er det vist at svært høye verdier for labilt aluminium (over 500 ug/L), et klassisk kjennetegn på avrenning fra syredannende gneis, utelukkende er knyttet til prosjekter i Lillesandsområdet.

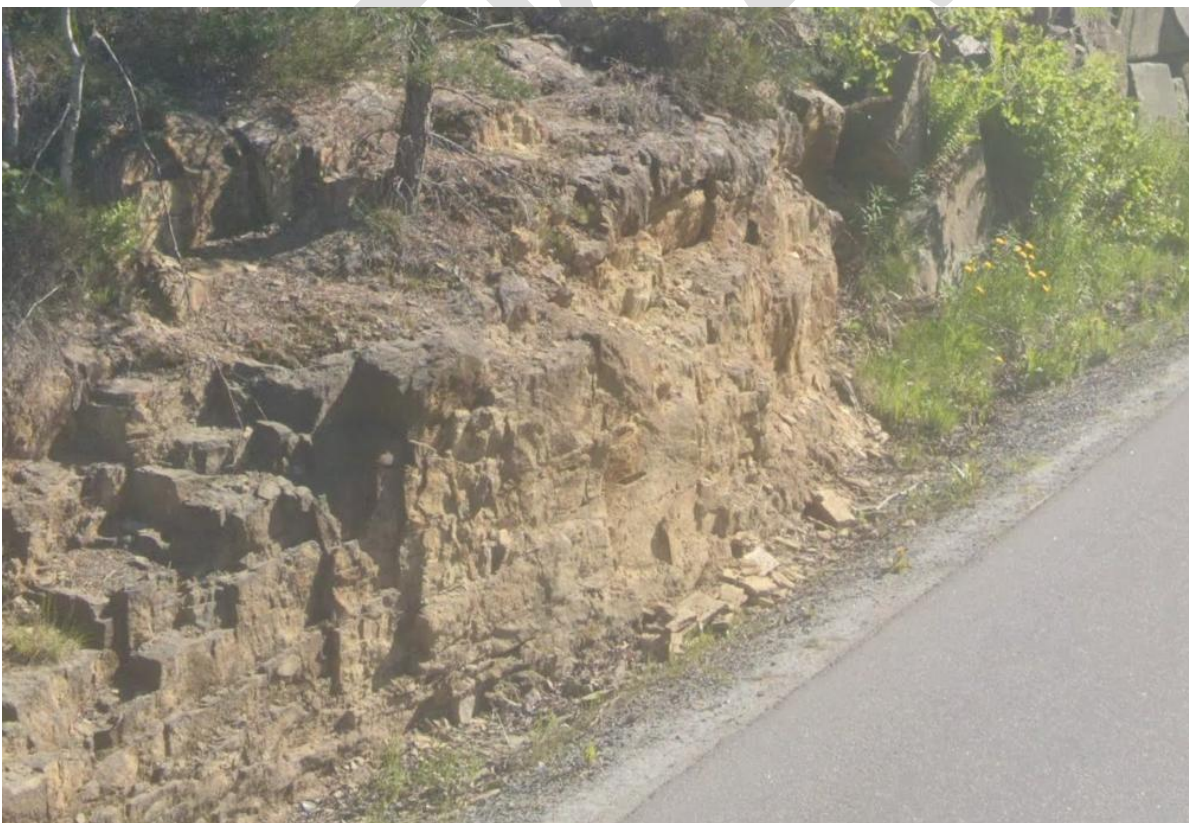


Figur 17. Uttrekk fra vannmiljø med alle stasjoner der labilt aluminium er registrert, med høyeste registrerte verdi fra lokaliteten. Lillesandsområdet skiller seg ut med de eneste registrerte verdiene over 500 ug/L labilt aluminium (rød farge). Gule markeringer i intervallet fra 100 til 500 ug/L, grønne markeringer verdier under 100 ug/L.

Den samme bergartstypen som finnes utbredt i Lillesandsområdet, finner man igjen i andre steder i regionen – og det bør vurderes å arbeide videre med å avgrense disse forekomstene i kommunale berggrunnskart i regionen. For eksempel gjennom et regionalt kartleggingsprosjekt der denne bergartstypen skiller ut som en egen bergartsenhet - med svært høy risiko for syredannelse.



Figur 18. Bilde av skjæring like sør for Brokelandsheia. Bergarten viser mange av de samme kjennetegnene som den mest problematiske bergartstypen fra Lillesandsområdet, med gulbrun omvandlingshud, og omvandlingslag. Bilde fra Google Maps.



Figur 19. Fra Morholtåsen i Grimstad kommune. Synlig omvandlet bergart med brungul omvandling i veiskjæring. Bilde fra Google Maps.



Figur 20. Fra nye E18 mellom Arendal og Tvedestrand. Rusten bergart med tydelig gulbrune utfelling. Bilde fra Google Maps.

1.6 CASE: IBC-forsøk fra Brønningsmyr i Lillesand.

I samarbeid med NGU har Lillesand kommune igangsatt et forsøk med IBC-containerer fylt med potensielt syredannende stein fra fire lokaliteter ved E18 Brønningsmyrkrysset i Lillesand kommune, et område kjent for svært syredannende stein. Parallelt med forsøkene har steinprøver blitt sendt til lab for analyse av S-% og NAG-pH- og paste-pH-tester.

Lokalitetene ble valgt for å dekke den observerte geologiske variasjonen i området og ha en viss geografisk spredning. Fra lokalitetene ble det med liten gravemaskin pigget ut mellom 1,5 og 2,5 m³ med steinmasser, som ble fraktet med mini-dumper ut av lokalitetene.

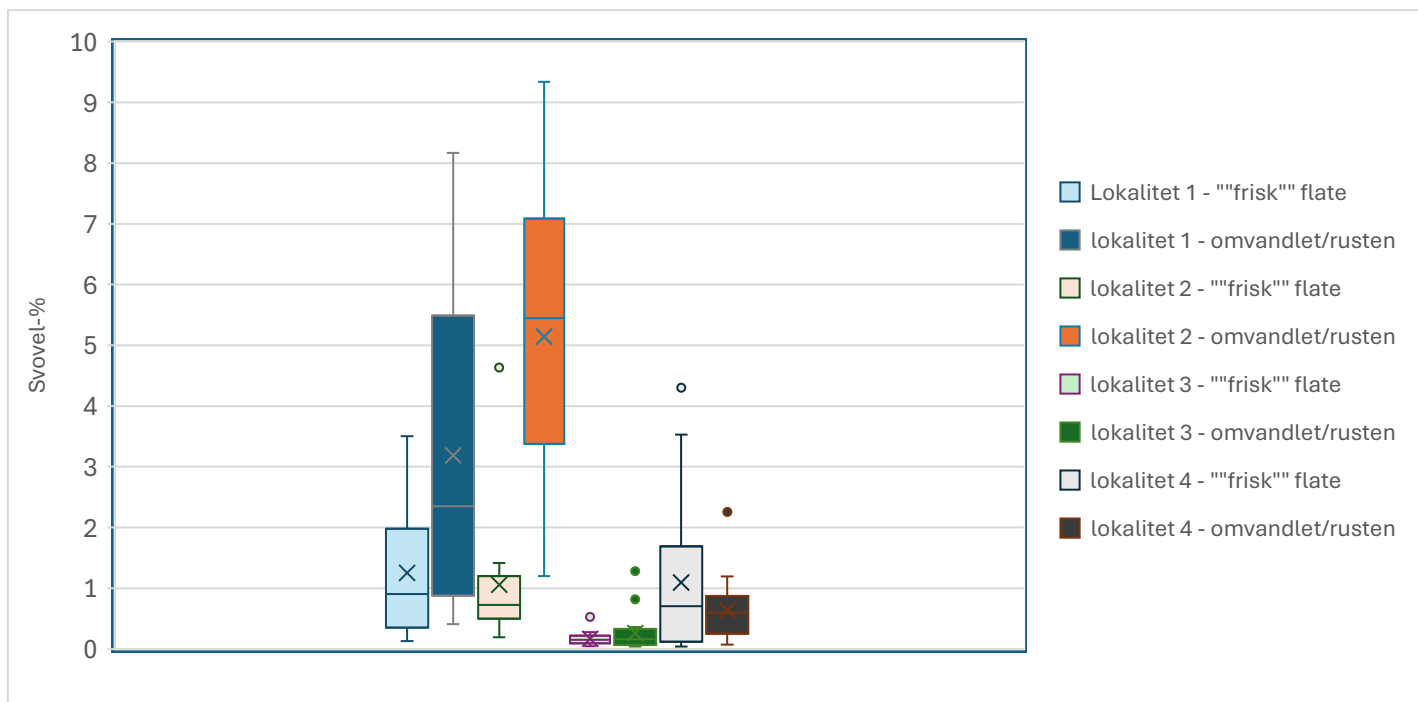


Figur 21. Steinmassene plassert på "rigg"-plass for XRF-analyser før sortering, knusing og plassering i IBC-containerer.

Steinmassene ble før plassering i containerne lagt på to lag med tykk pvc-membran, der det ble utført mellom 26 og 36 enkeltmålinger per lokalitet med håndholdt XRF. XRF-målingene ble gjort på både forvitret flater (omvandlet/rusten) og friske flater, se resultater i figur 22 under.

Steinmassene ble deretter grovsortert i to til tre størrelsesfraksjoner og plassert i IBC-containerer. IBC-containerne ble deretter plassert ute i felten, utsatt for vær og vind.

Første prøvetaking i containerne ble gjennomført etter 6 uker. Laveste verdi ble da målt til pH 2,17, og i strid med hypotesen om at mindre fraksjoner er hurtigere syredannende var det i containerne med de største fraksjonene laveste pH ble målt. I øvrige containere lå pH mellom 2,5 og 3,5.



Figur 22. Box-plot av svovelinnhold fra de ulike lokalitetene. Box-plotene viser stor spredning i S-%, men i all hovedsak høyere verdier fra omvandlete/rustne flater kontra friske og uforvitrete flater.

Parallelt med forsøkene ble det tatt ut representative prøver fra hver lokalitet, som ble sendt til to laboratorier for analyse av S-% og NAG-pH- og paste-pH-tester.

Håndstykker fra de fire lokalitetene ble sendt til to ulike laboratorier for analyse av svovelinnhold, paste-pH og NAG-pH, for å se om resultatene fra lab-testene viste sammenheng med resultatene fra IBC-forsøkene.

Tabell 5. Resultater fra lab-tester på representative prøver fra IBC-forsøk. Prøvene fra lokalitetene 1 og 4 ville blitt feilaktig friskmeldt basert på testene fra lab 1. Merk også svært mye lavere S-% enn det som ble målt rett på steinen.

	Lab 1			Lab 2			Laveste IBC-pH etter 6 uker
	S-%	paste-pH	NAG-pH	S-%	paste-pH	NAG-pH	
Lokalitet 1	0,164	6,06	5,2	0,05	5,3	3,75	2,17
Lokalitet 2	0,383	5,77	2,64	0,29	5,4	2,78	2,25
Lokalitet 3	0,548	4,24	2,74	0,05	6,4	3,89	3,1
Lokalitet 4	0,105	5,55	4,89	0,05	5,8	2,93	3,37

Resultatene fra lab-testene viser at det med nye testmetoder fremdeles er en ikke-neglisjerbar risiko for feilaktig klassifisering. Prøvene fra lokalitet 1 og 4 kunne blitt feilaktig friskmeldt basert på resultatene fra lab 1. Paste-pH-resultatene som skal vise potensialet for umiddelbar syredannelse viser også liten sammenheng med resultatene fra IBC-forsøkene. Dette understreker at representativ prøvetaking - til og med av så små volum som 1,5-2 m³ - er en krevende øvelse og en mulig stor feilkilde. Merk også jevnt over svært mye lavere S-% målt på prøvematerialet enn hva som ble målt på overflatene i felt.



Figur 23. IBC-containerer i felt. Regnvann akkumuleres i containerne over to uker. pH måles og containerne tømmes for vann etter måling.

UTKAST

REVIDERTE RETNINGSLINJER

4.2 Innledende undersøkelser

Ved mistanke om syredannende bergarter innenfor et planområde skal tiltaksområdet kartlegges av en geolog tidlig i planfasen. Formålet med de innledende undersøkelsene og den geologiske feltkartleggingen er å danne et bilde av den geologiske variasjonen i tiltaksområdet og skaffe et best mulig kunnskapsgrunnlag for å utforme et program for representativ prøvetaking.

I starten av de innledende undersøkelsene bør man undersøke om det finnes relevante kilder til informasjon om geologien i og i nærheten av tiltaksområdet. Dette kan for eksempel være geologiske kart, dokumenter fra reguleringsplaner i nærheten, eldre tiltaksplaner og data på forsursingsrelaterte parametere fra vannmiljø.

En grundig forståelse av bergartsenheter og variasjoner i området som skal kartlegges er svært viktig. I de innledende undersøkelsene skal det gjennomføres en geologisk feltkartlegging og i denne revisjonen innføres krav om bruk av håndholdt XRF under kartleggingen.

Den geologiske feltkartleggingen skal omfatte:

- Nøyaktig kartlegging av bergartsenheter innenfor tiltaksområdet. Resultatene fra den geologiske kartleggingen skal presenteres i et geologisk kart i en målestokk tilpasset det kartlagte området. Kartet må ha en tegnforklaring med en kort beskrivelse (<200 ord) av hver bergartsenhet. Det må fremkomme tydelig hvilke enheter som vurderes som mulig syredannende.
- Systematiske registreringer innen hver bergartsenhet med vekt på hvilke bergarter som opptrer, variasjoner i mineralsammensetning (deriblant opptreden av sulfider og sulfater), omfang av omvandling (deriblant mulige dypforvitringssoner), sprekkefrekvens og svakhetssoner.
- Systematiske målinger med håndholdt XRF.

Under den geologiske feltkartleggingen må det legges spesiell vekt på å identifisere og kartlegge omvandling og forvitring, både grad (*svakt-moderat-sterkt*) og farge, samt hardhet/motstand mot slag (*svakt-moderat-sterkt*).

Tidligere har man brukt begrepet «forvitring» for å beskrive gulbrunt, lite motstandsdyktig berg, men for å unngå misforståelser mellom forvitring av typen som skjer overalt på overflaten i dag og omvandlingen som påvirket og endret de syredannende gneisene for over hundre millioner år siden, så tilrår vi å bruke begrepet «omvandlet» (se tekstboks for definisjon).

Vær oppmerksom på at «gamle» bergoverflater som har vært eksponert for vann og luft over lengre tid (siden siste istid) kan være endret slik at f.eks. svovelmineralogien ikke lengre er representativt for bergmassen under overflaten. Det skal derfor å ta prøver under dette nivå eller i bergskjæring. Det bør brukes geologhammer eller liten slegge for å komme til under bergoverflaten.

I områder med stor overdekning av løsmasser og i skogsmark uten tidligere terrenginngrep kan det være vanskelig å få gjennomført en fullstendig kartlegging av forekommende bergarter/bergartsenheter. I disse områdene bør geologiske kart brukes aktivt, og det bør gjøres undersøkelser av skråninger, skjæring og eldre terrenginngrep i nærheten av tiltaksområdet.

Definisjoner:

En **bergartsenhet** er et kartleggbart volum av berggrunn, som skiller seg fra tilgrensende bergartsenheter i sammensetning, struktur eller andre geologiske egenskaper. En bergartsenhet kan bestå av flere bergarter som forekommer så sammenvevd eller i så tett veksling at de ikke er mulig å skille i målestokken som kartleggingen tar utgangspunkt i.

Omvandling er en prosess hvor berggrunnens mineralogiske, kjemiske og strukturelle egenskaper endres som følge av interaksjon med væsker ved lave temperaturer. Omvandling kan skje gjennom forvitring eller hydrotermal omvandling. Omvandling må ikke forveksles med omdanning (metamorfose), som er endringer i mineralogi og tekstur ved høyere temperatur og /eller trykk.

Forvitring er en type omvandling som skyldes eksponering av berggrunnen for atmosfæriske forhold eller overflatenære væsker, og deles i fysisk og kjemisk forvitring. I tropiske og sub-tropiske områder kan kjemisk forvitring strekke seg dypt ned i berggrunnen og resultere i dannelsen av saprolitt, en ofte leirrik, jordaktig versjon av den lokale berggrunnen. Dette kalles dypforvitring.

Dersom det på grunn av stedlige forhold som lite blottlagt fjell, stor overdekning av løsmasser etc., ikke er mulig å gjøre en geologisk kartlegging skal usikkerhetene dette medfølger kommenteres særskilt.



Figur 24. Berggrunn med høy sannsynlighet for akutt forsuring kan ofte gjenkjennes i felt ved å være moderat til sterkt omvandlet med en distinkt gulbrun farge og være lite motstandsdyktig mot slag.

Berggrunnsprøver av både omvandlet, forvitret og uforvitret materiale bør samles inn under de innledende undersøkelsene. For rask vurdering av akutt forsuringspotensiale anbefales det å utføre enkle pH-tester av omvandlet og uomvandlet materiale fra kartleggingen. Disse testene kan være så enkle som å legge noe steinmateriale i en beholder med vann og måle utviklingen i pH over en viss tidsperiode. Det anbefales å måle konduktiviteten for å avgjøre utvikling i saltinnholdet i prøven.

Det bør undersøkes om det er forekomster av karbonater i utvalgte steinprøver. En såkalt «fizz-test» kan gjøres som et ledd i de innledende undersøkelsene.

4.2.1 Bruk av håndholdt XRF i feltkartleggingen

For å skaffe et best mulig kunnskapsgrunnlag om fordelingen av svovel i bergarter skal det brukes håndholdt XRF i forbindelse med feltkartleggingen.

Bruk av håndholdt XRF på potensielt syredannende gneis er omtalt i SVV rapport 516 «Bruk av XRF på bergarter for vurdering av miljørisiko» (Hagelia & Fjermestad, 2016). Det anbefales å lese denne rapporten for en detaljert gjennomgang av hva en XRF er og hvordan denne brukes.

Håndholdt XRF har blitt omtalt som en semi-kvantitativ metode. Nyere modeller har svært lave deteksjonsgrenser for lette elementer som svovel og et høyere presisjonsnivå enn tidligere. Resultatene fra analysene skal gi en indikasjon på fordelingen av svovel i forekommende bergarter, og er et viktig kunnskapsgrunnlag for å lage en strategi for representativ prøvetaking.

Med en håndholdt XRF i felt er det mulig å gjøre et stort antall analyser på kort tid. For å få et bilde av den stedlige variasjonen bør det gjøres minst 10 målinger per lokalitet innenfor kartleggingsområdet. Det skal utføres målinger på både forvitrete flater og uforvittra/uomvandla bergart dersom begge forekommer på lokaliteten.

Alle områder med berg i dagen bør undersøkes, og skjæringer/skrånninger bør særskilt undersøkes. Det må rettes spesiell oppmerksomhet mot å avdekke svovel-innhold i sprekkebelegg og områder med omvandling.

Resultater fra målinger med håndholdt XRF skal loggføres og sammenstilles i tabell som vist under. Excel-fil med resultater fra alle målinger bør legges ved den miljøgeologiske rapporten.

Tabell 6. Eksempel på føring av resultater fra XRF-analyser i felt.

Prosjekt	Lokalitet	#	Bergart	Forvitret/omvandlet/frisk	S-%
«Furutoppen»	1	1	Metasandstein	Omvandlet	8,14
«Furutoppen»	1	2	Metasandstein	Frisk	0,7

Den geologiske feltkartleggingen skal sammen med resultater fra håndholdt XRF-undersøkelser og eventuelt resultatene fra enkle pH-tester, utgjøre grunnlaget for å utarbeide en strategi for representativ prøvetaking.

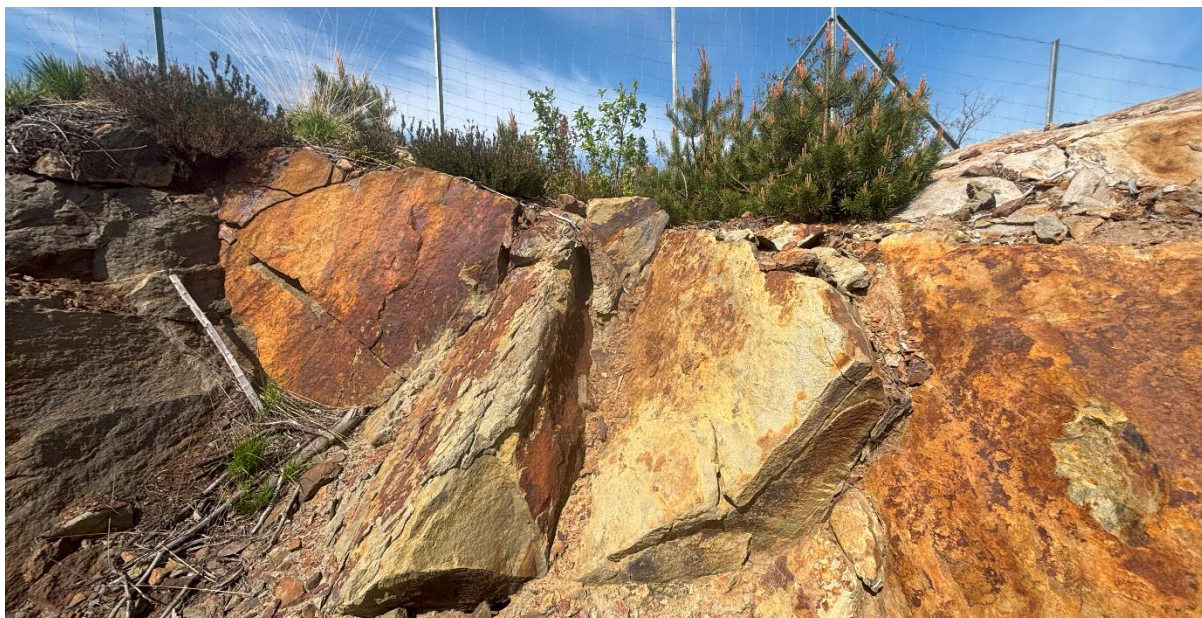
4.2.2 Innledende undersøkelser – spesielt for gneiser i Lillesandskomplekset

Basert på de innledende undersøkelsene og resultatene fra målinger med håndholdt XRF kan områder i Lillesand allerede klassifiseres som syredannende, uten ytterligere prøvetaking.

Selv om verdiene fra XRF-analysene primært er tenkt som en indikasjon og et viktig kunnskapsgrunnlag for å sikre representativ prøvetaking, så medfører mange registreringer av høye svovelverdier (over 1-2 %), og/eller synlige forekomster av omvandlete bergarter og svovelrike sekundærmineraliseringer på en lokalitet, en stor sannsynlighetsovervekt for at området vil ha svært høy risiko for omfattende syredannelse. **Slike lokaliteter skal i Lillesandsområdet defineres som syredannende uten behov for ytterligere prøvetaking.**



Figur 25. Håndholdt XRF i fra kartlegging av mulige prøvelokaliteter. Analysene kan gjøres rett på fjellet, og gir en god indikasjon på forekommende svovel-konsentrasjoner.



Figur 26. Skjæringer fra både nyere og eldre tiltak i nærheten av tiltaksområdet kan være en god kilde til informasjon, og kan være en lett tilgjengelig kilde for uttak av representativt prøvemateriale - gitt at de samme bergartsenhetene fortsetter inn i tiltaksområdet.

4.3 Representativ prøvetaking

«Representativ prøvetaking i rusta svovelførande gneis vil vere noko forskjellig frå prøvetaking i berg der syrepotensialet er meir homogent fordelt. Det er den lokale variasjonen som avgjer kor mange prøver ein bør samle.» Hagelia, 2023.

Representativ prøvetaking er den mest krevende og samtidig den mest avgjørende oppgaven i arbeidet med klassifisering av potensielt syredannende gneis.

Målet med representativ prøvetaking er at det sammenstilte resultatet av prøvetakingen skal beskrive den forekommende bergmassens egenskaper på et akseptabelt nivå, med tilstrekkelig sikkerhet (Standard Norge, 2012). Representativ prøvetaking skal sikre at beslutninger tatt på grunnlag av noen få gram analysert materiale er **gyldige for hele bergmassens syredannende potensiale**.

Den store variasjonen av svovelinnhold over små avstander i de regionalt forekommende gneisene er en stor utfordring i arbeidet med representativ prøvetaking. Et stort tiltaksområde utløser behov for et større antall prøver for å avdekke eventuelle lokale variasjoner. En stor variasjon innenfor tiltaksområdet utløser videre behov for et større antall prøver enn i områder med mer homogene bergarter og liten variasjon.

Det viktigste ved utvelgelsen av prøvepunkter og uttaksmetoder er en grundig forståelse av områdets geologi og lokale variasjoner basert på de innledende undersøkelsene:

- Resultatene fra den geologiske kartleggingen og den geologiske variasjonen i området skal være avgjørende for hvor mange prøver som tas.
- Prøvene skal være representative for typiske variasjoner innen hver bergartsenhet.
- Prøvene bør ideelt sett ha en god romlig fordeling og dekke det kartlagte tiltaksområdet.
- I områder med høye svovelskonsentrasjoner knyttet til svakhetssoner og sprekkesett vil prøver av kun friske, uomvandlete bergarter ikke være representativt for bergmassens samlede syredannelsespotensiale og det må tas separate prøver av eventuelle omvandlete bergarter, forvitringssoner og friske, uomvandlete bergarter der disse variasjonene opptrer.
- I områder med lite blottlagt fjell og stor overdekning av løsmasser, bør det vurderes om prøver fra skjæringer og eldre terrenginngrep i nærheten av tiltaksområdet kan være en kilde til representativt prøvemateriale for tilsvarende bergartsenheter i tiltaksområdet.

- For å sikre et minste mål av representativitet i prøvematerialet skal prøver som sendes til testing være av en viss **minimumsstørrelse (> 3 kg)** og kan bestå av en sammensetning av mindre delprøver fra samme prøvelokalitet (Standard Norge, 2012).
- Hele prøven skal knuses ned og homogeniseres før splitting.
- NB! I større prosjekter (>10 000 m³) skal det i tillegg tas prøver til kolonnetester eller IBC-forsøk. Størrelsen på prøven må i disse tilfellene økes til 6 kg for å ha tilstrekkelig materiale til gjennomføring av kolonnetest. Materiale som skal brukes til kolonnetest skal være fra samme prøve som sendes til lab for statiske tester, og må knuses ned til 0-10 eller 0-16 mm fraksjon før splitting i to deler – 1 del som brukes til kolonnetesting og 1 del som sendes til lab for statiske tester.

Prøvepunktene skal nummereres og tegnes inn i kartet fra den geologiske kartleggingen. Det skal i rapporten særskilt redegjøres for valg av prøvepunkter og hvor representative prøvene vurderes å være for den aktuelle bergartsenheten. Eventuelle usikkerheter knyttet til representativitet i prøveutvalget skal kommenteres.

4.3.1 Uttak av prøvemateriale

Ulike stedlige forhold tilsier at ulike metoder for uttak av prøvemateriale må benyttes. Prøver kan f.eks. slås ut med liten slegge fra skrånninger der dette er mulig, eller tas ut ved hjelp av liten batteridrevet borhammer og sprengkiler der fjellet er mer kompakt. Slikt enkelt prøveuttak med håndverktøy har fordelen at det ikke kreves tilgang til området med borerigg før prøver kan tas ut.

Prøvemateriale kan også tas ut fra tilgjengelige skjæringer og eldre terrenginngrep i nærheten av tiltaksområdet, dersom disse vurderes å kunne være representative for forekommende bergarter i selve tiltaksområdet.

NB! Det stilles ikke krav om uttak av borestøvsprøver/borekaks som tidligere. Uttak av prøvemateriale/borekaks med borerigg må vurderes som en vertikal blandprøve. Slikt uttak kan være en kilde til prøvemateriale som fortynner og undervurderer syredannende egenskaper knyttet til svovelanrikninger i sprekkeplan og eventuelle soneringer med omvandlet materiale.



Figur 27. Borestøvsprøver kan være en kilde til ikke-representativt prøvemateriale. Resultater fra analyser av slikt prøvemateriale bør behandles med forsiktighet.

5 Klassifisering av steinmasser

Tidlig og riktig klassifisering av steinmasser er grunnleggende for å kunne planlegge forebyggende tiltak i områder med risiko for å sprengne i syredannende stein. Tiltak som forhindrer at forurensende avrenning fra syredannende masser oppstår er vesentlig billigere, enklere og mer effektivt enn tiltak som skal bøte på allerede forurenset avrenning.

Det finnes svært mange tester som kan brukes for å måle syredanningssevnen til bergmasser, se bl.a. [GARD Guide – kapittel 5.4](#) og Parbhakar-Fox & Lottermoser (2015). *Dersom en tiltakshaver for et større tiltak ønsker å benytte metoder som påviselig skiller bedre mellom syredannende og ikke-syredannende gneis, kan forurensningsmyndigheten fremdeles åpne for dette. Det må da framlegges dokumentasjon som viser at disse metodene skiller bedre mellom syredannende og ikke-syredannende gneis.*

I denne revisjonen legges det opp til å iverksette deler av den såkalte AMIRA-metoden (Smart et al., 2002) for å karakterisere steinmasser. Klassifiseringen baserer seg på en kombinasjon av to tester, *paste-pH* og *NAG-pH*, som sammen er ment å fange opp både det umiddelbare (*paste-pH*) og det mer langvarige syredanningspotensialet (*NAG-pH*).

NB! I større prosjekter med anslått utsprengt fast masse over 10 000 m³ er det lagt inn krav til kolonnetester, eller feltbaserte utlekkingstester, se kapittel 5.3.

5.1 Mineralogiske undersøkelser

Hver steinprøve skal analyseres for totalt svovelinhold. Resultatene fra analyse av svovel-% inngår ikke i klassifiseringen av steinmasser som syredannende eller ikke, men kan være en indikator på steinmassenes syredanningspotensiale. Resultatene fra svovel-analyse på lab, bør sammenstilles med håndholdt XRF-verdier fra lokaliteten i felt.

NB! Hele prøven (> 3 kg) skal knuses og homogeniseres før splitting i delprøver til svovelanalyse og statiske tester.

Det finnes flere akkrediterte metoder for analyse av svovel-% på laboratorier. I rapporten skal det beskrives hvilken metode og hvilket instrument som har blitt brukt for analyse av svovel-%.

Større prosjekter bør brukes som til å bygge kunnskap, spesielt om andre bergartstyper som er angitt i det regionale risiko-kartet for syredannende gneis, utenom det som er omtalt som båndgneis. Dyperegående mineralogiske undersøkelser bør i disse tilfellene inngå som en del av prosjektet. Spesielt for større prosjekter kan det være viktig å kjenne til om det forekommer karbonater i bergartene og i hvilken form svovelet i prøvematerialet foreligger, f.eks. som sulfider (pyritt eller pyrhotitt) eller som sekundærmineraller. Det bør derfor gjøres nærmere mineralogiske analyser (XRD, SEM, mikrosonde eller andre metoder) for å identifisere ulike mineraler og svovelholdige faser i både omvandlet og uomvandlet materiale.

5.2 Statiske tester

5.2.1 Paste-pH

Paste-pH er en enkel og standardisert test som kan indikere forekomster av lettløselige syredannende komponenter og er ment å forutsi *akutt forsureningspotensiale* fra bergartsprøver, såkalt «first-flush»-karakteristikk (Weber et al., 2006).

I en paste-pH-test plasseres 25 gram med finknust materiale (< 75 µm) i et begerglass og blandes med 50 g destillert vann under kontinuerlig omrøring. Løsningen skal stå i minst 12 timer (over natten), og pH måles deretter.

Denne prøvemethoden har i flere arbeider vist seg å være sensitiv for kornstørrelse, der finere kornstørrelse kan gi høyere paste-pH enn grovere kornstørrelse (Noble et al., 2016). Foreløpige data synes å peke i retning av at det hovedsakelig er prøver med tilstedeværelse av jarositt som blir identifisert som akutt syredannende.

5.2.2 NAG-pH

NAG-pH er en statistisk test som kan indikere det langsiktige syredanningspotensialet i prøvematerialet. Testen er standardisert og mye brukt i gruveindustrien. Den er vurdert som en statistisk test som samsvarer godt med resultater fra langvarige utlekkings tester.

I testen («single-addition» NAG test) blandes 2,5 gram av finknust prøvemateriale (<75 µm) med 250 ml 15 % hydrogenperoksid-løsning for å oksidere eventuelle sulfider i prøven. Deretter måles pH i løsningen dagen etter. Løsningen titreres så med NaOH til henholdsvis pH 4,5 og pH 7 for å danne et bilde av syrekapasiteten i prøven, uttrykt som NAG (kg H₂SO₄/t).

Metoden er nærmere beskrevet i [AMIRA Test Handbook – Appendix D](#) (Smart et al, 2002).

Det er verdt å merke seg to sider ved NAG-pH: På den ene siden vil NAG-pH kunne underestimeres for svovelrike prøver (>1-2 %S) fordi hydrogenperoksid brukes opp før alle reaktive sulfider er oksidert. Man må i slike tilfeller bruke en «sequential» NAG test.

På den andre siden gir NAG-pH ikke svar på hvor lang tid det vil ta før bergmassen eventuelt gir syredannende avrenning eller hvor omfattende syredanningen vil være. Supplerende analyser (f.eks. mineralogiske undersøkelser, kinetiske tester) kan derfor være nødvendig for å vurdere forsurningspotensialet og nødvendige tiltak for bergartsenheter med NAG-pH under 4,5 og paste-pH over 6.

I vurderingen av resultater fra rustne prøver er det viktig å huske at hydrogenperoksid kan påvirkes av jernoksider, og at både NAG-pH og NAG-verdien kan underestimeres i prøver med forekomst av ferrihydritt eller andre jernoksider (Karlsen, 2024).

NAG-pH-testen har blitt nærmere undersøkt i flere vitenskapelige arbeider, og det er vist at NAG-pH-testen kan gi skjeve resultater. Resultatene fra testen kan være påvirket av manglende likevekt med CO₂ i lufta, (Charles et al, 2015) og metoden (bl.a. styrke på hydrogen-peroksid, reaksjonstiden og temperatur) bør tilpasses stedsspesifikke forhold for å unngå misvisende resultater (Parbhakar-Fox et al, 2018).

NAG-pH er ofte angitt som et «worst-case-scenario», men resultater fra foreløpige sammenligningstester fra Lillesands-området (IBC-case nevnt tidligere) viser at de større felt-testene kan nå et mye lavere pH-nivå enn hva resultatene fra NAG-pH-testen tilsier.

5.2.3 Tolkning av data fra de statiske testene.

Data fra SYL (Svendby et al, 2026) viser at for et stort antall prøver fra Lillesandsområdet med paste-pH under 6 faller pH dramatisk over en 30-dagers periode. Dette bekrefter at disse prøvene fra Lillesandsområdet bør havne i kategorien «rask», og antyder at syredannelsen kan skje svært raskt i anleggs-sammenheng.

Foreløpige resultater taler også for at resultatene fra de statiske testene bør behandles med noe forsiktighet og faglig skjønn. Resultater må alltid vurderes i lys av *geologisk kontekst, erfaringer fra utbyggingsområder i nærheten og observasjoner fra den geologiske feltkartleggingen.*

5.3 Store prosjekter – langtids utlekkings-tester.

Statiske tester gir raske estimater av syredannende potensiale, men reflekterer ikke de dynamiske prosessene som oppstår under naturlige forhold. Disse prosessene utvikler seg gradvis og kan pågå over lang tid, ofte i flere tiår eller lengre. Resultatene fra kortvarige laborietester fanger derfor i liten grad opp slike effekter (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). Det meste av kunnskapsgrunnlaget bak retningslinjene baserer seg på resultater fra langtids kolonne-tester.

Erfaringen med de statiske testmetodene, paste-pH og NAG-pH er enn så lenge relativt begrenset for de regionalt forekommende gneisene, og har i enkelte tilfeller gitt uklare resultater. Foreløpige resultater kan antyde at prøvemethodene er sårbare for svak representativitet i prøvematerialet, ref. IBC-forsøkene i case nevnt over.

En korrekt klassifisering av bergmasser med hensyn til syredannende potensial er avgjørende for miljømessig forsvarlig håndtering. Dersom bergarter klassifiseres som «ikke-syredannende» åpnes det for disponering og gjenbruk av disse massene uten avbøtende tiltak, i og utenfor tiltaksområdet. Dette innebærer at en slik karakterisering må være underbygget av høy grad av sikkerhet, ettersom en feil klassifisering kan få betydelige miljømessige og økonomiske konsekvenser på kort og lang sikt.

For å redusere usikkerhetene knyttet til representativitet i prøvematerialet settes det krav til langtids utlekkings tester (kinetiske tester) som kontroll i større prosjekter med anslått mengde utsprengt fast masse over 10 000 m³.

De kinetiske testene må ha en viss varighet, gjerne opptil ett år eller mer slik at det dannes et godt bilde av syredanningspotensialet over tid.

Det finnes flere ulike metoder for langtids utlekkings tester. I vedlegg I og II er det metodebeskrivelse for to enkle metoder for slike tester. Metodene er valgt på bakgrunn av at de er enkle, rimelige å etablere og drifte, og metodene tidligere har tidligere blitt brukt med hell i forsøk og prosjekter med stein fra Lillesandsområdet.

Slike tester er egnet til å undersøke om prøven produserer syre over tid når mineralene er i kontakt med vann, men ikke under helt vannmettet tilstand. Umettede kolonner og IBC-containerer etterligner utlekking i felt ved å ha en utforming som tillater at produkter frigjort fra primærmineraleler felles ut som sekundærmineraleler (Price, 2009). Ved å gi informasjon om de kombinerte effektene av primære og sekundære mineraleler, kan kolonnetester og IBC-forsøk gi et mer realistisk grunnlag for å vurdere eventuell syredannelse samt kjemien i avrenningsvannet.

Det finnes flere standardiserte metoder for kinetiske tester – og tiltakshavere og konsulenter står fritt til å velge den metoden som passer prosjektet best.

5.4 Sammenstilling og klassifisering av prøvemateriale

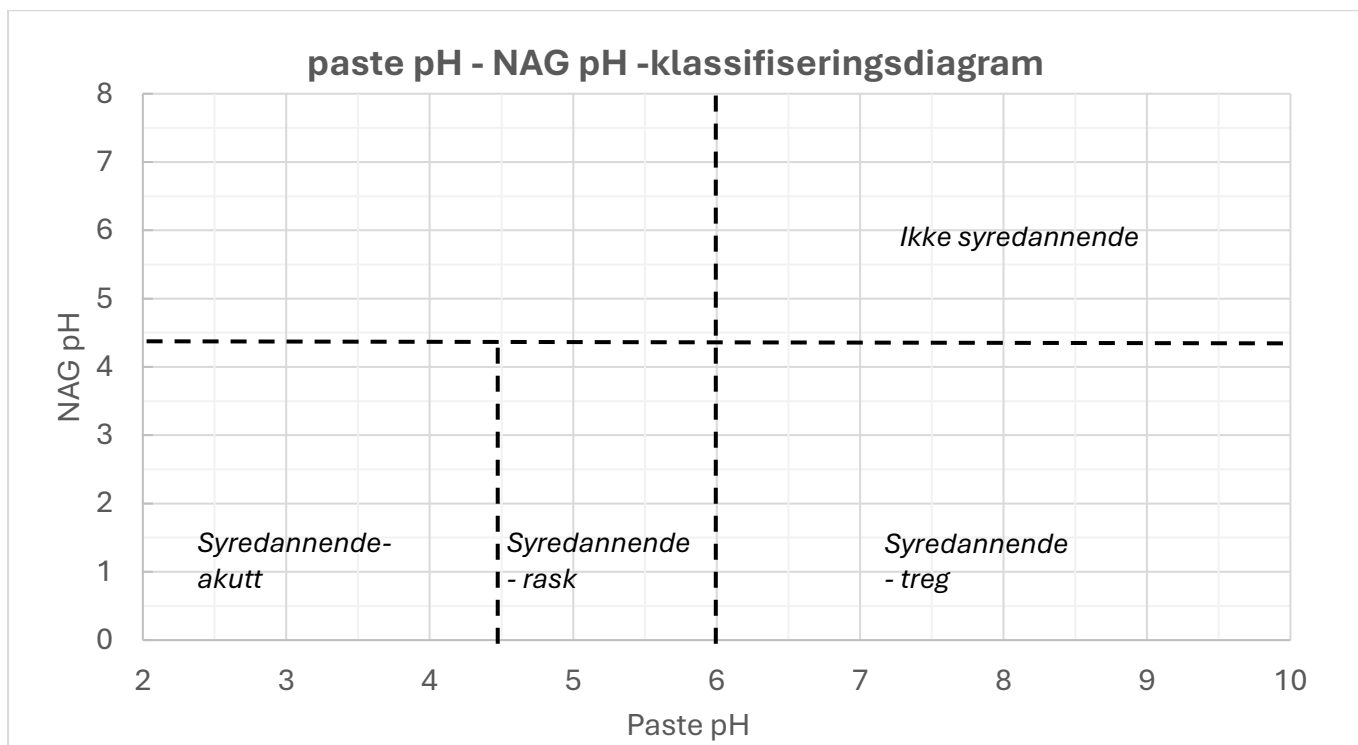
Data fra analysene skal sammenstilles i tabell i excel-format som legges ved rapporten, med følgende kolonner:

Tabell 5. Sammenstilling av resultater fra analysene.

Prosjekt	Lokalitet	#	Bergart	S-%	Paste-pH	NAG-pH	NAG-7 (kg H ₂ SO ₄)	UTM32N	UTM32Ø
«Furutoppen»		1	Metasandstein	0,3	5,6	3,8	12,3	58.24880	8.37680

Prøvepunktene skal vises på et geologisk kart i en egnet målestokk for kartleggingsområdet.

Resultatene fra paste-pH og NAG-pH kan plottes inn i et paste-pH/NAG-pH-klassifiseringsdiagram som vist i figuren under.



Figur 28. Paste-pH-NAG-pH-diagram.

Som diagrammet viser er det primært verdien for NAG-pH (under eller over 4,5) som styrer om prøven blir klassifisert som syredannende eller ikke. Verdien fra paste-pH indikerer hvor mye umiddelbart tilgjengelig syre det er i prøven.

Etter sammenstilling av alle resultater bør det gjøres en vurdering av de ulike bergartene og en overordnet vurdering av hele bergmassens potensiale for syredannelse.

Resultatene fra testene skal vurderes i lys av den geologiske konteksten, som inkluderer den geologiske kartleggingen og målte verdier fra håndholdt XRF. Erfaringer fra lignende prosjekter i nærheten bør også inngå i disse vurderingene. Om mineralogiske undersøkelser som XRD, SEM eller mikrosonde er blitt utført skal dette også inngå i vurderingene.

Resultater fra eventuelle kolonnetester eller IBC-forsøk i større prosjekter, bør tillegges særskilt vekt i tolkningen av bergmassens syredannende potensiale.

5.5 Miljøgeologisk rapport

Resultatene fra den geologiske kartleggingen og den geokjemiske klassifiseringen skal sammenfattes i en miljøgeologisk rapport, som skal danne grunnlaget for utarbeidelse av en eventuell tiltaksplan etter forurensningsforskriften kapittel 2.

Litteraturliste:

- AMIRA International. (2002). ARD Test Handbook: Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage, AMIRA P387A. Ian Wark Research Institute and Environmental Geochemistry International Ltd., Melbourne.
- Bigham, J. M. & Nordstrom, D. K. (2000). Iron and Aluminum Hydroxysulfates from Acid Sulfate Waters. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 40 (1): 351–403.
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L., Weisener, C. G., Paktunc, D., Gould, W. D. & Johnson, D. B. (2014). The Geochemistry of Acid Mine Drainage. I: Turekian, K.K. & Holland, H.D. (red.), *Treatise on Geochemistry* (Second Edition), Elsevier, 131-190.
- Charles, J., Barnes, A., Declercq, J., Warrender, R., Brough, C. & Bowell, R. (2015). Difficulties of Interpretation of NAG Test Results on Net Neutralizing Mine Wastes: Initial Observations of Elevated pH Conditions and Theory of CO₂ Disequilibrium. I: Proceedings of the 10th ICARD & IMWA Annual Conference, Santiago, Chile.
- Hagelia, P. (2023). Sur avrenning frå rusta svovelførande gneis. FoUI-prosjektet MilGRO 2022-2024. Statens vegvesens rapporter nr. 922.
- Hagelia, P. & Fjermestad, H. (2016). Bruk av XRF på bergartar for vurdering av miljørisiko: Eksempel frå Rv 4 Gran og E18 Grimstad – Kristiansand. Statens vegvesen rapport 516.
- Hammarstrom, J. M., Seal II, R. R., Meier, A. L. & Kornfeld, J. M. (2005). Secondary Sulfate Minerals Associated with Acid Drainage in the Eastern US: Recycling of Metals and Acidity in Surficial Environments. *Chemical Geology*, 215, 407-431.
- INAP (The International Network for Acid Prevention). (2009). *Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide)*.
- Johnson, D. B. & Hallberg, K. B. (2003). The Microbiology of Acidic Mine Waters. *Research in Microbiology*, 154, 466-473.
- Karlsen, O. M. O. (2024). Acid leaching of gneisses in southern Norway: An evaluation of H₂O₂ oxidation testing for the determination of the acid-producing potential of sulphide-rich rocks. Masteroppgave, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU).
- Lindum AS. (2024). Sluttrapport: Karakterisering av syredannende gneis – kunnskapsgrunnlag for utforming av retningslinjer. 2021-2024.
- Nicholson, R. V. & Schärer, J. M. (1994). Laboratory Studies of Pyrrhotite Oxidation Kinetics. I: Alpers, C.N. & Blowes, D.W. (red.), *Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation*, ACS Symposium Series, Vol. 550, 14–30.
- Nordstrom, D. K. (1982). Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary minerals. I: *Acid Sulfate Weathering*, SSSA Special Publication no. 10, 37-56.
- Nordstrom, D. K. (2019). Geochemical modelling for mine site characterization and remediation. *E3S Web of Conferences*, 98, 05013.
- Nordstrom, D. K. (2020). Geochemical modeling of iron and aluminum precipitation during mixing and neutralization of acid mine drainage. *Minerals*, 10 (6), 547.
- Nordstrom, D. K., Blowes, D. W. & Ptacek, C. J. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57, 3-16.
- Nordstrom, D. K. & Southam, G. (1997). Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation. I: Banfield, J.F. & Nealson, K.H. (red.), *Geomicrobiology: Interactions Between Microbes and Minerals*. *Reviews in Mineralogy*, 35, 361-385.
- Parbhakar-Fox, A. & Lottermoser, B. G. (2015). A Critical Review of Acid Rock Drainage Prediction Methods and Practices. *Minerals Engineering*, 82, 107-124.

- Parbhakar-Fox, A., Fox, N., Ferguson, T., Hill, R. & Maynard, B. (2018). Dissection of the NAG pH Test: Tracking Efficacy Through Examining Reaction Products. I: Wolkersdorfer, C. et al. (red.), *Mine Water – Risk to Opportunity (Vol II)*, 949–956.
- Pearce, A. (2018). A Mineralogical and Geochemical Description of Potentially Acid-producing Gneisses from the Lillesand Area, Implications for Leaching Behaviour. Masteroppgave, Universitetet i Oslo (UiO).
- Price, W. A. (2009). Prediction Manual of Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. MEND Report 1.20.1 (December 2009).
- Skjønberg, I. (2023). An evaluation of methods for acid rock drainage prediction. Masteroppgave, Universitetet i Oslo (UiO).
- Standard Norge. (2012). Karakterisering av avfall - Prøvetaking av avfall fra bergindustri. SN-CEN/TR 16365:2012.
- Svendby, A. K., Bingen, B., Torgersen, E., Andersson, M., Nordgulen, Ø., Granseth, A., Olesen, O., Tetreault, J., Gellein, J. & Larsen, B. E. (2026). BRUK - Berggrunnsressurser og utfordringer i Kristiansand kommune. NGU Rapport 2026.010.
- Svendby, A. K., Andersson, M., Torgersen, E., Glomsås Nymoen, K. & Drivenes, K. (2026). SYL - Syredannende bergarter i Lillesand – Innledende kartlegging, pH-målinger og geokjemiske analyser. NGU Rapport 2026.013.
- Weber, P. A., Hughes, J. B., Conner, L. B., Lindsay, P. & Smart, R. (2006). Short-term acid rock drainage characteristics determined by paste pH and kinetic NAG testing: cypress, prospect, New Zealand. I: 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), 2289-2310.
- Welch, S. A., Kirste, D., Christy, A. G., Beavis, F. R. & Beavis, S. G. (2008). Jarosite dissolution II—Reaction kinetics, stoichiometry and acid flux. *Chemical Geology*, 254 (1–2), 73-86.

Vedlegg I Metodebeskrivelse: Umettet kolonnetest – enkelt oppsett

Denne metoden ligner på den nærmere beskrevet i Pearce (2018), men er tilpasset bruk av 1,5 liters PET-beholdere for enklere og rimeligere etablering av forsøk.

For å knuse prøvematerialet ned til en passende fraksjon (0-16 mm) er det nødvendig med tilgang til kjefteknuser eller lignende. De fleste pukkverk har en lab med slikt utstyr tilgjengelig.

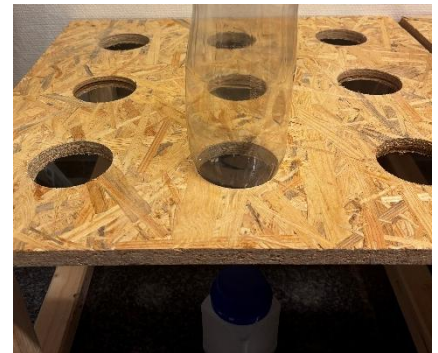
Et minimum av snekkerferdigheter er også nødvendig for å lage rammer til beholderne. Hullsag med passende diameter er hylleware på de fleste byggevarerhus.

1. Prøvepreparering

- **Nedknusing:** Ca. 3 kg prøvemateriale knuses ved hjelp av kjefteknuser eller lignende, til en fraksjon på 0–16 mm. Andre fraksjoner kan også benyttes i tilfelle det er ønskelig å undersøke reaktiviteten til finere eller grovere fraksjoner.

2. Oppsett

- **Kolonne:** Som kolonne benyttes 1,5 liters PET-beholdere (brusflasker) hvor bunnen av flasken er saget bort. Flaskene monteres opp-ned i et tilpasset stativ med passende diameter (ca. 8,5 cm for en vanlig brusflaske).
- **Filtrering:** For å forhindre utvasking av finstoff og tetting av utløp, plasseres et filter av glassfiber e.l. i flaskehalsen før montering av kork.
- **Drenasjesystem:** Det bores hull i flaskekorken og en slange tynn slange føres gjennom. Hullet i korken på kolonnen og oppsamlingsflasken må være akkurat stort nok til slangen. Slangen føres videre til en lukket oppsamlingsbeholder (0,5-1 liter) for å minimere fordamping og kontaminering av eluatet (utlekkingsvannet).
- **Pakking:** Det preparerte prøvematerialet plasseres løst i kolonnene for å sikre god lufttilgang (umettede forhold).



3. Gjennomføring

- **Infiltrasjon:** Kolonnene tilsettes 100 ml de-ionisert vann én gang per uke. Vannet dusjes forsiktig og jevnt over overflaten på kolonnen.
- **Oksidasjonsfase:** Mellom hver vanning eksponeres materialet for atmosfærisk luft, noe som legger til rette for eventuell oksidasjon av sulfidminerale.

4. Prøvetaking og analyse

- **Frekvens:** Eluatet (utlekkingsvannet) samles opp kontinuerlig i oppsamlingsflasken, men tas ut for kjemisk analyse hver 4. uke.
- **Måleparametre:** For hver prøvetaking måles som minimum:
 - pH og konduktivitet (EC).
 - Farge/utfellinger (visuell kontroll for jernhydroksider).
 - Det bør vurderes å utføre analyser også på følgende parametre: Sulfat, kalsium, aluminium, jern, sink, kadmium, kobber, nikkel og arsen.

Den største fordelen med IBC-forsøk er at testen bruker en større mengde prøvemateriale. Dette reduserer usikkerheter knyttet til representativitet i prøvematerialet. En annen fordel er at forsøkene står ute i vær og vind, og sørger slik for at testen «inkluderer» eventuelle samspillseffekter mellom temperatur, intensitet i nedbør, pH i regnvann og reaktivitet i prøvematerialet.

Metoden beskrevet under skiller seg fra den anvendt av Lindum i sine forsøk ved at regnvannet akkumuleres i tankene over en to ukers periode, fremfor å renne kontinuerlig ned i oppsamlingsflasker. Dette simulerer til en viss grad naturlige forhold med en varierende grunnvannsstand i områder med utfylte bergmasser. En mulig feilkilde i et slikt oppsett er at massene i bunnen av containeren kan ha en større påvirkning på kvaliteten på vannet som prøvetas. En fordel med denne metoden er at man kan bruke store fraksjoner med intakte overflater uten at regnvannet renner for fort av massene som skal undersøkes.

IBC-forsøk som beskrevet under krever en viss maskinell innsats og god tilgang til uttaksområder med gravemaskin og mini-dumper. Det bør i noen tilfeller vurderes å etablere slike forsøk i en mindre skala, som krever noe mindre mengder med prøvemateriale.

1. Prøvepreparering

- **Uttak av masser:** Prøvematerialet (1-2 m³) kan tas ut ved hjelp av en liten gravemaskin med pigghammer og fraktes til en rigg-plass med mini-dumper eller lignende. Massene bør plasseres på en robust pvc-membran for å sikre at finstoffet produsert ved uttaket i størst mulig grad blir med i forsøket.
- **Måling med håndholdt XRF:** For å dokumentere variasjonen og fordelingen av svovel i bergartene bør det utføres et større sett av XRF-målinger per prøvelokalitet (over 20 per lokalitet) og XRF-målingene bør gjøres på både forvitrete (omvandlet/rusten) og friske flater.
- **Fraksjonsstørrelse:** På rigg-plassen bør prøvematerialet knuses ned til en eller flere fraksjonsstørrelse(r) som er passende for forsøkene.



Figur 1. Måling av svovel-% med håndholdt XRF på rigg-plass.



Figur 2. Ferdig knust "mellom-stor" fraksjon klar for å legges i containere.

2. Oppsett

- **IBC-container:** Kasserte IBC-containerer med toppen skåret av, plasseres på euro-paller for enkel tilgang til kran og eventuell videre transport fra riggplass.
- **Filtrering:** For å forhindre utvasking av finstoff og tetting av utløp, plasseres et filter av glassfiber e.l. før utløpet av kran i bunnen av containerne.
- **Plassering av prøvemateriale:** Det preparerte prøvematerialet plasseres forsiktig i IBC-containerne. Merk at det er viktig å plassere det første prøvematerialet forsiktig i containerne, for å unngå at containerne sprekker i bunnen.

3. Gjennomføring

- Containerne plasseres på et egnet sted, slik at containerne står utsatt for vær og vind.
- En egen container for oppsamling av regnvann bør etableres på stedet. pH i regnvannet og mm nedbør i perioden bør noteres før hver prøvetaking.

4. Prøvetaking og analyse



Figur 3.. De første steinene bør legges forsiktig ned i containerne for å forhindre at plasten i bunnen sprekker opp.

- Containerne tømmes for vann hver andre uke. Før tømming av containerne må prøvetaking gjennomføres. For hver prøvetaking måles som minimum:
 - pH og konduktivitet (EC).
 - Farge/utfellinger (visuell kontroll for jernhydroksider).
 - Det bør vurderes å utføre analyser også på følgende parametere: Sulfat, kalsium, aluminium, jern, sink, kadmium, kobber, nikkel og arsen.

UTKAST