

GEOLOGI FOR SAMFUNNET
– KUNNSKAP FOR FRAMTIDA



NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE
- NGU -

NGU RAPPORT 2026.013

Syredannende bergarter i Lillesand –
Innledende kartlegging, pH-målinger og
geokjemiske analyser



NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE
- NGU -

NGU RAPPORT

Geologi for samfunnet – kunnskap for framtida

Norges geologiske undersøkelse
Postboks 6315 Torgarden
7491 Trondheim
Tlf. 73 90 40 00

Rapport nr: 2026.013

ISSN: 0800-3416 (trykt)

ISSN: 2387-3515 (online)

Gradering: Åpen

Tittel: Syredannende bergarter i Lillesand – Innledende kartlegging, pH-målinger og geokjemiske analyser

Forfatter: Anne Kathrine Svendby, Malin Andersson, Espen Torgersen, Kristine Glomsås Nymoen, Kristian Drivenes

Oppdragsgiver: Lillesand kommune

Fylke: Agder

Kommune: Lillesand

Kartblad: (M=1:250.000): Arendal

Kartbladnr. og -navn: (M=1:50.000): 1511-1 Lillesand, 1511-2 Høvåg,

Forekomstens navn og koordinater:

Sidetall:

Pris:

Feltarbeid utført: vår/sommer 2025

Rapportdato:

Prosjektnr: 409100

Ansvarlig: Tine Larsen Angvik

Emneord: Lillesand, syredannende bergarter, pH, XRF, LECO, sulfider, sulfidmineraler, geokjemi, forurensning, miljø, jarositt, deponering, bergmasser, omvandlingshud, overflateareal, vannrespienter, syredanningspotensial, syredanningsrate, omvandlingssone, ARD, jernhydroksidsulfatmineraler, metallutlekking, syredanningsprosesser

Sammendrag:

Syredannende bergarter er en stor utfordring i Lillesand kommune fordi sprengning i forbindelse med utbygging forårsaker spontan og langvarig forsurening av vannforekomster med toksiske konsentrasjoner av metaller. Til tross for strenge reguleringer oppstår det stadig nye miljøskader knyttet til boligprosjekter, næringsutvikling og infrastrukturutbygging. Statsforvalteren i Agder har derfor reist innsigelse i flere saker og kommunen har selv innført byggestopp i enkelte områder. Syredanningsproblematikken i Lillesandsområdet har vært kjent i flere tiår, så hvorfor blir ikke tilstedeværelsen av syredannende bergarter fanget opp i planprosessen? Hva er det som gjør at eksisterende veiledere i liten grad er tilpasset de syredannende bergartene i Lillesand?

I samarbeid med Lillesand kommune har NGU gjennomført innledende berggrunnskartlegging, pH-målinger og geokjemiske analyser for å etablere et representativt datagrunnlag for syredannende egenskaper, kvalitetssikre eksisterende berggrunnskart og forbedre forståelsen av de geologiske prosessene som styrer syredannelse i Lillesandområdet. Dette arbeidet danner kunnskapsgrunnlaget for beslutning om eventuelle videre undersøkelser og kartlegging i området.

Resultatene er basert på målrettet og detaljert feltkartlegging i utvalgte områder, utvidet bruk av håndholdt XRF i felt og detaljerte laboratorieanalyser på innsamlede bergprøver. Analysene består

av pH-målinger (NAG og Paste), lab-XRF, og LECO (total karbon, total organisk karbon og totalsvovel), samt lysmikroskopi og SEM-studier. Kombinasjon av feltarbeid og analyser viser at bergarter med størst syredanningspotensiale er paragneiser innenfor det såkalte Lillesandkomplekset. Disse bergartene var opprinnelig sedimenter (sand og leire) som senere har blitt omdannet til metasandstein, meta-arkose og glimmergneis. På eksisterende berggrunnskart over Lillesand kommune er disse kartlagt som udifferensiert båndgneis.

De syredannende bergartene i Lillesand har en karakteristisk og lett gjenkjennelig guldfarget omvandling på eksponerte bergflater, og spesielt på brudd- og foliasjonsplan. Selve bergartene inneholder oftest lite svovel (54 % av prøvene fra Lillesandkomplekset har < 0,2 % S), men enkelte lag, samt brudd- og foliasjonsplan med guldfarget omvandlingshud, kan være svært svovelrike (< 12 % S). Alle prøver gir lav NAG-pH (< 4,75), mens paste-pH varierer mer og viser to populasjoner – bergarter i Lillesandkomplekset gir hovedsakelig paste-pH < 6, mens resterende bergarter har paste-pH > 6.

Mineralogiske analyser viser tilstedeværelsen av både svovelkis og magnetkis, hvorav sistnevnte ofte er sterkt omvandlet. Disse sulfidene forekommer sammen med flere sekundære mineraler som jernhydroksidsulfatmineraler (jarositt, schwertmannitt mfl.), markasitt og elementært svovel. Det er de sistnevnte sekundærmineralene som gir bergarten den karakteristiske guldfargen på omvandlete flater, og som forårsaker den raske endringen i pH dokumentert ved paste-pH-målingene.

Den viktigste konklusjonen fra dette arbeidet er at tilstedeværelsen av tallrike sulfatførende brudd- og foliasjonsplan, enkelte svovelrike omvandlete lag og fravær av nøytraliserende mineraler gjør at bergmassen innenfor Lillesandkomplekset kan føre til utbredt og svært alvorlig 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 utsprengte bergmassene. Dette akselererer en rekke reaksjoner, blant annet oksidasjonen av sulfidmineraler og nedbrytningen av aluminiumførende mineral.

Berggrunnskartleggingen i dette arbeidet viser at eksisterende berggrunnskart har unøyaktigheter og feiltolkninger som gjør at de i liten grad er egnet for å lage aktsomhetskart for syredanning med tilfredsstillende kvalitet for bruk i arealplanlegging. Vi anbefaler derfor å gå videre med en ny kartlegging av berggrunnen i kommunen slik at man sikrere kan avgrense områder med potensielt syredannende bergarter fra områder som kan friskmeldes.

Innhold

1. Sammendrag for beslutningstakere og arealforvaltere	5
2. Innledning	6
2.1 Kort historikk	7
3. Berggrunnsgeologi	9
3.1 Hvilke bergartsenheter finnes innenfor Lillesand kommune?	9
4. Teori – kort om syredannende bergarter	13
4.1 Omvandling av sulfidmineraler	15
5. Metoder	17
5.1 Feltkartlegging	17
5.2 Håndholdt XRF	18
5.3 Paste-pH	18
5.4 Net Acid Generation pH (NAG-pH)	18
5.5 Lab-XRF analyser	19
5.6 LECO – TS, TC, TOC	19
5.7 Scanningelektronmikroskopi (SEM)	19
6. Resultat	20
6.1 Feltobservasjoner	20
6.2 Mineralogi og petrografi	26
6.2.1 Omvandling av sulfidmineraler	28
6.3 pH-målinger	31
6.3.1 NAG-pH	31
6.3.2 Paste-pH	33
6.4 Geokjemi	37
6.4.1 Håndholdt XRF	37
6.4.2 Lab-XRF	41
6.4.3 LECO – Totalsvovel (TS), Totalkarbon (TC) og Total Organisk Karbon (TOC)	43
7. Diskusjon	45
7.1 Sammenheng mellom svovel og pH	45
7.2 Klassifisering av syredannende bergarter i Lillesand kommune	46
7.2.1 NAG-pH versus Netto syredannende potensial (NAPP)	46
7.2.2 NAG-pH versus paste-pH	47
7.3 Hvordan identifisere de syredannende bergartene i Lillesandkomplekset?	48
7.3.1 Feltkarakter	49
7.3.2 Mineralogi og svovelopptreden	49
7.3.3 pH-karakter	49
7.3.4 Geokjemisk karakter	49
7.4 Modell for syredannelse fra bergarter i Lillesandskomplekset	50
7.5 Representativitet og analysemetoder	52
7.5.1 Prøvetaking	52
7.5.2 Representativitet i lab	53
7.5.3 Svovelanalyser	53
7.6 Syredanning i løsmasser	54
8. Konklusjoner og veien videre	55
9. Referanser	57
10. Vedlegg	59

1. SAMMENDRAG FOR BESLUTNINGSTAKERE OG AREALFORVALTERE

Bakgrunn og problemstilling

Syredannende bergarter er en vedvarende miljø- og planutfordring i Lillesand kommune. Inngrep som sprengning og masseflytting kan utløse spontan og langvarig forsuring av vannforekomster, med mobilisering av toksiske metaller og dokumenterte økologiske konsekvenser (bl.a. fiskedød). Kommunen har samtidig opplevd at temaet gjentatte ganger skaper usikkerhet i plan- og byggesaker, blant annet gjennom innsigelser fra Statsforvalteren og lokale begrensninger i utbygging der kunnskapsgrunnlaget ikke har vært tilstrekkelig.

Hva denne rapporten gir av nytte for arealforvaltning?

Rapporten etablerer et mer målrettet og stedstilpasset kunnskapsgrunnlag ved å kombinere feltkartlegging, pH-tester (paste-pH og NAG-pH) og geokjemiske/mineralogiske analyser. Dette gjør det mulig å:

- identifisere hvilke bergarter som typisk gir størst fare for syredanning,
- forklare hvorfor risiko kan undervurderes i tradisjonelle vurderinger, og
- peke på hvorfor eksisterende kart- og veiledningsgrunnlag ofte ikke er godt nok for planformål i Lillesand.

Hovedfunn – hvor ligger risikoen?

- Risikoberget er i hovedsak knyttet til paragneiser i “Lillesandkomplekset”, som består vesentlig av metasandstein, meta-arkose og glimmergneis/-skifer.
- Syredannende bergarter har ofte en karakteristisk gulfarget omvandlingshud på eksponerte flater – særlig langs brudd- og foliasjonsplan – som er et viktig felttegn.
- Svovelinnholdet i “frisk” bergart kan være lavt, mens omvandlet bergart vesentlig er svovelrik, noe som gjør at enkel prøvetaking lett kan undervurdere risikoen.
- pH-testene viser at bergartene i Lillesandkomplekset fører til rask eller spontan forsuring med paste-pH < 4 etter kun ett døgn.
- Syredanning i området styres ikke bare av sulfider, men også av sekundære sulfatmineraler som kan gi rask pH-senkning og akselerere videre reaksjoner og metallmobilisering.

Konsekvenser for plan- og byggesaker

- Risiko for forsuring kan være høy selv der svovelinnhold i enkelte prøver er lavt, fordi bergmassen inneholder reaktive mineraler og mangler bufferkapasitet.
- Sprengning og fragmentering øker reaktivt overflateareal og kan dermed øke syredanningshastighet og avrenningsproblemer.

Anbefalt praksis i arealforvaltningen

- Bruk feltindikatorer (gulfarget omvandlingshud) sammen med målrettet håndholdt XRF for å avgjøre om området krever videre utredning.
- Prøvetaking og håndholdt XRF-målinger må dekke hele bergmassens variasjon, inkludert omvandlingshud, brudd-/foliasjonsplan og svovelrike lag – ikke bare “frisk” bergart.

Veien videre – anbefaling i rapporten

Rapportens viktigste anbefaling er å gå videre med ny og mer detaljert berggrunnskartlegging som kan avgrense risikoområder bedre og samtidig “friskmelde” områder med lav risiko. Dagens kartgrunnlag har unøyaktigheter og er i sin nåværende form lite egnet som grunnlag for aktsomhetskart med den presisjonen arealplanlegging krever.

2. INNLEDNING

Syredannelse fra berggrunnen i Lillesand kommune fører til forsurening av vannforekomster, og medfører både akutte og langsiktige skadevirkninger. Vannprøver i bekker og grøfter som drenerer fra deponier med utsprenget bergmasser har dokumentert pH-verdier som ligger langt under naturlige bakgrunnsnivåer (NIVA, 1992, 2010, 2021). Fare for forsurening av vannet påvirker planleggingen av ny infrastruktur, boligområder og næringsutvikling, og reduserer de økologiske kvalitetene i kommunen. Årsaken til forsurening er den naturlige tilstedeværelsen av svovelførende mineraler i berggrunnen som ved tilgang på oksygen og vann produserer svovelsyre, senker pH-verdien i jord og vann og fører til mobilisering av metallioner. En slik syredanningsprosess forsterkes gjennom utbygging, hvor sprengning fører til en eksponentiell økning i overflateareal av bergmassen, og syredannende bergarter anses derfor som forurenset grunn (forurensingsforskriftens kapittel 2, Lovdata.no). Statsforvalteren i Agder har reist innsigelse til planlagte utbyggingsområder i Lillesand inntil berggrunnen er bedre kartlagt og utredet.

Selv om Lillesandregionen er kjent for sine syredannende bergarter, har det vært gjentatte hendelser med forsurening og økologiske kriser (Figur 1). Disse hendelsene gjenspeiler at forsureningspotensialet til bergartene ofte har blitt undervurdert. Mangel på konkrete geologiske og geokjemiske undersøkelser av de syredannende bergartene i Lillesand vanskeliggjør vurdering av risiko og skaper også usikkerhet om hvordan best deponere syredannende bergmasser ved utbygging. For å kunne forstå årsakene til forsurening, vurdere risiko og å gi kommuner et best mulig beslutningsgrunnlag, er det nødvendig med en systematisk undersøkelse og kartlegging av de syredannende bergarter.



Figur 1. Fiskedød i Moelva som følge av sur avrenning fra syredannede bergarter. Høy konsentrasjon av labilt aluminium er dødelig for anadrom fisk. Faksimile Agderposten 23.08.06.

Lillesand kommune tok kontakt med NGU i september 2024 med behov for geologisk kartlegging og berggrunnskart som best mulig differensierer mellom områder med høy risiko for syredannende bergarter og områder der bergartene kan friskmeldes. Et ettårig samarbeidsprosjekt (SYL – Syredannende berggrunn i Lillesand) mellom Lillesand kommune og NGU ble derfor igangsatt i mars 2025.

Målet med SYL-prosjektet har vært geologiske og geokjemiske undersøkelser av berggrunnen i Lillesand med fokus på syredannende bergarter, hvor data og resultater fra prosjektet skulle leveres som 3 produkter:

- Produkt 1 – Rapport med nøkkelresultater fra feltarbeid og analyseresultater fra innsamlede prøver (denne),
- Produkt 2 – Oppdatert berggrunnskart i NGUs kartdatabase (dersom nytt datagrunnlag tilsa det)
- Produkt 3 – Oppdatert aktsomhetskart (dersom nytt datagrunnlag tilsa det)

Det eksisterende geologiske kartgrunnlaget stammer fra 80- og 90-tallet (Målestokk 1:50.000; Starmer 1982, Padget 1993) og er ikke kartlagt med hensyn til syredannede bergarter, da dette ikke var noe tema på det tidspunktet. Et aktsomhetskart over risiko for sulfidsoner i Kristiansand og Lillesand ble utarbeidet på bestilling for Agder naturmuseum i 2009 (Frigstad, 2009). Aktsomhetskartet baserer seg på de eksisterende berggrunnskartene og er stedvis for konservativ og stedvis for unøyaktig for å tilfredsstille dagens behov for forutsigbarhet i arealplanlegging. Et nytt publisert geologisk kart over Kristiansand kommune (Torgersen m fl. 2025), med avledet kart over syredanningspotensialet, viser potensialet for å bedre skille mellom potensielt syredannende og friskmeldte områder.

Nøkkelresultater fra feltarbeid og analyseresultater fra innsamlede prøver beskrives i denne rapporten. Det er også en diskusjon om behov for videre geologisk arbeid i området, basert på SYL-prosjektet.

2.1 Kort historikk

Sur vannavrenning som følge av syredanning er dokumentert tilbake til 1980-tallet da utbygging ved Tingsaker og Svåbekk førte til fiskedød i Langdalstjønnen (NIVA, 1992). Problematikken fikk ny oppmerksomhet i forbindelse med forsuring forårsaket av utvidelse av Storemyr industriområde i 2005 og utbyggingen av ny E18 mellom Kristiansand og Grimstad fra 2006. Flere steder langs vegtraseen ble det utført lokal og detaljert kartlegging med hensyn til syredanning, med tilhørende rapporter av blant andre Statens vegvesen (2005, 2015, 2016), Norges geologiske undersøkelse (NGU; Bjerkgård & Nordgulen 2002, Tveten & Nilsson 2005), Norges geotekniske institutt (NGI, 2015, 2021), Hindar, A., 2012 og flere konsulentfirmaer (bla. Multiconsult 2020). Norsk institutt for vannforskning (NIVA) ble også involvert og publiserte flere rapporter om konsekvenser og effekt på vannmiljøet fra sulfidholdig berggrunn (NIVA, 2006, 2010, a,b, 2021).

Etter hvert som syredanning har skapt et betydelig miljøproblem i deler av regionen, har dette også ført til økt vitenskapelig oppmerksomhet og publisering av flere fagartikler (Hindar & Nordstrom, 2015, Hindar & Lydersen, E., 1994, Hagelia & Huizenga, 2025). Problematikken er også undersøkt i flere masteroppgaver (Karlsen, O.M.O., 2024, Skjønborg, I., 2023, Pearce, A., 2018,). Per Hagelia utga i 2023 et arbeid som sammenfatter kunnskap og analyseresultater fra tidligere års arbeid i SVV med syredannende bergarter (Hagelia mfl., 2023).

Flere håndbøker og veiledere for identifisering og deponering av syredannende bergarter har vært konsentrert om alunskifer og i liten grad om syredanning i gneiser (NGI 2015 a, b, 2021). Nyere studier viser at syredannende gneis i Agder reagerer på en annen måte enn alunskifer, og eksisterende regelverk og retningslinjer er derfor ikke godt nok tilpasset reaksjonsmønsteret til gneisene. En av nøkkelfaktorene er at svovelet i bergartene ikke bare forekommer i sulfidmineraler, men også i lett oppløselige jernhydroksidsulfatmineraler (Hagelia & Huizenga, 2025).

Agder fylkeskommune ved «Prosjektgruppen for kontroll på svovelholdig avrenning i Agder», valgte på grunn av mangel på egnede veiledere å lage en egen veileder med retningslinjer for tiltak i områder med syredannende gneis (Prosjektgruppen, Agder., 2021). Veilederen ble testet og var til god hjelp under det nå avsluttede kartleggingsprosjektet i Kristiansand (Svendby mfl., 2026). Det ble imidlertid funnet noen svakheter i veilederen, og spesielt ved bruken av «H₂O₂-metoden» for å avgjøre syredanningspotensiale. Karlsen (2024) dokumenterer tydelig begrensningene til denne metoden. I forbindelse med Kristiansandprosjektet ble flere andre metoder derfor testet, og det konkluderes med at enkle paste-pH tester er veldig effektive for å avsløre hvilke bergarter som kan forårsake akutt syredanning (Svendby mfl., 2026).

Det er etablert 5 permanente renseanlegg i Lillesand som følge av erfaring og konsekvenser fra utbyggingen av E18. Renseanleggene Stordalsbekken (Gaupemyr), Mannfalldalen og Urdevann er alle knyttet til utbyggingen av E18, mens Kjerlingland er forbundet med Agder Næringspark. I tillegg finnes Tjuholla/Engelshei lenger nord i kommunen. Det har tidligere vært etablert enkelte midlertidige renseanlegg i forbindelse med anleggsarbeid, men disse er ikke lenger aktive.

På grunn av et manglende, egnet geologisk kartgrunnlag og svakheter i eksisterende retningslinjer og regelverk med hensyn til syredanning, hadde Lillesand kommune behov for ny geologisk kartlegging og et oppdatert berggrunnskart, som best mulig differensierte områder med bergarter med syredanningspotensiale fra områder med friske, ikke syredannende bergarter. I tillegg har det vært et behov for en forbedret metodikk for påvising av mulig syredannelse, både i felt og ved senere analyser.

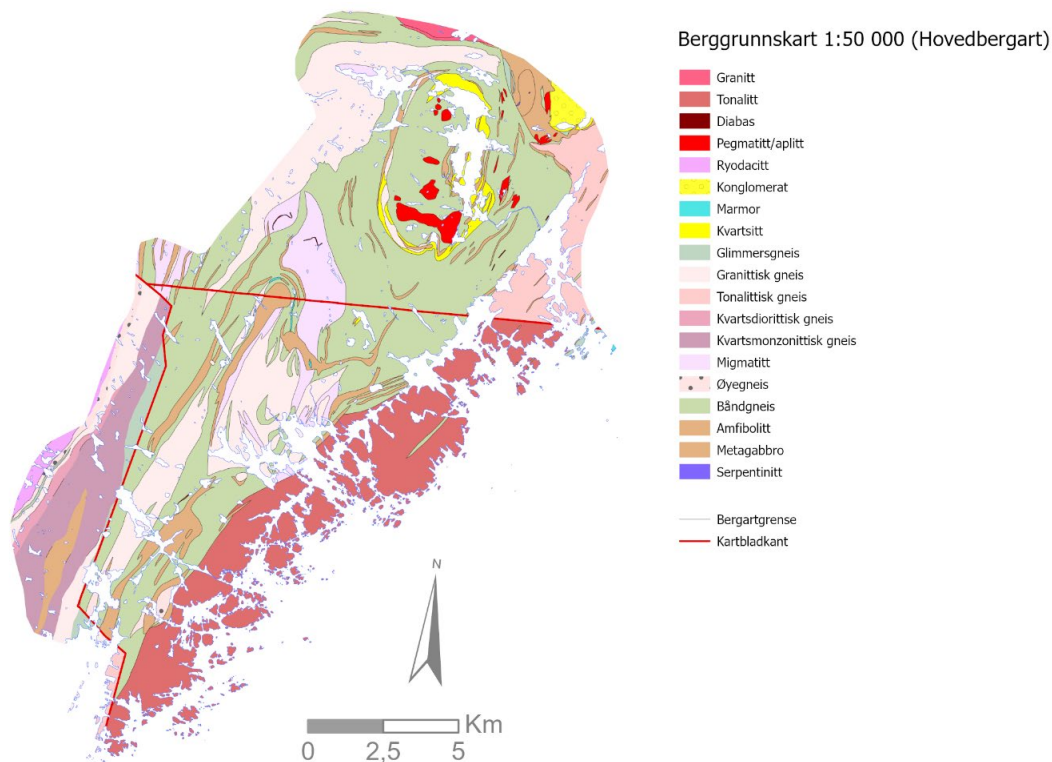
3. BERGGRUNNSGEOLOGI

Gneisene i Lillesandregionen er en del av det sørnorske grunnfjellet. For rundt 1500 millioner år (Ma) siden var dette grunnfjellet en del av kontinentet Fennoskandia. Over 1000 Ma tilbake i tid kolliderte Fennoskandia med et annet kontinent i vest. Denne kollisjonen presset landskapet opp og skapte den svekonorvegiske fjellkjeden, og dannelsen av superkontinentet Rodinia. Etter millioner av år med erosjon og forvitring er bare de dype røttene igjen av den svekonorvegiske fjellkjeden. Det er disse røttene som utgjør dagens grunnfjell i Sør-Norge. Grunnfjellet deles inn i 5 parallelle geologiske enheter fra øst mot vest. Hver av disse litotektoniske enhetene har sin egen geologiske utviklingshistorie og skilles fra hverandre av store svekonorvegiske skjærsoner. Bamble litotektoniske enhet, som gneisene i Lillesand er en del av utgjør den midtre av disse fem enhetene.

Alderen på gneisene i Bamble litotektoniske enhet er fra 1575 til 1150 Ma (Svendby m fl., 2026), og utgjøres av omdannede bergarter av både magmatisk (ortogneiser) og sedimentær opprinnelse (paragneiser).

3.1 Hvilke bergartsenheter finnes innenfor Lillesand kommune?

Berggrunnen i Lillesand kommune er kartlagt i flere etapper og dagens berggrunnskart består av data fra tre ulike kartprodukt (Starmer 1982, Padget 1993, Torgersen mfl., 2025). Rød strek med retning Ø–V viser kartbladgrensa mellom kartene fra 80–90-tallet, mens den røde streken som går SSV–NNØ på kartet viser kartbladkanten mellom det nye geologiske kartet over Kristiansand (i vest) (Torgersen m fl., 2025) og de eksisterende kartbladene over Lillesand. Det er viktig å merke at dette berggrunnskartet representerer kun hovedbergarter (Figur 2), og ikke viser syredannende egenskaper og potensiale. Syredanningspotensiale vises i avledede kart, også kalt aktsomhetskart, og vil være et resultat av feltobservasjoner, analyser i felt (håndholdt XRF), og lab-analyser (kapittel 5 og 6).



Figur 2. Berggrunnskart på lokalt nivå (målestokk 1:50 000) symbolisert etter hovedbergart. Legg merke til at utsnittet består av kartdata fra tre forskjellige kartprodukt, hvorav størstedel av Lillesand kommune er dekket av kart fra 80- og 90-tallet.

Bergartene i Lillesand utgjøres av flere typer gneis, med unntak av granitt (Herresfossganitten) og pegmatitt (Figur 2). Dannelsesalderen på gneisene som er til stede i Lillesand kommune er 1570–1340 Ma (Svendby m fl., 2026). Gneis er et fellesnavn for lagdelte, folierte bergarter som har gjennomgått høygradsømdanning (metamorfose) og duktil deformasjon, dvs. deformasjon på stort dyp og høy temperatur. Det finnes både orto- og paragneiser i Lillesand kommune. En ortogneis er en omdannet magmatisk bergart, mens en paragneis består av omdannede sedimentære bergarter. Deler av gneisene i Lillesand er også beskrevet som båndgneis, på grunn av tett veksling mellom mørke og lyse lag. En båndgneis kan inneholde lag av både sedimentær og magmatisk opprinnelse.

Ortogneisene utgjøres hovedsakelig av tonalitt og tonalittisk gneis i øst (mørk til lys rød; Figur 2), granittisk gneis i midtre og nordlige deler (lys rosa; Figur 2) og kvartsdiorittisk og kvartsmonzonittisk gneis i vest (lilla; Figur 2). I tillegg finnes det spredte soner av amfibolitt og metagabbro (brun; Figur 2).

Midtre deler av kommunen domineres av paragneis, som først og fremst er kartlagt som båndgneis (grønn; Figur 2). I tillegg finnes det mindre soner av kvartsitt, marmor og konglomerat. Paragneisene utgjør den viktigste bestanddelen av det såkalte Lillesandkomplekset og det er denne enheten som inneholder de høyeste konsentrasjonene av svovel. Paragneisene er derfor den viktigste gruppen av bergarter i Lillesand i forhold til både syredanningsproblematikk og utstrekning. På eksisterende berggrunnskart er bergartene i Lillesandkomplekset ofte betegnet som båndgneis på grunn av det båndete utseendet.

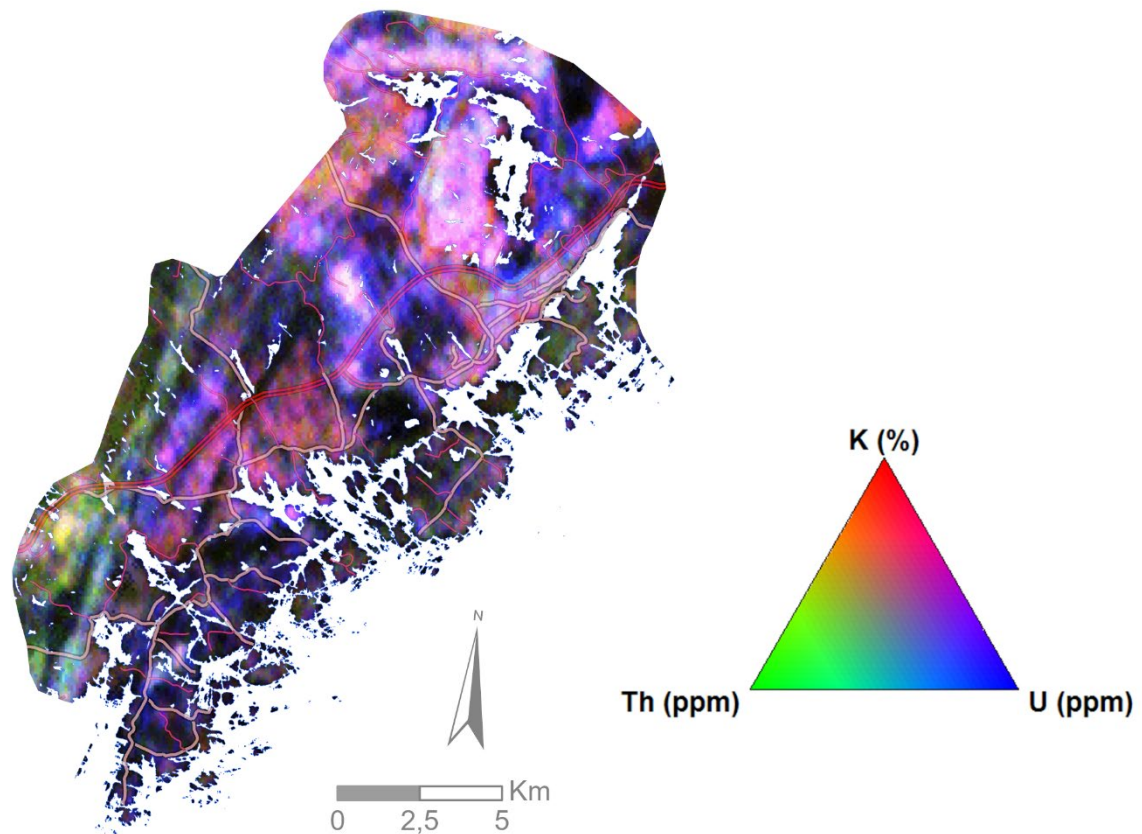
Enhetsnavn, forklaring

Kompleks benyttes når en bergartspakke består av en blanding eller samling av magmatiske, sedimentære og/ eller omdannede bergarter, der bergartene tilhører to eller tre av disse bergartstypene (Nystuen, J.P. 1986).

Suite benyttes når en bergartspakke består av en blanding eller samling av to eller flere litodem, der et litodem er en magmatisk bergart, eller en så sterkt omdannet bergart at de opprinnelige strukturene ikke er mulig å se (Nystuen, J.P. 1986).

Den samme variasjonen i bergarter gjenspeiles i grov målestokk i det radiometriske ternærkartet (Figur 3) som viser et tydelig skille mellom tonalittisk gneis i øst (svart), kvartsdiorittisk-kvartsmonzonittisk gneis i vest (grønnlig) og Lillesandskomplekset i midten (blålilla-rosa) sammen med granittisk gneis (rød). Områder med mye pegmatitt vises som hvite til lyserosa områder, slik som på Glamsland.

Lillesandkomplekset kan være en lateral ekvivalent av Rabbersvigkomplekset i Kristiansand (Svendby m fl., 2026), siden begge inneholder de samme bergartene, og dannelsesalderen er innenfor samme intervall. Det er ingen tydelig definert grense mellom de to kompleksene, men Lillesandkomplekset inneholder større mengder bergarter av sedimentær opprinnelse sammenlignet med Rabbersvigkomplekset.



Figur 3. Radiometrisk ternærkart med relativ overflatekonsentrasjon av de tre grunnstoffene kalium (K), thorium (Th) og uran (U). Mørke farger betyr lav konsentrasjon av alle tre, mens lyse betyr høy konsentrasjon. Kartet gjenspeiler i stor grad variasjonen i bergarter på grov målestokk. Legg merke til de mest lilla områdene, som ofte samsvarer med utbredelsen av spontant syredannende bergarter i Lillesand kommune. Datainnsamling og prosessering er beskrevet i Novatem (2017).

Tonalitt og tonalittisk gneis utgjør den østlige delen av berggrunnen i Lillesand kommune og omtales ofte som Justøytonalitten (Figur 2). Tonalitt er kvarts og feltspatit, og dannet av felsisk steinsmelte. I Lillesand og Kristiansandområdet ble tonalittene senere deformert, foliert og omdannet til tonalittisk gneis i forbindelse med den svekonorvegiske fjellkjededannelsen. Nyere studier og analyser har vist at bergarter kartlagt som tonalitt sørøst på kartfiguren (Starmer, 1982) også er tonalittiske gneiser, og har samme dannelsesalder (1575-1505 Ma), omdannings og deformasjonshistorie som enhetene lenger nord. Kvartsmonozonittisk og kvartsdiorittisk ortogneis i vest er beskrevet som Frikstadsuiten, og er omgitt av ortogneis tilhørende Rabbersvigkomplekset på Kristiansandkartet (Torgersen mfl. 2025). Bergartene er dannet fra en intermediær sammensatt magmatisk smelte (moderat felsisk, moderat mafisk). Siden bergartene i Frigstadsuiten (1340-1325 Ma) er yngre enn bergartene i Rabbersvigkomplekset (1575-1340 Ma), er de tolket til å ha intrudert bergartene Rabbersvigkomplekset før den svekonorviske fjellkjededannelsen fant sted.

Båndgneis utgjør hoveddelen av kartet (Figur 2). Båndgneis er deskriptivt, og benyttes om bergarter karakterisert av en tydelig lagdeling (bånding) av mørkere og lysere lag, hovedsakelig med veksling på dm-skala. Forskjellige lag kan bestå av både opprinnelige magmatiske og sedimentære bergarter (protolitter). Analyser og studier av båndgneisene i Lillesand har vist at de stort sett utgjøres av opprinnelig kontinentalt avsatte sedimenter (sand, leire, osv), som i det følgende også omtales som paragneiser, med en avsetningsalder mellom 1500 til 1340 Ma (Svendby mfl., 2026). Lagene består hovedsakelig av vekslende cm til m-tykke lag av

glimmer(gneis), omdannet sandstein, kvartsitt og ganger av kvarts, aplitt og pegmatitt. Gangene er parallelle med lagning og foliasjon.

Glimmerlagene i båndgneis domineres av mineralene muskovitt og biotitt som vanligvis er omdanningsprodukter av leirmineraler, men som også kan dannes som en følge av reaksjoner mellom mineralene feltspat og amfibol og kvartsmineraler, og er karakteristisk for opprinnelig sedimentære avsetningsbergarter som er omdannet ved høyt trykk og temperatur. Feltobservasjoner og kjemiske analyser har dokumentert at sandsteinslagene avhengig av feltspat og kvartsinnhold kan deles inn i arkoser i tillegg til sandstein. Svovelholdige mineraler (svovelkis og magnetkis) finnes i både omdannet sandstein og arkose, og beskrives nærmere i kapittel 5 og 6. Kjemiske analyser av paragneiser i Rabbersvigkomplekset lenger sør, viser at noen av sandsteinene er omdannede gråvacker (feltspatrik, dårlig sortert sandstein med små korn av leire), og mest sannsynlig er dette tilfelle også i Lillesand.

Horisonter og lag av kvartsitt og marmor, og konglomerat lengst i nord, er skilt ut som egne enheter (Figur 2). Marmor indikerer en omdannet svært kalkrik bergart. Kvartsitt har et svært høyt innhold av kvarts, og er i likhet med konglomerat, karakteristisk for omdannede kontinentalt avsatte sedimenter. Dette innbefatter at alle omdannede sedimentære bergarter i Lillesandkomplekset er kontinentalt avsatt, men at enkelte lag har så stor utbredelse og mektighet at de kan skilles ut som egne enheter, i motsetning til i båndgneisene der lagene veksler på cm til m-skala.

I båndgneisene er det også lateralt utholdende horisonter av de mafiske bergartene amfibolitt og metagabbro. I Rabbersvigkomplekset lengre sør har tilsvarende mafiske bergarter en dannelsesalder på 1550 Ma. Tilstedeværelse av mafiske bergarter er tolket som at deler av Rabbersvigkomplekset opprinnelig ble dannet som en sekvens av mafiske magmatiske og vulkanske bergarter i denne perioden. En slik tolkning passer også for de mafiske bergartene i Lillesandkomplekset.

Granittisk – granodiorittisk gneis (ortogneiser) og migmatitt er også skilt ut som egne enheter. Sannsynligvis er de dannet omtrent samtidig som tilsvarende gneiser i Kristiansand (1575–1505 Ma). Granitt og granodioritt dannes av felsisk magmatisk smelte, på samme måte tonalitt, og er sannsynligvis dannet i samme tidsintervall. Migmatitt betyr at bergarten har vært dypt nede i jordskorpa, og blitt omdannet under så høyt trykk og høy temperatur at den er delvis oppsmeltet. Opprinnelsesbergartene kan være både magmatiske og sedimentære, og er vanskelig å identifisere. Migmatitter er gjerne svart- og hvitstripet, og foldet som følge av plastisk deformasjon.

Måten de lateralt utholdende horisontene med amfibolitt og gabbro er foldet på (Figur 2), viser at bergartene i Lillesand er foldet i regionale, tette folder, med foldeflanker og akseplan orientert NØ–SV (Figur 2). Marmor, kvartsitt og båndgneis viser det samme foldemønsteret, Foldemønsteret er ikke like tydelig i de granittiske gneisene og migmatittene, men kartet viser at orienteringen er NØ–SV, altså likt med flankene på foldene.

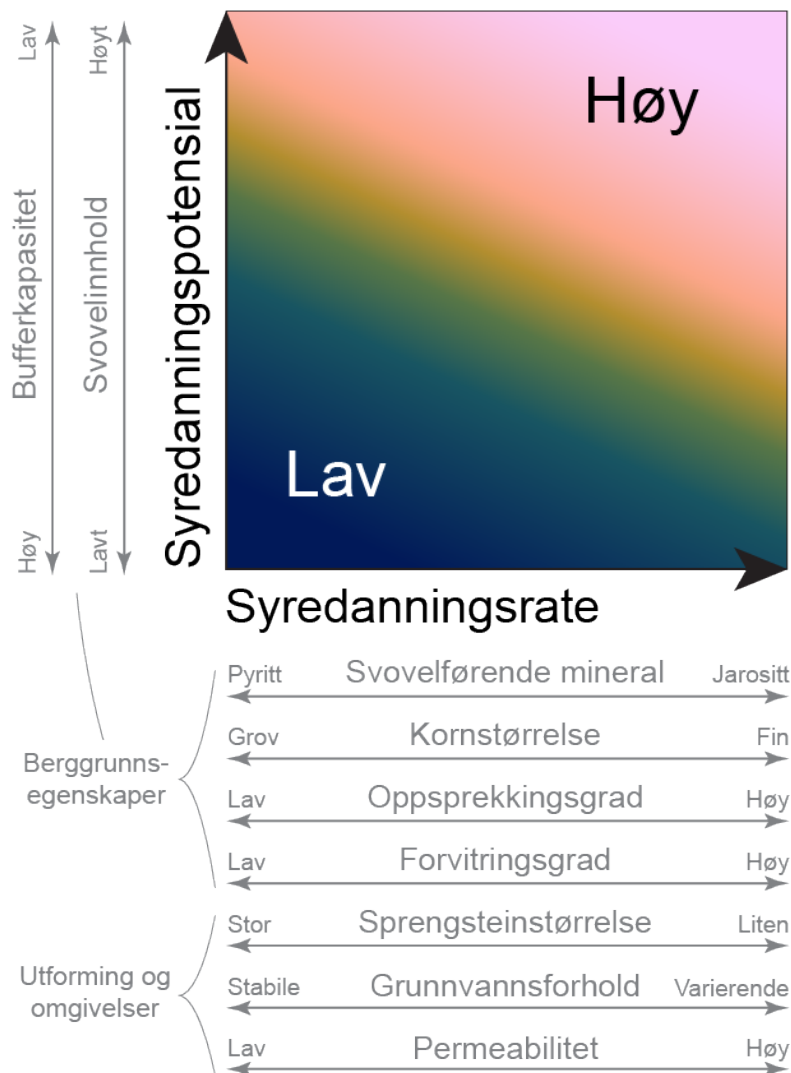
NØ–SV orientering av folder og bergartsgrenser viser at alle bergartene har vært gjennom samme fase med duktil deformasjon og folding, men ikke alle enhetene har blitt foldet like lett på grunn av bergartenes evne (forskjell i kompetanse) til å bli deformert. Foldemønster og NØ–SV orientering av lag og strukturer er karakteristisk for innskyvningen av den svekonorvegiske fjellkjededannelsen som fant sted for 1000 Ma, og at alle bergartene i Lillesandområdet gjennomgikk duktil deformasjon.

4. TEORI – KORT OM SYREDANNENDE BERGARTER

Berggrunnen kan føre til forsuring av nærliggende vannresipienter (innsjøer, elver) dersom bergartene inneholder svovel som i kontakt med vann og luft danner svovelsyre. Dette produktet er internasjonalt kjent som «Acid rock drainage – ARD» og prosessen drives hovedsakelig av oksidering av sulfidmineraler, selv om oppløsning av jernhydroksidsulfatmineraler også kan være viktig i enkelte områder. Det er ikke målsetningen for denne rapporten å gi en detaljert beskrivelse av de nevnte prosessene, som er godt beskrevet andre steder (se f.eks. <https://gardguide.com/>). Oksidering og oppløsning av svovelholdige mineraler beskrives nærmere i kapittel 0.

Det er likevel relevant å forklare et viktig forhold som har betydning for syredanningsprosessen i Lillesandsområdet. Graden av forsuring fra berggrunnen er kontrollert av to hovedmekanismer: syredanningspotensial og syredanningsrate (Figur 4; Torgersen mfl. 2024). Syredanningspotensialet er hovedsakelig definert av svovelinnholdet i berggrunnen. Dersom det ikke er svovel til stede, er det heller ikke noe potensiale for syredanning. Syredanningspotensialet kan bli regulert av bergartens eller det omkringliggende miljøets bufferkapasitet, som skapes av tilstedeværelsen av lettløselige nøytraliserende mineraler, i hovedsak karbonatmineraler.

Grad av forsuring fra berggrunnen

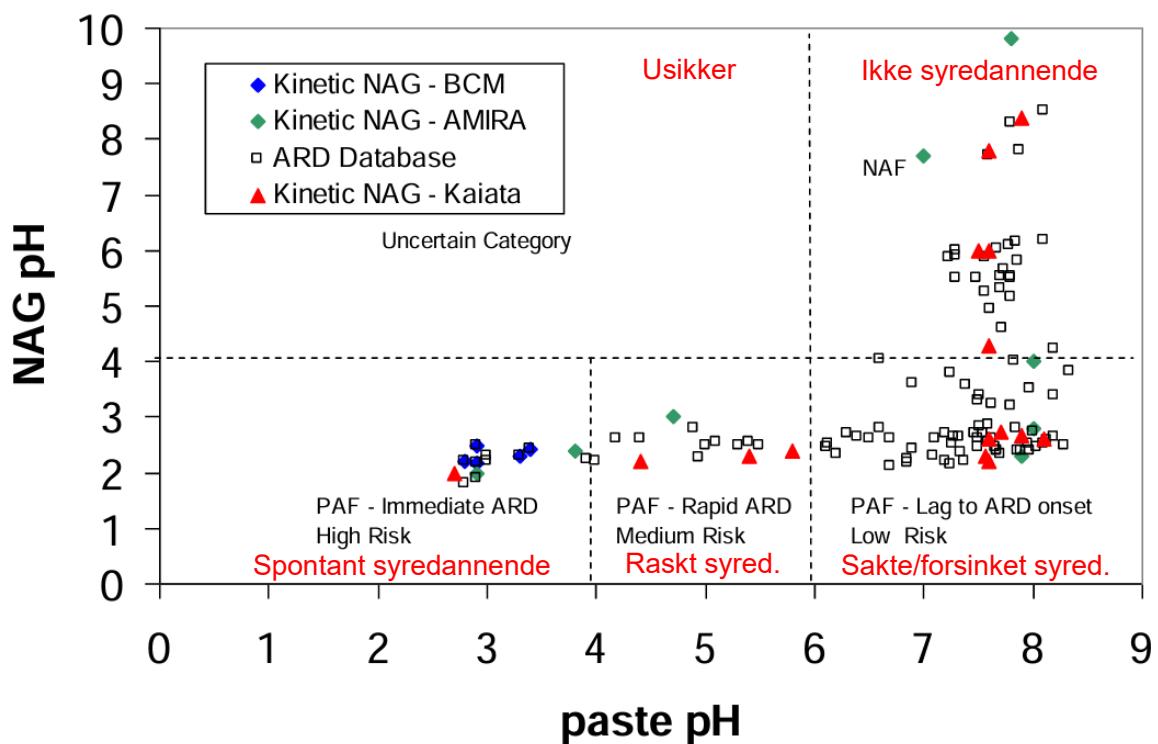


Figur 4. Konseptuell fremstilling av hvordan forsuring fra berggrunnen styres av to hovedmekanismer: syredanningspotensial og syredanningsrate (fra Torgersen mfl., 2024).

Det er likevel slik at en bergart med høyt syredanningspotensial gir mer og raskere forsuring av nærliggende vannresipienter enn en bergart med lavere syredanningspotensial. Dette er fordi graden av forsuring også er avhengig av hvor hurtig svovelsyre blir produsert – syredanningsraten. Det er flere faktorer som kontrollerer raten, hvorav de antatt viktigste er mineralogi, kornstørrelse og overflateareal (f.eks. størrelsen på sprengsteinen; Figur 4).

I tillegg til disse faktorene er graden av forsuring også avhengig av de relative størrelsene av vannresipienten mot bergmassens overflateareal – en stor elv vil bli mindre påvirket enn en liten bekk fra samme bergmassedeponi, ettersom vannet fortynner syren som dannes fra bergmassen.

Mens syredanningspotensialet relativt enkelt kan bestemmes eller beregnes ved kjemiske analyser, er det vanskeligere å forutse syredanningsraten fordi det er mange flere faktorer som påvirker denne (Figur 4). Paste-pH, hvor pH måles kort tid (<24t) etter at knust bergart blandes med destillert vann (avsnitt 5.3), er en enkel metode for å kvantifisere den umiddelbare syre-base-reaktiviteten til en bergartsprøve (Weber mfl., 2006). Selv om denne metoden ikke tar hensyn til alle faktorene som kan påvirke syredanningsraten (Figur 4), avslører paste-pH om det finnes reaktive syredannende mineraler (f.eks. jernhydroksidsulfater som jarositt og schwertmanitt; avsnitt 0) til stede i prøvematerialet. Ved å bruke klassifiseringsdiagrammet til Weber mfl. (2006; Figur 5) kan man klassifisere prøvene som «sakte/forsinket syredannende» ved paste-pH > 6, «raskt syredannende» når paste-pH er mellom 4 og 6, og «spontant syredannende» ved paste-pH < 4 (Figur 5).



Figur 5. NAG-pH versus paste-pH klassifiseringsdiagram fra Weber mfl. (2006). Modifisert med norske begrep i rødt. Klassifiseringen av «spontant», «raskt» og «sakte» syredannende brukes konsekvent gjennom hele rapporten.

4.1 Omvandling av sulfidmineraler

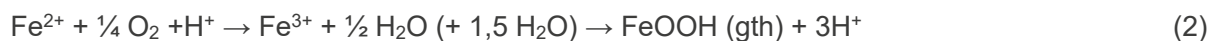
Svovel foreligger i bergarter hovedsakelig som sulfidmineraler (f.eks. svovelkis/ «pyritt» og magnetkis/ «pyrrhotitt»). Sulfidmineraler er ikke termodynamisk stabile ved jordens overflate hvor forholdene normalt er oksiderende (tilgang på O₂ og vann) og de vil omvandle.

Omvandling av sulfidmineraler skjer gjennom oksidasjon der O₂ oksiderer jern og/eller svovel, og resulterende Fe³⁺ fungerer som en videre oksidasjonsreagent. Omvandling kan også skje via oppløsning i sure væsker, og ofte i en kombinasjon av oksidasjon og syreløsning. Den observerte omvandlingen skjer stegvis, og kan observeres i definerte soner. De ulike omvandlingsreaksjonene og soneringen reflekterer varierende redoks- og pH-forhold, eller mengden av vanngjennomstrømming. De to vanligste jernsulfidene, svovelkis og magnetkis, reagerer etter de samme prinsippene, men har ulik stabilitet under varierende pH- og redox-forhold (Figur 6B).

Magnetkis er stabilt ved mer reduserende forhold og nøytral til basisk pH. Svovelkis er mindre sensitiv for pH-variasjoner. Magnetkis kan enten oksideres til markasitt (reaksjon 1), eller løses opp og felles ut som gedigent svovel eller goethitt (reaksjon 2–4).



Oppløst jern kan videre oksideres til Fe³⁺ og felles ut som jernhydroksid eller -oksyhydroksid. I vårt tilfelle er goetitt mineralet som blir dannet etter reaksjonen:



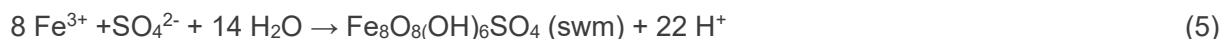
Denne prosessen trenger ikke gå via markasitt, og en ren oksidasjon av magnetkis til goetitt og svovelsyre er mulig.



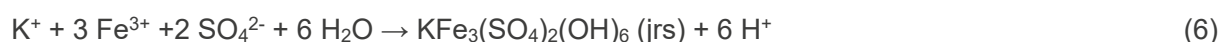
Ved tilstrekkelig lav pH, vil magnetkis bli nedbrutt til gedigent svovel i stedet for å bli løst som sulfationer. Ved slike forhold vil heller ikke Fe³⁺ felle ut som hydroksider, og forsterke oksidasjonen av svovel. Omvandling av magnetkis til gedigent svovel kan forklares med den forenklete reaksjonen:



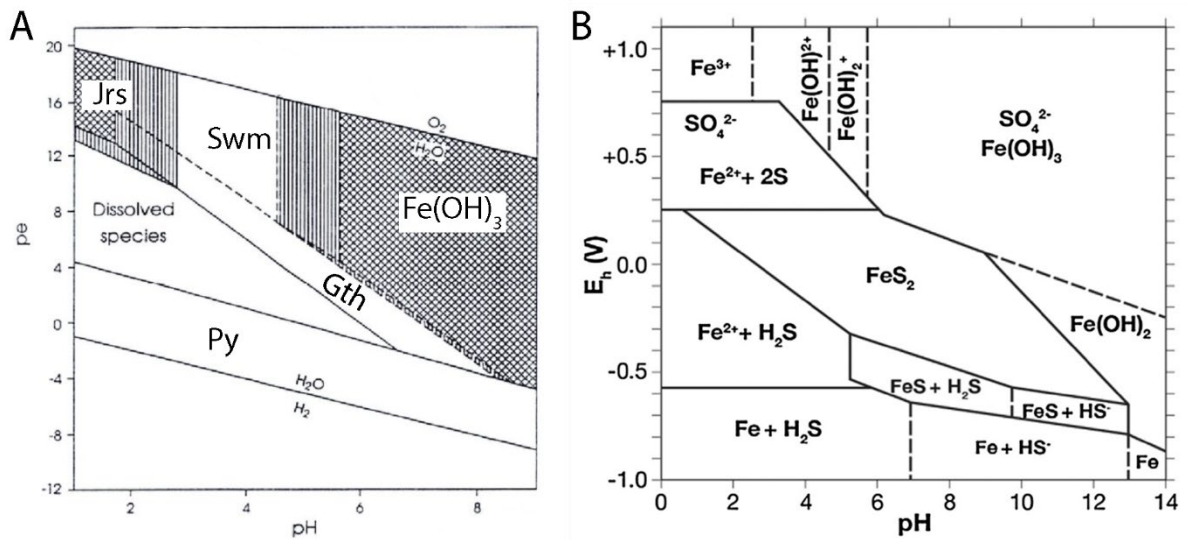
Schwertmannitt [Fe₈O₈(OH)₆SO₄] og jarositt [KFe₃(SO₄)₂(OH)₆] blir dannet etter lignende reaksjoner, der sulfidmineraler blir løst opp, og jern og svovel blir oksidert. Schwertmannitt blir felt ut etter reaksjonen:



Schwertmannitt felles hovedsaklig ut i pH-området 2,5–4,5 (Figur 6B). Ved lavere pH og tilgjengelighet av K⁺-ioner i løsnings som et resultat av nedbryting av K-feltspat (KAlSi₃O₈) og/eller biotitt [K(Fe,Mg)₃AlSi₃O₁₀(OH)₂], kan jarositt felles ut, eller schwertmannitt omdannes til jarositt gjennom reaksjonene:



Både K-feltspat og biotitt nedbrytes hurtigere ved lav pH, og de syredannende reaksjonene er selvforsterkende.



Figur 6. A: Forenklet Pourbaixdiagram i Fe-S-K-O-H-systemet som viser stabilitetsfeltene til jarositt, schwertmannitt, goethitt, ferrohdyritt, og svovelkis. Stripete områder markerer variasjon av stabilitetsgrensene avhengig av fluidkjemi. Diagrammet er forenklet fra digrammet i Bigham m.fl (1996). B: Pourbaixdiagram i FeS₂-H₂O systemet. Fra Kocabag (1990).

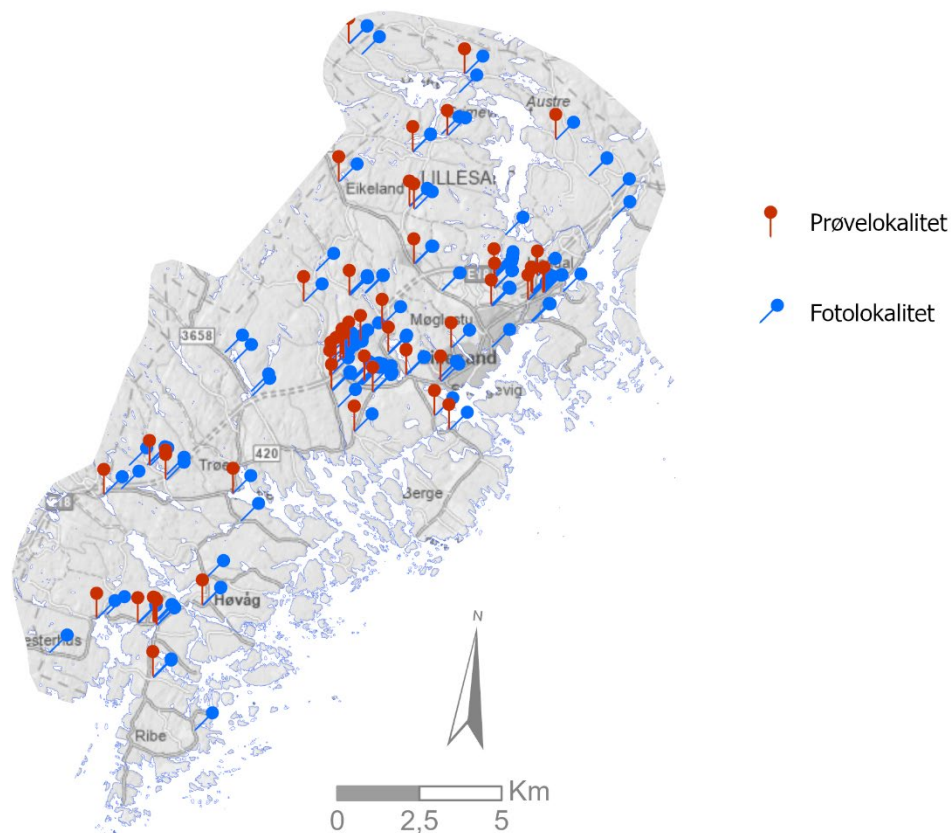
5. METODER

5.1 Feltkartlegging

Undersøkelser i felt ble gjennomført i løpet av 5 dager og hadde tre målsetninger: 1) fremskaffe et representativt datasett av feltmålinger og prøver over Lillesand kommune, 2) fokusere spesielt på områder med antatt syredannende bergarter og 3) kontrollere hvorvidt eksisterende berggrunnskart er i overensstemmelse med utbredelsen av syredannende bergarter.

Feltarbeidet var derfor konsentrert om lokaliteter med karakteristisk gul til gulbrun omvandlingsfarge og omvandlingshud, helst skjæringer som ikke var for gamle innenfor utvalgte områder, og hvor syredanning har skapt eller skaper problemer. Lokaliteter uten denne omvandlingsfargen ble vektlagt i mindre grad, men ble kartlagt som referanse for syredanningspotensiale, og for å kontrollere hvorvidt eksisterende berggrunnskart stemte overens med nye observasjoner. Det ble også tatt noe hensyn til områder av interesse for fremtidig utbygging i kommunen.

All kartlegging ble utført i par og til sammen 106 lokaliteter ble beskrevet (Figur 7). Feltobservasjoner og målinger ble dokumentert med NGUs digitale berggrunnsobservasjons-database i ESRI FieldMaps på håndholdte enheter (nettbrett eller telefon). For hver lokalitet ble følgende dokumentert: a) berggrunnen beskrevet etter beste evne, b) hovedbergart, basert på NGUs hovedbergartliste, c) orientering av foliasjon, d) foto av blotning og evt. viktige detaljer, e) målinger med håndholdt XRF (Avsnitt 5.2) og beskrivelse av den målte flaten/bergarten. Ved de fleste lokaliteter ble det også samlet inn prøvemateriale (håndstykker) for videre analyser i lab (n = 65, Figur 7).



Figur 7. Oversikt over prøve- og fotolokaliteter.

Radiometriske ternærkart (Figur 3) over Lillesand ble benyttet som bakgrunnsdata i tillegg til eksisterende berggrunnskart. For å få et best mulig grunnlag for datasettet, ble feltkartleggingen konsentrert om større, relativt ferske blotninger hvor det var indikasjon på syredannelse. Andre bergarter ble også kartlagt som referansegrunnlag.

Begrepsforklaring omvandling/omdanning/forvitring:

I denne rapporten benyttes konsekvent begrepet «**omvandling**» for å beskrive mineralogiske endringer i bergarten som følge av reaksjoner med væsker ved lave temperaturer (< ~150 °C). Begrepet «**forvitring**», som kan omfatte fysisk/mekanisk, kjemisk eller biologisk forvitring, er unngått fordi det ofte fortolkes (feilaktig) som en overflatenær endring som nylig har inntruffet (mao. etter siste istid), mens omvandlingen observert i Lillesand kommune kan være mye eldre. «Omvandling» er derfor en mer nøytral beskrivelse av fenomenet. Begrepet «omvandling» må samtidig ikke forveksles med «**omdanning**», som beskriver mineralogiske endringer som følge høy temperatur og trykk (metamorfose).

5.2 Håndholdt XRF

Prosjektet utførte systematiske analyser av prosjektprøvene ved bærbar XRF i felt. Alle analyser ble utført med håndholdt røntgen fluorescens (XRF), instrumenttype NITON XL5 Plus med røntgentube Ag anode (6-50kV, 0-500uA, 5W max) og metode Mining (vanlig å bruke ved fastfjellsanalyser). Instrumentet ble forhåndsinnstilt for å minimere analysetiden i felt, der analysen ble fokusert på svovelinnhold. Analysen var innstilt på 5 sek per filter (Main, High, Low) og 30 sek på filter for svovel (Light). Alle målinger er gjennomført på tørre prøver og ved overvåking for å være sikker på at skanningen har brukt alle filter på instrumentet for å få så bred elementsammensetning (spektral bredde) som mulig. Avslutning av måling ble gjort manuelt, den gjennomsnittlige analysetiden var 40 sekunder. På lokalitetene ble det gjort omtrentlig like mange analyser på frisk bergart, «omvandlingshud» og sprekkeplan. Analysene som ble gjort på pressede XRF-tabletter i lab, hadde en gjennomsnittlig analysetid på to minutter.

De fremste begrensningene ved analyser av bærbar XRF er høye deteksjonsgrenser, lite analyseareal (8 mm spotstørrelse) og overflateanalyse (Hagelia og Fjermestad, 2016). Det avgrensede analysearealet er særlig begrensende der bergarten er grovkornet, og få mineralkorn blir analysert om gangen. Det faktum at analysen kun analyserer overflaten av bergarten, kan gi et skjevt bilde hvis analysen blir gjort på en bergart der svovelomvandling har skjedd på overflaten.

5.3 Paste-pH

Paste-pH-analyser ble utført på samtlige 65 prøver i dette prosjektet for å bestemme det umiddelbare til raske syredanningspotensiale i bergartene. Metoden for analysing av paste-pH brukt i dette studiet er tilpasset den bredt anvendte «acid mine drainage»-metodikken (AMIRA International, 2002), der prøven kun måles for pH én gang (etter et døgn). Vi videreutviklet denne metoden ved å se på pH-utviklingen over lengre tid (etter én uke, én måned og 6 måneder). Alle prøveresultat presentert i denne rapporten startet med et én-til-én-vektforhold mellom knust bergart (<1 mm kornstørrelse) og destillert vann. I noen tilfeller hvor pH-målinger ble utført etter lengre tid, rakk vannet å fordampe noe, slik at glassene måtte få tilsatt mer destillert vann (opptil 50 ml).

5.4 Net Acid Generation pH (NAG-pH)

Pulverisert materiale preparert for XRF-analyser ble anvendt i NAG-pH testene i denne studien. For å analysere NAG-pH ble 2.5 g pulverisert prøvemateriale blandet med 250 ml 15 % H₂O₂ (hydrogenperoksid) i et 1000-ml-glassbeger. Blandingen ble deretter satt under et avtrekksskap i

fem timer i romtemperatur. Noen prøver viste tegn på oksidering allerede under disse forholdene, men ikke alle. For å fremskynde oksidasjonsprosessen ble glassbegerne etter hvert satt to timer i vannbad (80–90 °C). Etter to timer i vannbad ble prøvene i glassbegerne tatt ut og satt til avkjøling over natten i romtemperatur, hvor de den påfølgende morgenen kunne måles for NAG-pH. Instrumentet som ble brukt for måling av NAG-pH var en Mettler Toledo Seven Easy S20 pH-måler.

5.5 Lab-XRF analyser

Bergartsprøvene ble knust i en kjøftknuser og prøvene ble splittet for homogenisering. En splitt ble videre pulverisert i agatmølle. Det pulveriserte materialet ble brukt videre til XRF-analyser samt NAG-pH. XRF-analysene ved NGU bestemmer hovedelementene (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , MnO , K_2O , Na_2O og P_2O_5) samt utvalgte sporelementer: Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, V, Zn og Zr. For disse blandes 0,6 gram pulverisert prøve, som først glødes ved 1000 °C med 4.2 g litiumtetraborat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) og smeltes til en perle som analyseres. I tillegg analyseres følgende sporelement: Ag, As, Ba, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cu, F, Ga, Hf, La, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Sn, Sr, Th, U, V, Y, Zn og Zr ved at 9,6 g prøvemateriale blir presset sammen med 2,4 g voks til en tablett som så blir analysert. Analyseinstrument: PANalytical Axios 4 kW XRF røntgenrør.

5.6 LECO – TS, TC, TOC

Prosjektet har utført systematiske analyser av total svovel og karbon, for alle de prøver som ble analysert for uorganiske grunnstoffer, ved bruk av LECO. Analysen bruker omtrent 0.5 gram møllet materiale. Uorganisk karbon ble først fjernet fra prøvene ved å bruke fortynt HCl (1 HCl: 9 H₂O) og deretter skyllet og tørket. Prøvene ble brent ved ca. 1350°C og mengden CO₂ og SO₂ ble påvist ved bruk av svovel/karbon-determinatoren LECO SC-632.

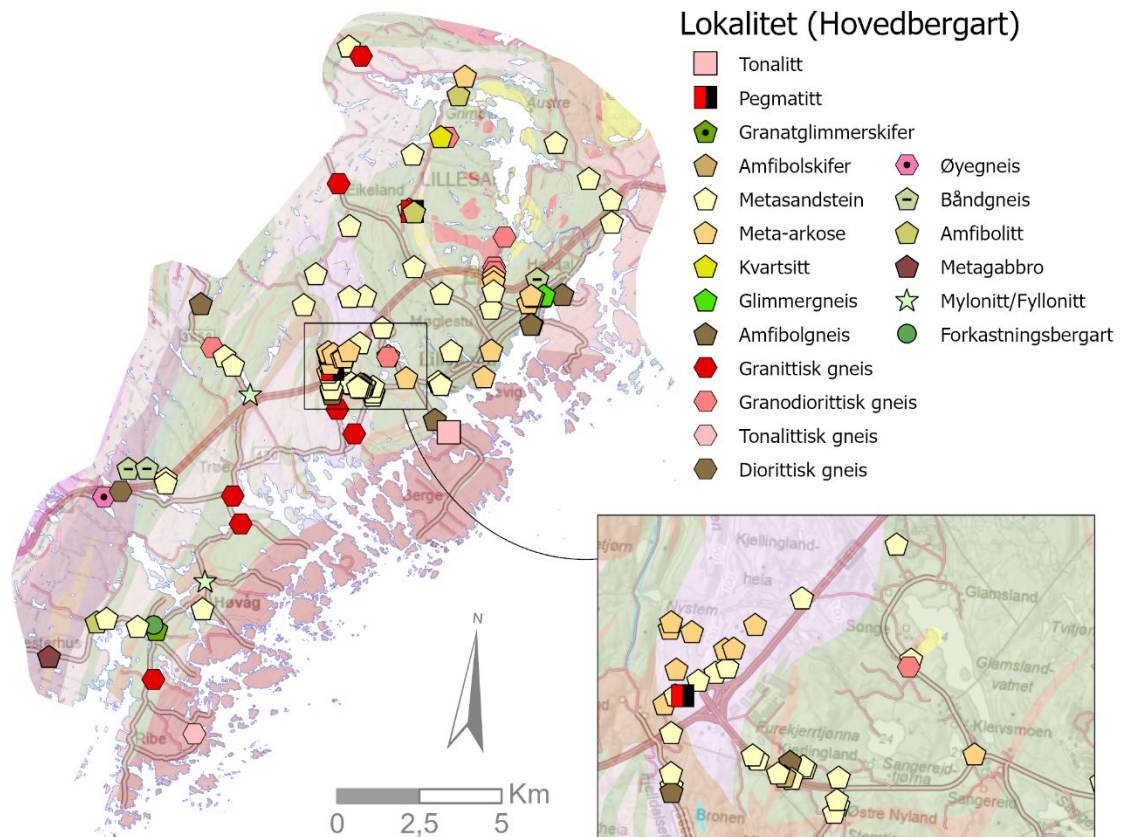
5.7 Scanningelektronmikroskopi (SEM)

Semikvantitative SEM-EDS-analyser (Scanning electron microscopy – Electron Dispersive X-ray Spectrometry) ble gjennomført på et Zeiss GeminiSEM 460 elektronmikroskop utstyrt med to Oxford Ultimax 65 EDS-detektorer. Alle observerte mineraler ble analysert for grunnstoff mellom O og U. Postprosessering for optimal kvantifisering og korrigerende av falske og overlappende røntgentopper ble gjort i Oxford Aztec 5.1. Elektronmikroskopet ved NGU er ikke optimalisert eller kalibrert for nøyaktige oksygenanalyser, og oksygen ble beregnet støkiometrisk, foruten i jernoksider og -hydroksider, samt sulfater, der det målte molforholdet mellom O og Fe eller S ble brukt til mineralidentifisering. Akselerasjonsspenning var satt til 15 kV, og elektronstrålestrøm varierte mellom sesjoner, vanligvis mellom 1-5 nA. Alle punktanalyser kjørte til det totale antall tellinger var 500000, noe som gir typiske deteksjonsgrenser mellom 0,3 og 1 vekt%, avhengig av grunnstoff og mineral. Verifisering av mineral som vanskelig kan skilles basert på kjemi, for eksempel svovelkis og markasitt (FeS_2), og goetitt og lepidokrositt (FeOOH), ble gjort med Ramanspektroskopi på NTNU.

6. RESULTAT

6.1 Feltobservasjoner

Feltkartlegging viser en stor variasjon i bergarter, som i grove trekk samsvarer med eksisterende berggrunnskart, men som i detalj viser at det er tydelige forskjellene (Figur 8). Tross et begrenset antall observasjoner relativt til størrelsen av Lillesand kommune, så er det klart at det eksisterende kartgrunnlaget har unøyaktigheter og feilklassifiseringer som reduserer bruksverdien av kartet. I det innsette kartet over Legdene–Glamsland (Figur 8) vises et eksempel på dårlig samsvar mellom ny kartlegging og eksisterende kart.



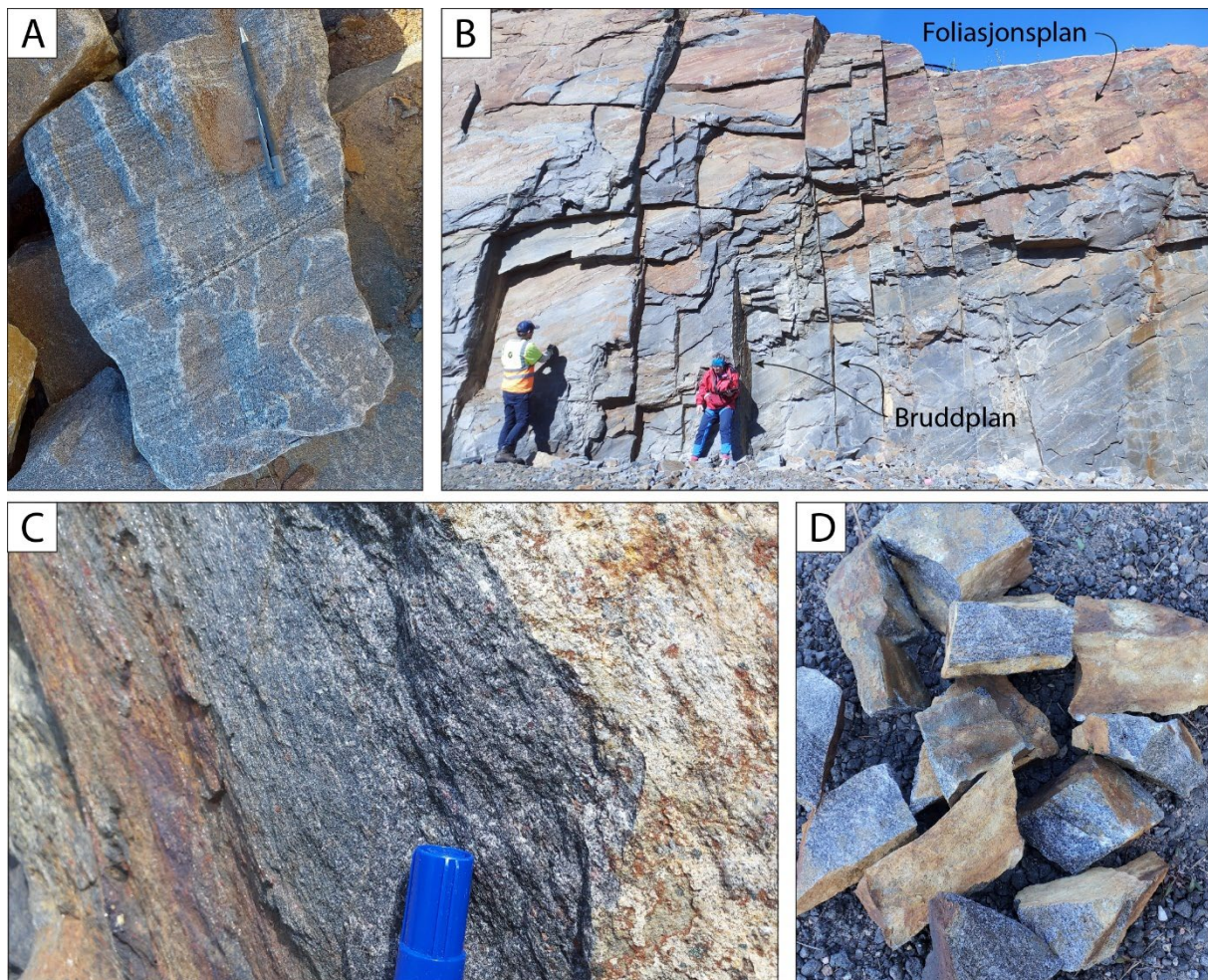
Figur 8. Oversikt over lokaliteter, symbolisert etter hovedbergart som definert fra feltobservasjoner (kan variere fra nøyaktig identifikasjon etter lab-undersøkelser).

Alle kartlagte lokaliteter består av bergarter som har gjennomgått høygrads omdanning (metamorfose) og duktil deformasjon, og derfor hovedsakelig kan beskrives som gneiser (Figur 8). Grovt sett kan bergartene i Lillesand kommune deles i fire kategorier: paragneis, amfibolitt-metagabbro, granittisk–granodiorittisk gneis, tonalittisk gneis.

Den viktigste gruppen av bergarter i Lillesand i forhold til både utstrekning og syredanningsproblematikk er paragneis, som er en samlebetegnelse for gneiser av opprinnelige sedimenter (sand, leire osv.). De utgjør viktigste bestanddel av den geologiske enheten som her kalles Lillesandkomplekset. På eksisterende berggrunnskart er disse bergartene ofte betegnet som båndgneis på grunn av det båndete utseende av vekslende mørke og lyse lag (Figur 2). I denne rapporten har vi forsøkt å beskrive paragneisene mer presist ettersom de har stor betydning for syredanningsproblematikken i kommunen. Denne gruppen bergarter er derfor oppdelt i metasandstein (omdannet sandstein), meta-arkose (omdannet arkose), kvartsitt, (granat)glimmergneis og båndgneis (Figur 8). Forenklet sett er disse like i at de er dannet fra avsetning av sand og består hovedsakelig av kvarts, feltspat og glimmer. Metasandstein brukes ofte som et paraplybegrep som dekker bergarter med en stor variasjon i kvarts-, feltspat- og

glimmerinnhold, inkludert kvartsitt, meta-arkose og metagråvakke. Vi har brukt betegnelsen meta-arkose hvor bergarten er mer massiv med mindre mengder glimmer, mens glimmergneis er benyttet i motsatte tilfeller. Det er også viktig å merke seg at veksling mellom lag av ulike bergarter kan være såpass tett at en blotning med flere lag kan bestå av flere ulike bergarter. Observasjonspunkter er symbolisert etter bergart som dominerer på blotningen (hovedbergart). Der hvor det er omtrent like mye av hver bergart, vil observasjonspunktet være symbolisert etter den bergarten som påvirker blotningen mest. På blotninger som har en mer kompleks geologi, forutsetter dette en systematisk kartlegging gjennom flere lag, slik vi har gjort i Lillesand.

Et viktig fellestrekk for omdannede sedimentære bergarter (paragneiser) i Lillesand kommune, med unntak av kvartsitt, er at de har en karakteristisk gul til gulbrun farge på eksponerte bergflater. De tette folierte omdannede sedimentære bergartene har en guloransje til gulbrun omvandlingshud, som utgjøres av en tynn skorpe eller tynne omvandlingssoner (< 3–5 cm) på eksponerte bergoverflater som en følge av kjemisk endring. Eksponerte bergoverflater i denne sammenhengen gjelder også åpne sprekker (brudd). Begrepet omvandlingssone benyttes også når bergarter omvandles inn mot sprekker med utfelling av mineraler. Omvandlingshud forbindes gjerne med oksidasjon av sulfidmineraler og mulighet for syredannelse, og dannes også i bruddsystemer (sprekker, knusningssoner) som en følge av eksponering for vann og luft.

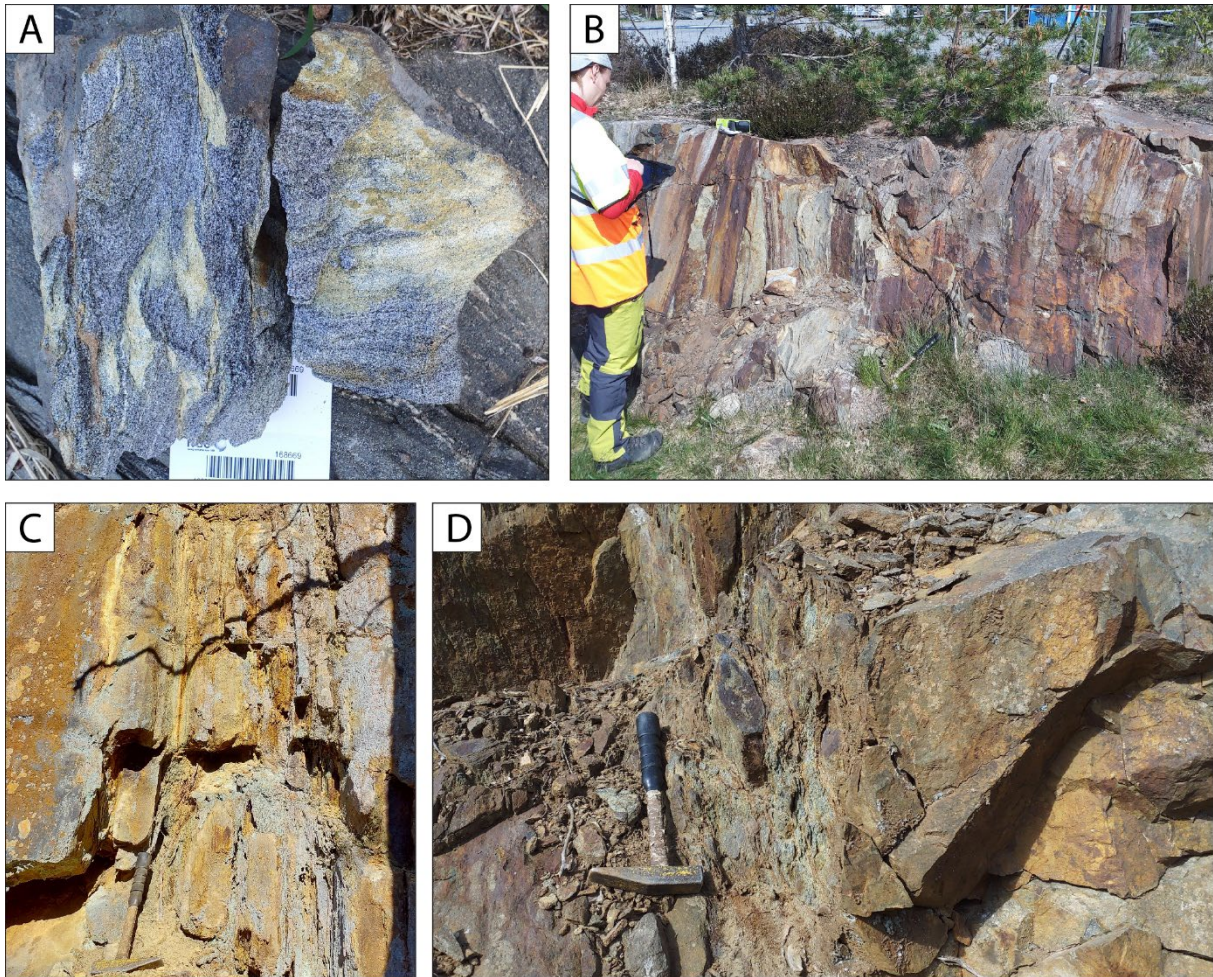


Figur 9. Representative feltbilder av lite til moderat omvandlet metasandstein og granatførende glimmergneis (C) A- Fersk, ikke omvandlet bruddflate/bergflate, som viser karakteristisk utseende av metasandstein med melerte, mm- cm tykke, tett vekslende, finkornete lag i varierende grå til gråsvarte nyanser, avhengig av hvor mye biotitt (svart) det er i lagene. B- Lagdelt, gråmelert metasandstein med gulbrun - gulgrå omvandling på foliasjonsplan (skrå) og bruddplan (vertikale) i en skjæring. Gulgrå til gråbrun farge er karakteristisk for sulfatmineralisering (inkludert jarositt). C- Granatførende glimmergneis/glimmerskifer. D- Gulbrun omvandlingshud på kuttende og foliasjonsparallelle (lagparallelle) bruddflater.

Oversikten over observasjonspunkter symbolisert etter hovedbergart (Figur 8), viser at de fleste lokalitetene utgjøres av metasandstein. I Lillesand sees både metasandstein og meta-arkose som lagdelte, folierte gneiser som består av vekslende cm- til m-tykke lag. Lagene varierer i lateral utstrekning, og kan noen ganger følges over flere 10-talls meter. Lag av meta-arkose og metasandstein opptrer flere steder i tett veksling. Det er viktig å merke seg at hovedbergart i denne sammenhengen betyr at dette er bergarten det er mest av, og som dominerer i observasjonspunktet. Ofte vil den dominerende bergarten inneholde underordnede lag av andre bergarter.

Bergarter symbolisert som **metasandstein** (Figur 8) utgjøres hovedsakelig av folierte, tett vekslende 1–15 cm mektige lag (Figur 9 A–B). Helt ferske, friske bruddflater viser at metasandstein for en stor del består av mm–cm-tykke, laminerte og melerte lag i vekslende grå nyanser med en kornstørrelse som varierer fra 1–2 mm, slik som det vises i Figur 9 A. Grånyanser på friske bruddflater gjenspeiler variasjon i fordeling av mineralene kvarts, feltspat og biotitt, og kornstørrelse (Figur 9 A). Mørkegrå lag har et høyere innhold/tetthet av biotitt sammenlignet med de lysere grå lagene, som er mer kvarts og feltspatrike. Kornstørrelse påvirker også farge: et finkornet lag vil ha en mørkere farge enn et mer grovkornet lag med samme mineralfordeling. Metasandstein karakteriseres av tette, 1–20 mm tykke, gjennomgående foliasjonsplan av biotitt, som opptrer både internt i lag og imellom dem. Foliasjonsplan er ofte brune, dels rustfargede som en følge av kjemisk omvandling (Figur 9 B). Biotitt finnes også som individuelle korn orientert etter foliasjonen, og kan være omvandlet. Metasandstein inneholder også muskovitt, og stedvis er bergarten så rik i glimmerminerale at den kan klassifiseres som glimmergneis eller glimmerskifer (Figur 9 C). Sprekkeplan med sterk gul eller gulbrun farge er svært typisk for disse bergartene (Figur 9 C–D), mens svovelholdige mineraler (1–2 mm) kun i sjeldne tilfeller kan sees på friske bergflater.

Eksponeerte bergflater av metasandstein har gulfarget (oftest «gusjegul») omvandlingshud, som følge av utfelling av jernhydroksidsulfatminerale (jarositt, schwertmanitt; Figur 10). Omvandlingshuden varierer mellom å være noen få mm tykk, gulbrun og gi en litt hul lyd når den bankes på med hammer (Figur 10 A–B), til å utgjøre en 2–3 cm tykk guloransje–gulgrå omvandlingssone, der farge og grad av omvandling øker mot bergoverflate og foliasjonsplan (Figur 10 C–D). Glimmerrike lag (hovedsakelig biotitt, noe muskovitt) og foliasjonsplan mellom lag, tenderer til å smuldre helt opp som følge av pågående omvandling, mens lagene mellom dem er dekket av omvandlingshud. Lagene viser omvandling inn mot sprekker, enten de følger lagflater og foliasjon, eller de kutter gjennom lagningen. Avslåtte prøver av metasandstein kan ha en flere cm tykk gulbrun omvandlingshud langs kryssende sprekker (bruddplan) og bergflater, slik at det kun er en kjerne igjen av opprinnelig bergart og farge (Figur 10 D). Langs sprekker som følger lagning og foliasjon, kan sprekeflater på hver side vise en symmetrisk, flere cm tykk omvandlingshud i vekslende gulgrå, gulgrønne og grønne nyanser på hver side. På sprekeflater som kutter gjennom lagning og foliasjon er omvandlingshud ofte mindre fargerik, men opprinnelig sprekeflate kan være helt eller delvis oppsmuldret (Figur 10 A).



Figur 10. Representative feltbilder av moderat til sterkt omvandlet metasandstein. A- Prøver av metasandstein, som til venstre viser gulgrå til gulbrun omvandling og dannelse av sulfatmineraler i foliasjonsplan/bruddplan i en ellers frisk prøve. Omvandlings huden vil bli tykkere og mer lateralt utholdende i løpet av kort tid. Prøven til høyre viser omvandling til sulfatmineraler på kuttende og foliasjonsparallele bruddplan. B- Metasandstein med utbredt rustbrun omvandling på bruddplan. Stedvise lag av gulfarget omvandlet metasandstein (under og rett t.h. for håndholdt XRF). C–D- Eksempler på sterkt omvandlet og delvis oppsmuldrert metasandstein med jarosittmineralisering (gusjegul-gulgrå). Smuldring begynner langs yttersida av lag, og i brudd, og «spiser seg» gradvis innover i bergarten. Her er det kun en liten, oval, oppstikkende rest eller kjerne (reliktkjerne) igjen av bergarten.

Bergarter symbolisert som **meta-arkose** (Figur 8) sees i felt som homogene, massive lag med en varierende mektighet fra noen cm til mer enn en meter. Helt ferske, utsprengte/avslåtte bruddflater viser en lysegrå, homogen bergart, som består av 1–2 mm store korn av mineralene kvarts, feltspat og biotitt. Biotitt finnes som individuelle, jevnt fordelte korn, og utgjør en mindre andel av mineralene i meta-arkose enn kvarts og feltspat. Det er ingen tydelig foliasjon å se inni lagene av meta-arkose, men biotittkorn har gjerne en foretrukken orientering som følger foliasjonen. Enkelte korn av svovelkis og magnetkis finnes. Eksponerte bergflater av meta-arkose kan stedvis ha en svak gulfarget omvandling, men ikke tykk omvandlingshud. Det kan være rødbrun eller rustfarget mineralutfelling på brudd- og foliasjonsplan uten at tilgrensende bergart er omvandlet inn mot disse. Lag av meta-arkose er adskilt av tynne (2–10 cm tykke), tett folierte, underordnede lag dominert av biotitt.

Lag av meta-arkose og metasandstein opptrer ofte i veksling med hverandre, gjerne med en vesklingsfrekvens 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 (se også skjematisk skisse i Figur 37). Vesentlig her er at et bruddplan ofte kutter gjennom flere lag, og at sulfatmineraler 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.

Bergarter symbolisert som **glimmergneis** (sør for Helldal) og som granatglimmergneis (sør for Høvvåg; Figur 8, Figur 9C), er svært glimmerrike, og inneholder en langt større andel biotitt, og muskovitt enn omdannet sandstein. Glimmergneis er tettere foliert enn omdannet sandstein, og foliasjonsplanene består hovedsakelig av biotitt, men også muskovitt. Under kartleggingsarbeidet i dette prosjektet, var det kun to lokaliteter som var så glimmerrike at de ble symbolisert som glimmergneis. Glimmergneis inneholder også svovelholdige mineraler, og karakteriseres av gulbrun til gulgrå farge og omvandlingshud på eksponerte bergflater og langs sprekker på samme måte som omdannede sedimentære bergarter. Orientering av foliasjon og lag i glimmergneisene sammen med geografisk plassering av observasjonspunkter, indikerer at de representerer en lateralt utholdende sone med glimmergneis som stryker SV–NØ.

Bergarter symbolisert som **kvartsitt** er kun observert lengst nord i det kartlagte området (Figur 8). Kvartsitt er en omdannet kontinentalt avsatt, svært kvartsrik sandstein, og består nesten utelukkende av kvarts. Bergarten er glassaktig og gjennomskinnelig til gråhvit, lite foliert, og synes ikke å ha syredanningspotensiale.

Bergarter symbolisert som **båndgenis** (ved Trøe og Helldal; Figur 8) består av en jevn fordeling av tett vekslende, 10–20 cm tykke, mørke og lyse lag, som kan være både av sedimentær og magmatisk opprinnelse, og med et forholdsvis høyt innhold av biotitt. På grunn av stor variasjon i opprinnelse (magmatisk eller sedimentær) varierer også syredanningspotensialet i båndgneisene.

Bergarter symbolisert som **gabbro, amfibolitt og amfibolittisk gneis** (Figur 8, Figur 11) er dannet fra en mafisk smelte, og senere omdannet til metamorfe bergarter (f.eks. gneis). Felles for disse enhetene er at de har en gråsvart farge på ferske bruddflater, og domineres av mineralene amfibol og lysegrå feltspat (plagioklas), og inneholder noe biotitt. Bergartene er folierte med en lagtykkelse som veksler fra dm til mer enn en meter. De kan inneholde svovel i form av svovelkis og XRF-analyser kan derfor vise nokså høye verdier for svovel. Både felt- og tynnslipstudier (Avsnitt 6.2) viser at svovelkis i liten grad er omvandlet. Det er viktig å merke seg at rustbrød til rustbrun omvandlingsfarge og omvandlingshud på eksponerte bergflater, sprekker og foliasjonsplan er vanlig i disse bergartene (Figur 11 A–B), men disse må ikke forveksles med den gulfarga omvandlingen i metasandstein o.l. Den rustbrød–rustbrune omvandlingsfargen skyldes utfelling av jernhydroksider (hematitt, goethitt m.fl.). Analyser med håndholdt XRF på disse flatene gir typisk lavt utslag i svovelinnhold.



Figur 11. Representative feltbilder av amfibolitt/amfibolgneis med rustbrun omvandling/forvitring. A- Amfibolgneis med rustbrun til rødbrun mineralutfelling av jernhydroksider på sprekkeplan som kutter foliasjon/ lagdeling (merk fargeforskjell til omvandlet metasandstein i Figur 10). B- Amfibolitt med rustbrun mineralutfelling parallelt med foliasjonen.

Amfibolskifer har en mafisk kilde (selv om opprinnelig bergart er noe usikkert), og utgjør mest trolig en del av de mafiske gneisene beskrevet ovenfor. Feltobservasjoner av omvandlingsfarge og -hud indikerer utfelling av jernoksider og lavt svovelinnhold der det er mineralisering. Amfibolskifer er tett foliert i cm–dm tykke lag

Bergarter i de øvrige observasjonspunktene er gitt mye mindre oppmerksomhet i denne rapporten, og er symbolisert som **granittisk, granodiorittisk, tonalittisk gneis** og **øyegneis** (Figur 8), og dominert av mineralene kvarts, feltspat og biotitt. Bergartene er lagdelte i varierende grad, folierte med foliasjonsplan dominert av biotitt, men uten den tette foliasjonen som er karakteristisk for omdannet sandstein og glimmergneis. De viser sjelden eller aldri tegn til særlig omvandling, og det er ikke vanlig å observere sulfider i disse bergartene. Feltobservasjoner og analyser av de felsiske ortogneisene er i hovedsak benyttet som referanser for de tidligere beskrevne bergartene.

Granittisk pegmatitt opptrer som større kroppar i den nordlige delen av kartet (Figur 2) blant annet ved Glamsland, men meter-tykke kroppar eller ganger av pegmatitt forekommer både i para- (Figur 8) og ortogneiser. Pegmatitter er dannet fra felsisk smelte på samme måte som granitt, men karakteriseres av svært grove mineralkrystaller (inntil flere cm store) med kvarts, feltspat og glimmer som hovedmineraler. Lokalt kan pegmatittene inneholde sulfidmineraler (svovelkis er vanligst), ofte som et lag på toppen av kroppen/ gangen, men mengde sulfid er såpass begrenset at dette kun fører til en liten grad av jernsulfatomvandling.

Bergarter symbolisert som **mylonitt** og **forkastningsbergart** i Høvågområdet (Figur 8), sier kun noe om hvordan bergarten er deformert, ikke hvilken type bergart de består av. Mylonitt betyr at bergarten har vært utsatt for progressiv skjærdeformasjon under duktile (plastiske) forhold nede i jordskorpa, mens forkastningsbergart betyr at bergarten er dannet som en følge av forskyvning mellom to bruddflater i den sprø, øvre delen av jordskorpa. Feltarbeidet viste at det er en skjærsone og forkastning i dette området.

6.2 Mineralogi og petrografi

For å bedre forståelsen av bergartenes sammensetning og dannelsesforhold ble det laget til sammen 8 tynnslip fra de 65 innsamlede prøvene. Av disse åtte tynnslipene er seks fra bergarter klassifisert som metasandsteiner, ett fra en amfibolførende gneis og ett fra en glimmergneis. Prøvene er alle fra Lillesandkomplekset og viser ulik grad av syrepotensiale og varierende paste-pH og NAG pH-verdier for å kunne gi en best mulig representasjon (Tabell 1).

Tabell 1: Svovel (LECO, TS), paste-pH og NAG-pH verdier, samt pH-klassifisering for prøver med tilhørende tynnslip.

Prøve ID	Bergartstype	LECO- Total svovel (%)	Paste-pH	NAG-pH	pH-klassifisering
168502	Metasandstein	0,61	4,7	2,83	Rask styredannende
168512	Amfibolførende gneis	1,85	7,5	2,38	Potensielt syredannende
168517	Metasandstein	5,79	4,4	2,12	Raskt syredannende
168530	Glimmergneis	0,82	3,7	2,66	Spontant syredannende
141765	Metasandstein	0,09	5,3	3,75	Raskt syredannende
141766	Metasandstein	0,65	5,4	2,78	Raskt syredannende
141767	Meta-arkose	0,02	6,4	3,89	Potensielt syredannende
141768	Metasandstein	0,19	5,8	2,93	Raskt syredannende

Optiske mikroskopmosaikker av samtlige tynnslip finnes som *Vedlegg 8* i denne rapporten og er utført under henholdsvis planpolarisert (PPL), krysspolarisert (XPL) og reflektert lys (RL). De petrografiske observasjonene er oppsummert i Tabell 2 og diskuteres i deres respektive klassifisering av syredanningspotensiale i paragrafen nedenfor. Alle mineralkjemiske analyser fra SEM er vedlagt i *Vedlegg 8*.

Spontant syredannende

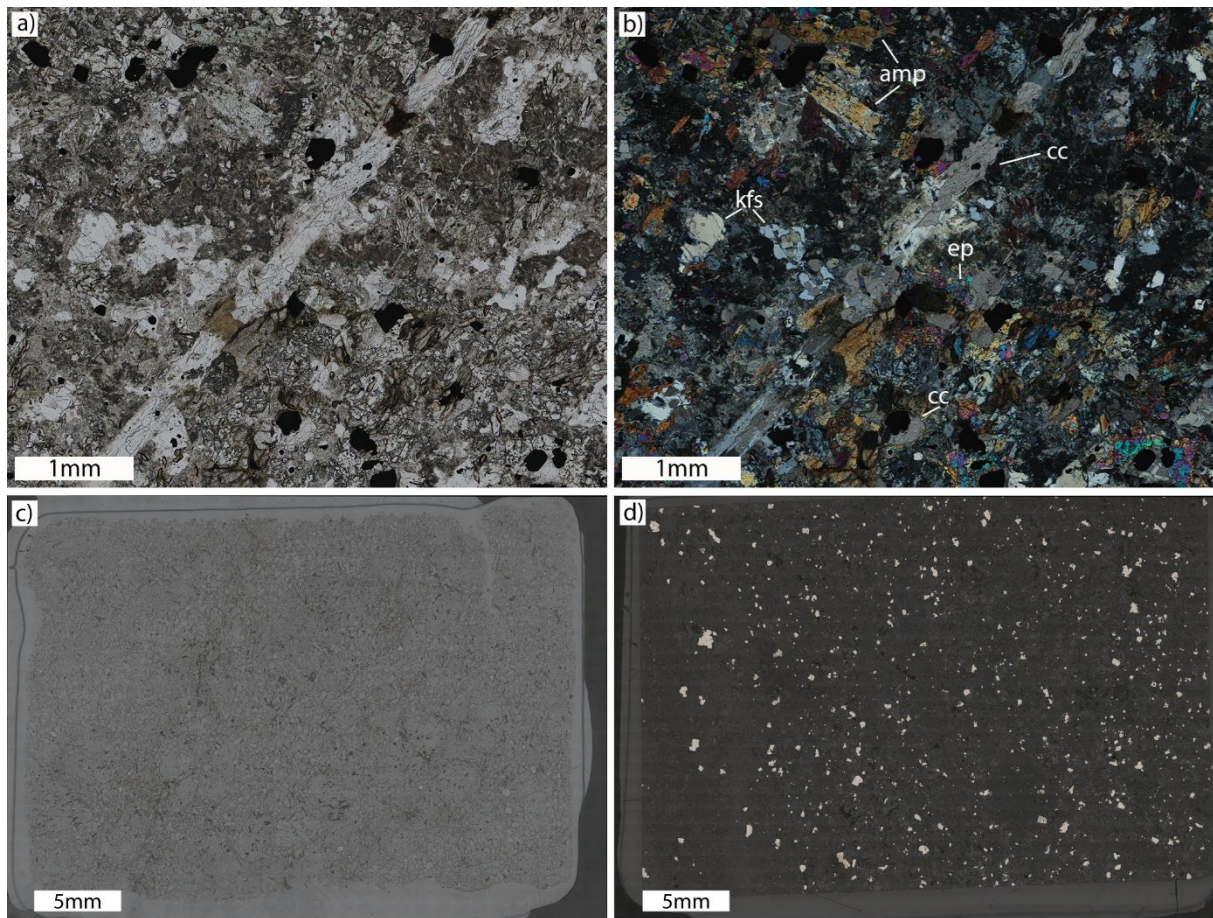
Kun én av prøvene med tynnslip er klassifisert som spontant syredannende og det er en middelskornet glimmergneis (168530). Den mineralogiske sammensetningen er dominert av kvarts, plagioklas og biotitt, med aksessoriske mineraler som apatitt, monazitt, xenotim og zirkon. Hovedsulfidmineralet i denne glimmergneisen er svovelkis (py), men magnetkis (po) og kobberkis (ccp) opptrer i mindre mengder.

Raskt syredannende

Det er utelukkende finkornet til middelskornet metasandstein som havner innenfor denne kategorien av prøvene med tynnslip. Mineralogien domineres av kvarts, plagioklas, kalifeltspat og biotitt. Aksessoriske mineraler er i all hovedsak titanitt, apatitt, rutil og zirkon. Samtlige metasandsteiner inneholder sulfider som svovelkis (py), magnetkis (po), kobberkis (ccp).

Potensielt syredannende

Av åtte prøver med tynnslip er to av dem klassifisert som potensielt syredannende, disse to prøvene er en middelskornet amfibolgneis (168512) og en finkornet meta-arkose (141767). Mineralogien til disse to bergartene er forskjellig; amfibolgneis domineres av amfibol og kalifeltspat, og inneholder kalsitt (< 10 %; Figur 12A-B). Meta-arkose domineres av kvarts, kalifeltspat og biotitt. Begge prøvene inneholder aksessoriske mineraler som titanitt, apatitt og zirkon, og inneholder samme typer sulfider (svovelkis og magnetkis). Hovedforskjellen i sulfidopptreden mellom disse to potensielt syredannende bergartene er mengden sulfider (Figur 12C-D), og sammenlignet med resten av prøvene er mengden magnetkis betydelig lavere i forhold til svovelkis.



Figur 12: A) En åre av blant annet kalsitt skjærer gjennom amfibolførende gneis (planpolarisert lys). B) den samme kalsittåren i krysspolarisert lys, legg merke til at kalsitten ikke bare opptrer i åren, men også ellers i bergarten. Reflektert lys som viser omtrent ingen sulfider i C) meta-arkose (141767) i forhold til D) amfibolførende gneis (168512). Akronymmer: amp= amfibol, cc= kalsitt, ep= epidot, kfs= kalifeltspat.

6.2.1 Omvandling av sulfidmineraler

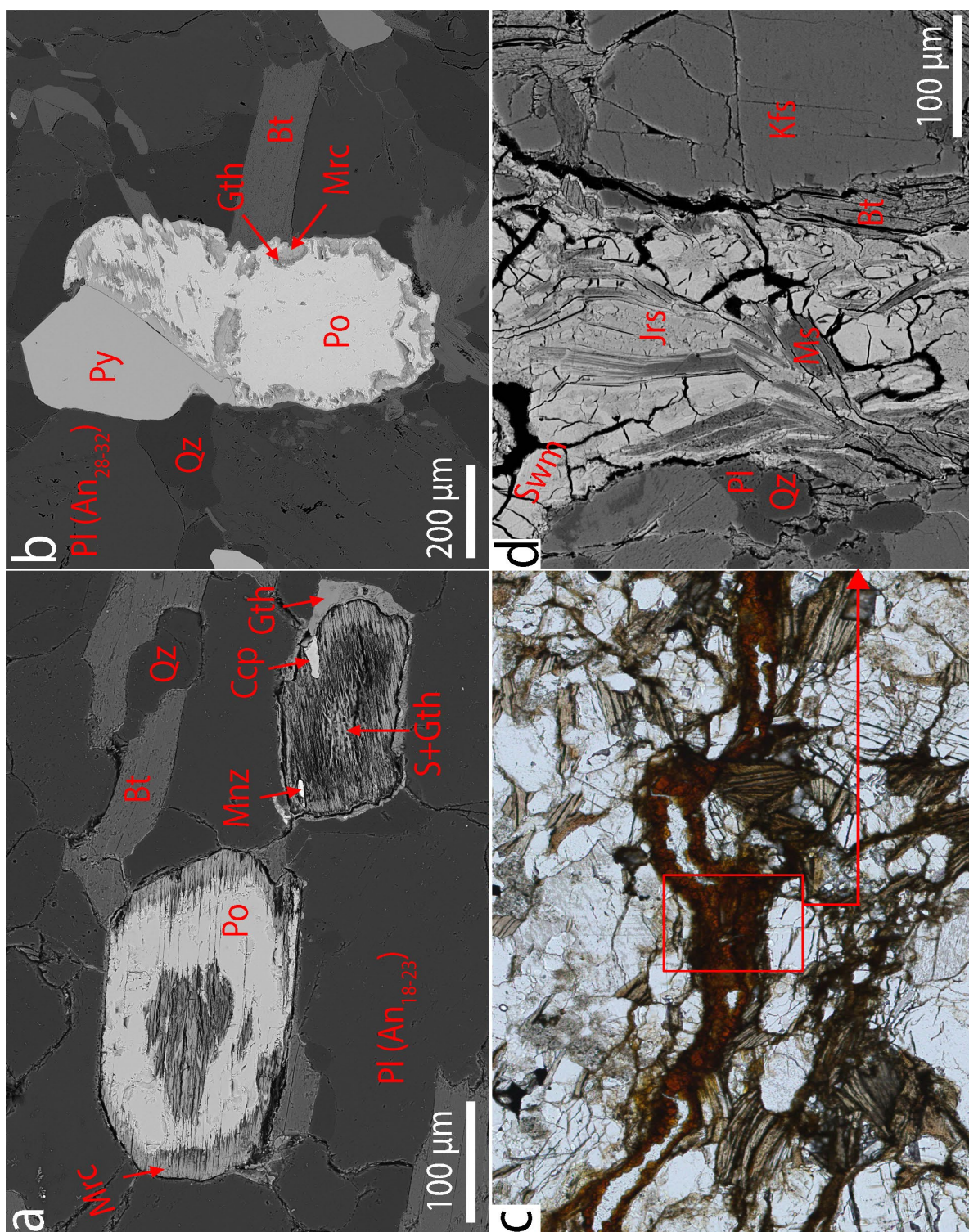
For å bedre forstå den mineralogiske fordelingen av svovel og omvandlingsproduktene av de ulike sulfidmineralene har enkelte utvalgte prøver fra dette prosjektet (168517, 168502, 168512, 168530) og fra Svendby mfl. (2026) (535, 531, 331), innsamlet fra området rundt Sørlandsparken, blitt undersøkt med sveipeelektronmikroskop. Kjemiske punktanalyser (EDS) fra disse undersøkelsene er tilgjengelig i Vedlegg 7.

De to hovedsulfidmineralene i alle gjennomgåtte prøver er svovelkis (FeS_2) og magnetkis (FeS), med enkelte observasjoner av kobberkis (CuFeS_2). Magnetkis er sjeldent støkiometrisk FeS (troilitt), men kan ha opptil 0,125 mol mindre Fe. For enkelhets skyld, vil FeS bli brukt i denne rapporten. Disse sulfidmineralene opptrer sammen, men enkelte prøver kan være dominert av et av dem. Svovelkis er gjennomgående lite eller uomvandlet i alle prøver. Magnetkis, har et mye mindre stabilitetsfelt med tanke på pH og redoksforhold, og er svært reaktivt i kontakt med luft og vann. Magnetkis er ofte delvis eller fullstendig omvandlet til markasitt (FeS_2), goethitt (FeOOH), og gedigent svovel (S). Markasitt er en polymorf av svovelkis, og et vanlig omdanningsprodukt av magnetkis i supergene miljø. Omvandlingen kan skje via en direkte fasetransformasjon ved oksidasjon uten et oppløsningssteg (Dewaal 1984). Det har lignende stabilitetsfelt som svovelkis, og nedbryting er mer sensitivt for oksidasjon enn pH-endringer, men reaksjonshastigheten er lavere enn for svovelkis (Asta mfl. 2010).

Graden av sulfidomvandling varierer sterkt fra prøve til prøve. Magnetkisomvandling er signifikant i prøve 168502 (Figur 13A), moderat i prøve 168517 og 535, hovedsakelig som markasitt og goethitt i randen av korn (Figur 13B), og observert i noen få mineralkorn i prøve 168512. I prøve 168512 er det flere friske korn av magnetkis. Disse prøvene inneholder også frisk svovelkis, med unntak av prøve 535, hvor svovelkis stedvis er omvandlet til jarositt (Figur 13C–D). I prøvene 331, 531, og 168530 er det observert lite magnetkis, og det dominerende sulfidmineralet er svovelkis. Her er svovelkis delvis omdannet til jarositt og schwertmannitt. Dannelsen av jarositt er avhengig av kalium, som blir tilført ved nedbryting av biotitt og/eller kalifeltspat. Dette er ikke observert ved magnetkisomvandling i våre prøver, og flere eksempler på frisk biotitt i direkte kontakt med omvandlet magnetkis er observert. I prøve 535 er både svovelkis og magnetkis omvandlet, men omvandlingsproduktene følger de samme trendene; svovelkis \rightarrow jarositt/schwertmannitt, og magnetkis \rightarrow markasitt \pm goethitt \pm S. Der omvandlingen av magnetkis utelukkende foregår som *in-situ* erstatningsreaksjoner, er jarositt og schwertmannitt i prøve 531 hovedsakelig lokalisert i sprekker, ofte relatert til biotittfoliasjonen, og er felt ut fra løsninger transportert over lengre (>cm-skala) distanser. Eksempelvis er jarositt og schwertmannitt i prøve 531 ikke observert i et ca. 5 mm tykt sulfidrikt bånd, mens graden av omvandling av magnetkis er mer gjennomgående i prøvene. Prøve 530 viser stedvis en direkte erstatning av svovelkis til jarositt, men mye er sannsynligvis blitt fjernet under prøvepreparering.

Tabell 2. Oppsummering av petrografisk beskrivelser av utvalgte prøver.

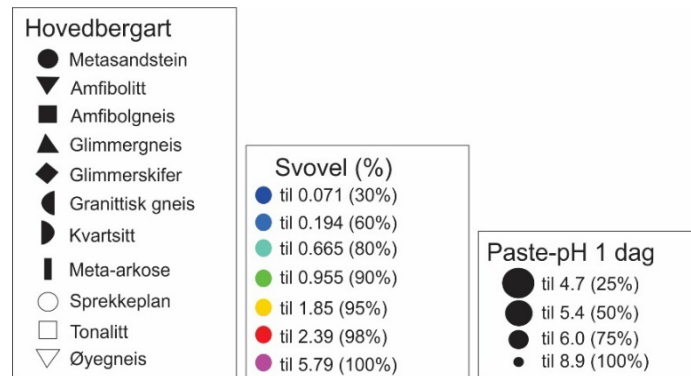
Prøve ID	141768	141767	141766	141765	168530	168517	168512	168502
Lokalitet	Sangereid	Sangereid	Sangereid	Sangereid	Tingsakeråsen	Fjellidal	Grønnviga	Urdaalen
Bergartsnavn	Metasandstein	Meta-arkose	Metasandstein	Metasandstein	Glimmergneis	Metasandstein	Amfibolgneis	Metasandstein
pH-Klassifisering	Raskt syredannende	Potensielt syredannende	Raskt syredannende	Raskt syredannende	Spontant syredannende	Raskt syredannende	Potensielt syredannende	Raskt syredannende
Hovedmineral	qtz±pl±kfs±bt	qtz±kfs±bt	qtz±pl±bt	qtz±kfs±bt	qtz±pl±bt	qtz±pl±bt	amp±kfs±chl	qtz±pl±bt
Underordnede mineraler			kfs	pl		py±po	ep±py	ilm±
Aksessoriske mineraler	zrn±py	ap±zrn	ap±zrn±py	zrn±ap	ap±ep±po±py±ccp	ftn±ap±zrn±ft±mrc	ftn±ap±qtz±cc±po±ccp	ftn±ap±zrn±xtm±po±py±ccp±
Tekstur/struktur	Finkornet, svakt foretrukket orientering av biotitt	Finkornet, uorienterte mineraler, omdannede fenokrystaller av kfs.	Finkornet	Fin-til middelskornet, foretrukket orientering av biotitt	Finkornet, sterkt foretrukket orientering av biotitt	Finkornet, svakt foretrukket orientering av biotitt	Middelskornet, massiv, svakt omdannet	Finkornet, svakt foretrukket orientering av biotitt
Sulfid-opptreden	Spormengder av disseminert svovelkis	-	Spormengder av disseminert svovelkis	-	Spormengder av sulfider. Ganske likt mengdeforhold mellom py og po. Ccp opptrer som inneslutninger i po. Noe omvalding av py til jrs.	Høyt innhold av sulfider, py litt mer dominerende ift. po. mrc er identifisert basert på tekstur.	Høyt innhold av sulfider, disseminert svovelkis er dominerende.	Lavt innhold av sulfider. Po dominerer ift. py, ccp opptrer som inneslutninger i po.



Figur 13: A: Delvis omvandling av magnetkis i kjerne og rand (venstre), og fullstendig erstattet korn (nedre høyre) i prøve 168502. Backscatterelektronbilde B: Frisk svovelkis og delvis omvandlet magnetkis. Biotitt og plagioklas er uomvandlet. Backscatterelektronbilde. Prøve 535 C: Typisk optreden av jarositt og schwertmannitt i sprekker langs foliasjonen og i kontakt med biotitt. Planpolarisert optisk bilde. Prøve 531 D: Markert område fra C) rotert 90° med klokka. Åre av jarositt og schwertmannitt. Jarositt replasserer delvis schwertmannitt i kontakt med glimmermineraller. Mrc – Markasitt, po – magnetkis, bt – biotitt, qz – kvarts, pl – plagioklas, mnz – monasitt, ccp – kobberkis, gth – goetitt, S – gedigen svovel, py – svovelkis, swm – schwertmannitt, jrs – jarositt, ms – muskovitt, kfs – kalifeltspat. An – anortittinnhold ($Ca/(Ca+Na+K)$)

6.3 pH-målinger

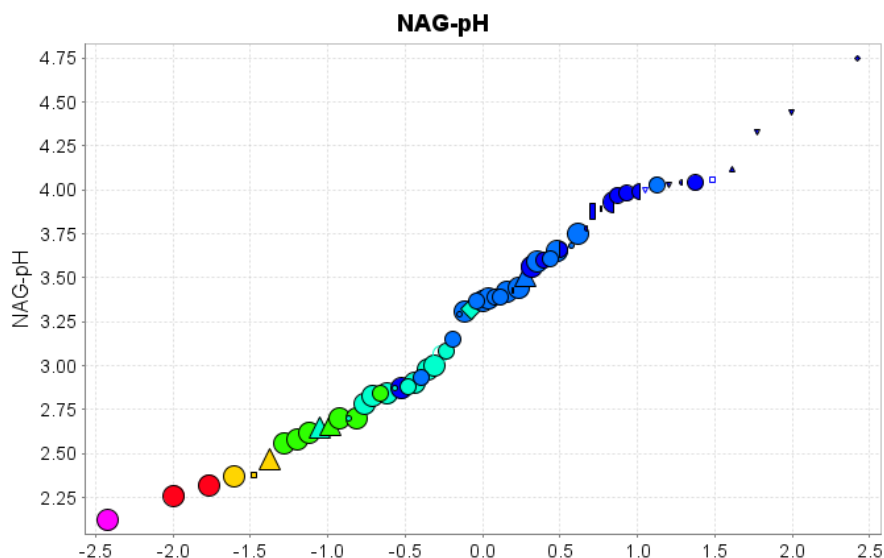
For å forstå bergartenes påvirkning på pH i vannfase, dvs. prøvenes potensiale for å produsere syre, har målinger av paste-pH (metodebeskrivelse: avsnitt 5.3) og NAG-pH (metodebeskrivelse: avsnitt 5.4) blitt gjennomført for alle 65 prøver (Tabell 3). Figur 20 og Figur 21 viser hvor prøvene kommer fra. De fleste grafene i denne rapporten bruker samme tegnforklaring på symbolene som viser hovedbergart (form), svovelinnhold (farge) og paste-pH (størrelse; Figur 14).



Figur 14. Symbolforklaring for de fleste geokjemiske grafene (ikke kart) i denne rapporten. Hvert symbol i plottene viser til én prøve og sammenstiller tre forskjellige faktorer, symbolform viser til hovedbergart og fargen indikerer svovelinnhold (%-LECO). Til sist viser symbolstørrelsen til prøvenes resultat for paste-pH, jo større symbol desto mer syredanning fra prøven.

6.3.1 NAG-pH

NAG-pH måler pH i en løsning etter at prøve er fullstendig oksidert av hydrogenperoksid (H_2O_2). NAG-testen er basert på reaksjonen av en prøve med hydrogenperoksid, som akselererer oksidasjonen av sulfidmineraler i prøven. Under testen kan syregenerering- og syrenøytraliseringsreaksjoner foregå samtidig, og sluttresultatet representerer en direkte måling av netto mengden syre som produseres av prøven. Det må poengteres at testen ikke estimerer nøytraliseringspotensialet. Analysene som er gjort på prøvene fra Lillesand viser at alle prøvene utenom en resulterer i NAG-pH < 4,5, dvs. at de kategoriseres som potensielt syredannende (Figur 15). Disse målingene kombineres med paste-pH i Figur 35 for å differensiere deres umiddelbare syredanningspotensial.



Figur 15. Sannsynlighetsgraf som fremstiller NAG-pH for alle prøver. NAG-testen brukt her er en «single addition» test, som foregikk uten etterfølgende titrering.

Tabell 3. Oppsummering av pH-målinger og viktigste geokjemiske analyser (fullstendig datagrunnlag finnes i Vedlegg 3 til 6. *HH-XRF-verdier er gjennomsnitt av 3 målinger på pressede tabletter brukt for Lab-XRF.

Prøvenr.	Hovedbergart	Paste pH				NAG pH	% S, labXRF	% S, LECO	%S, HHXRF*	% TC, LECO	% TOC, LECO
		Dag1	Dag3	Dag7	Dag30						
168501	Øyegneis	8,5	7,4	7,4	8,0	4,0	<0,1	0,0578	0,052	< 0,06	< 0,1
168502	Metasandstein	4,7	4,8	4,2	2,9	2,8	0,65	0,611	1,114	< 0,06	< 0,1
168503	Meta-arkose	6,4	6,4	6,1	5,0	3,4	<0,1	0,134	0,190	< 0,06	< 0,1
168504	Metasandstein	5,5	5,2	4,8	3,3	2,8	0,52	0,904	0,928	0,467	0,46
168505	Kvartsitt	5,8	6,5	6,5	6,7	3,7	<0,1	<0,02	0,037	0,208	0,202
168506	Granittisk gneis	6,8	7,0	6,8	6,9	3,8	<0,1	<0,02	0,028	< 0,06	< 0,1
141401	Kloritt?	7,9	7,7	7,8	7,7	4,8	<0,1	<0,02	0,015	< 0,06	< 0,1
168507	Metasandstein	5,5	5,5	5,2	3,5	2,9	0,25	0,539	0,457	< 0,06	< 0,1
168508	Metasandstein	5,0	5,1	4,8	4,3	2,9	0,19	0,37	0,332	0,246	0,251
168509	Metasandstein	5,5	5,8	6,0	5,9	4,0	<0,1	0,034	0,094	< 0,06	< 0,1
168510	Sprekkeplan	5,6	5,3	4,9	4,2	3,1	0,18	0,32	0,293	0,173	0,178
168511	Metasandstein	6,0	6,1	6,0	5,7	3,6	<0,1	0,107	0,135	< 0,06	< 0,1
141402	Metasandstein	5,6	5,2	5,0	4,1	3,1	0,16	0,252	0,271	< 0,06	< 0,1
141403	Metasandstein	6,0	5,9	5,9	5,2	3,4	<0,1	0,165	0,149	< 0,06	< 0,1
168512	Amfibolgneis	7,5	7,4	7,4	7,3	2,4	0,49	1,85	0,888	0,214	< 0,1
168513	Metasandstein	5,0	5,1	5,1	4,0	3,4	0,19	0,142	0,321	0,134	< 0,1
168514	Metasandstein	4,4	4,4	4,0	3,3	3,3	<0,1	0,0944	0,170	0,102	0,108
168515	Metasandstein	6,2	6,5	6,5	6,0	3,3	<0,1	0,114	0,125	< 0,06	< 0,1
168516	Tonalitt	6,1	6,0	5,7	6,4	4,1	<0,1	<0,02	0,038	< 0,06	< 0,1
168517	Metasandstein	4,4	4,7	4,8	3,3	2,1	2,49	5,79	4,788	< 0,06	< 0,1
168518	Metasandstein	5,8	6,0	5,9	5,5	4,0	<0,1	0,084	0,155	< 0,06	< 0,1
168519	Metasandstein	4,7	5,2	4,7	4,1	3,4	<0,1	0,0996	0,158	< 0,06	< 0,1
168520	Metasandstein	3,3	3,2	3,2	2,8	2,3	0,99	1,95	1,712	< 0,06	< 0,1
168521	Metasandstein	5,3	5,1	4,9	3,4	2,6	0,52	0,888	0,884	< 0,06	< 0,1
168522	Metasandstein	5,9	5,8	5,6	3,8	3,4	<0,1	0,0987	0,166	< 0,06	< 0,1
168523	Meta-arkose	5,8	5,8	6,3	6,1	3,9	<0,1	<0,02	0,036	< 0,06	< 0,1
168524	Metasandstein	5,6	5,3	5,1	3,4	3,2	0,11	0,189	0,182	0,155	0,131
168525	Metasandstein	7,6	7,4	7,3	6,9	2,9	0,15	0,305	0,268	< 0,06	< 0,1
168526	Glimmergneis	6,1	6,3	5,8	5,2	4,1	<0,1	0,0406	0,118	< 0,06	< 0,1
168527	Glimmergneis	5,2	5,2	5,1	3,6	2,5	0,78	1,73	1,435	0,137	0,105
168528	Glimmergneis	4,8	5,0	4,3	3,5	3,5	0,12	0,17	0,275	< 0,06	< 0,1
168529	Glimmergneis	4,1	3,7	3,4	2,8	2,7	0,64	0,665	1,081	< 0,06	< 0,1
168530	Glimmergneis	3,7	3,5	3,5	2,8	2,7	0,44	0,815	0,817	0,116	< 0,1
168531	Metasandstein	3,4	3,3	3,3	2,7	3,0	0,2	0,223	0,361	< 0,06	< 0,1
168532	Metasandstein	4,9	4,9	4,7	3,7	3,4	<0,1	0,0826	0,177	0,118	< 0,1
168533	Metasandstein	4,0	3,9	3,7	3,0	2,6	0,38	0,824	0,649	< 0,06	< 0,1
168534	Metasandstein	4,4	4,3	3,9	3,1	3,0	0,12	0,232	0,236	< 0,06	< 0,1
168535	Metasandstein	5,2	5,3	4,8	4,3	2,7	0,33	0,816	0,588	< 0,06	< 0,1
168536	Metasandstein	4,3	4,4	3,9	3,1	2,4	1,11	1,61	1,937	0,188	0,175
168537	Metasandstein	4,5	4,4	3,9	2,9	2,6	0,51	0,955	0,941	0,104	< 0,1
168538	Metasandstein	5,4	5,1	4,9	3,3	2,8	0,26	0,452	0,471	0,0719	< 0,1
168651	Granittisk gneis	5,8	6,2	6,2	6,1	4,0	<0,1	<0,02	0,044	< 0,06	< 0,1
168652	Metasandstein	5,6	6,0	6,0	5,7	4,0	<0,1	<0,02	0,064	0,312	0,267
168653	Amfibolitt	7,1	7,1	7,3	7,0	4,0	<0,1	0,0403	0,070	< 0,06	< 0,1

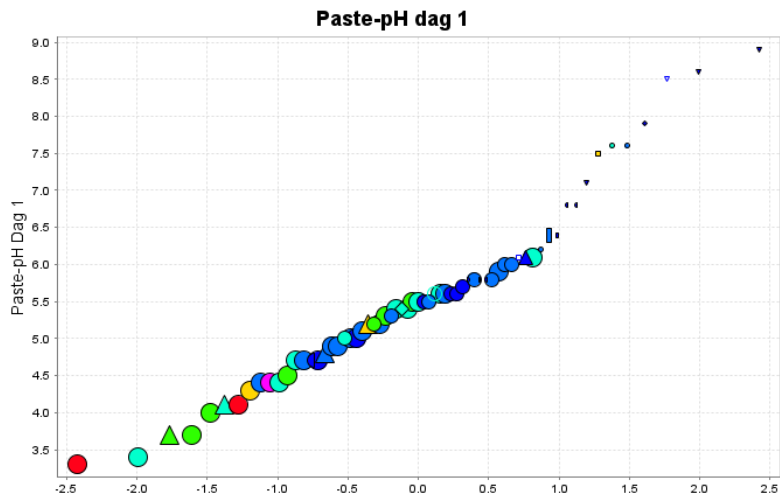
Prøvenr.	Hovedbergart	Paste pH				NAG pH	% S, labXRF	% S, LECO	%S, HHXRF*	% TC, LECO	% TOC, LECO
		Dag1	Dag3	Dag7	Dag30						
168654	Granittisk gneis?	4,7	4,7	4,8	4,9	3,9	<0,1	<0,02	0,031	< 0,06	< 0,1
168655	Metasandstein	5,6	5,5	5,3	4,7	3,6	<0,1	0,0696	0,130	< 0,06	< 0,1
168656	Metasandstein	7,6	7,3	7,1	6,9	3,7	<0,1	0,0789	0,121	0,248	0,194
168657	Metasandstein	6,1	5,9	5,8	4,0	2,7	0,33	0,629	0,569	< 0,06	< 0,1
168658	Metasandstein	3,7	3,7	3,5	2,9	2,7	0,65	0,675	1,107	0,106	< 0,1
168659	Metasandstein	4,9	4,8	4,5	3,5	3,4	<0,1	0,0719	0,137	0,0892	< 0,1
168660	Metasandstein	5,5	4,8	4,8	4,3	3,4	0,17	0,141	0,284	0,0845	< 0,1
168661	Glimmerskifer	5,4	5,6	5,6	5,4	3,3	0,13	0,293	0,237	< 0,06	< 0,1
168665	Amfibolitt	8,6	7,7	7,5	7,9	4,3	<0,1	<0,02	0,044	< 0,06	< 0,1
168666	Granittisk gneis	6,8	6,5	6,5	6,6	4,0	<0,1	<0,02	0,040	< 0,06	< 0,1
168667	Amfibolitt	8,9	8,2	8,1	8,0	4,4	<0,1	0,0226	0,105	< 0,06	< 0,1
168668	Metasandstein	4,1	4,0	3,9	3,4	2,3	1,16	2,39	2,247	< 0,06	< 0,1
168669	Metasandstein	5,2	5,4	5,0	3,3	3,7	0,19	0,155	0,379	< 0,06	< 0,1
168670	Metasandstein	5,7	6,0	5,4	5,6	4,0	<0,1	<0,02	0,082	0,104	< 0,1
141404	Metasandstein	5,1	4,8	4,2	3,7	3,6	<0,1	0,0791	0,143	< 0,06	< 0,1
141405	Metasandstein	4,7	4,6	4,3	3,6	3,6	<0,1	0,0708	0,123	< 0,06	< 0,1
141406	Metasandstein	5,0	4,8	4,6	3,9	2,9	0,13	0,0417	0,221	< 0,06	< 0,1
141765	Metasandstein	5,3	5,2	5,1	4,2	3,8	<0,1	0,0873	0,184	0,11	0,104
141766	Metasandstein	5,4	5,2	4,7	3,3	2,8	0,29	0,649	0,549	< 0,06	< 0,1
141767	Meta-arkose	6,4	6,4	6,3	6,2	3,9	<0,1	0,0231	0,076	0,0797	< 0,1
141768	Metasandstein	5,8	5,7	5,6	5,4	2,9	<0,1	0,194	0,165	0,47	0,45

6.3.2 Paste-pH

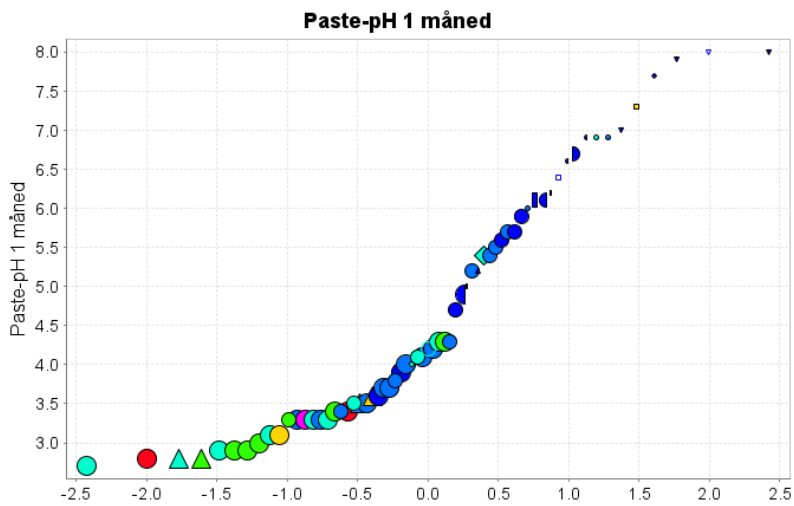
Paste-pH måler pH i en løsning av finknust bergart og destillert vann, og gjenspeiler det umiddelbare syredanningspotensialet i bergarten. Figur 16–17 viser sannsynlighetsgrafene for paste-pH-resultatene. En sannsynlighetsgraf viser fordelingen av de observerte paste-pH-målingene ved å plote dem mot en teoretisk sannsynlighetsfordeling, slik at avvik fra forventet normalitet kan identifiseres (f.eks. ulike populasjoner). Prøver med høyere svovelinnhold (rød og gul farge på symboler) har alle paste-pH < 6, med unntak av en prøve (amfibolgneis). De fleste prøver med paste-pH < 6 fortsetter å produsere syre ved at pH har blitt lavere over en måned (Figur 17). Det finnes to forskjellige populasjoner av prøver i målingene av paste-pH (knekk i sannsynlighetsgraf (Figur 16–17), der alle glimmergneisprøver og nesten alle metasedimentprøver viser en fortsatt syredanning, mens ortogneiser ikke gjør det.

Prøver med paste-pH > 6, dvs. prøver som ikke produserer syre spontant, er først og fremst prøver av amfibolitt, amfibolgneis, granittisk- og øyegneis samt tonalitt. Forskjellen i paste-pH mellom måling etter en dag og etter en måned viser at de aller fleste metasandstein- og glimmergneisprøver fortsetter å danne syre (Figur 18), mens de andre bergartene stort sett forblir uforandret.

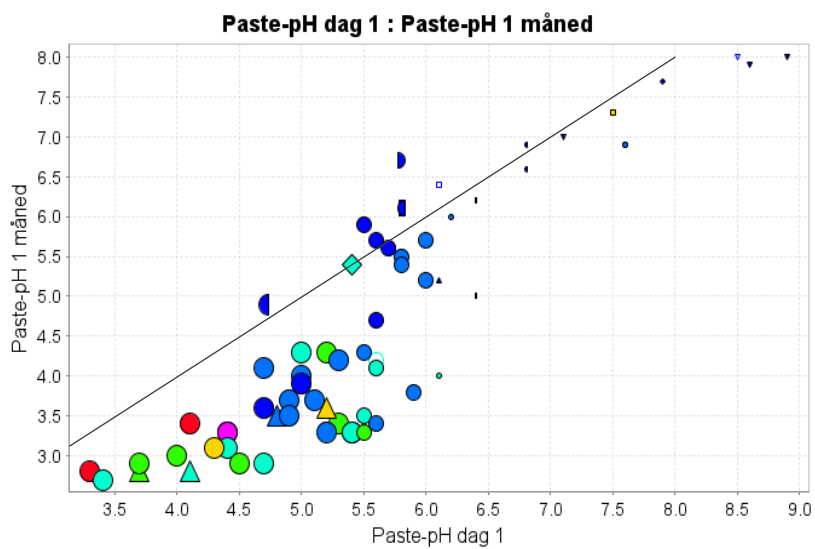
Sammenstilling av alle paste-pH- og NAG-pH-målinger viser tydelig at prøver med paste-pH < ca. 5,5 etter en dag (lilla sirkler; Figur 19) fortsetter å produsere syre over tid og driver pH-verdiene lavere og mot NAG-pH (svart strek; Figur 19). Prøver med paste-pH > 6 etter en dag, viser hovedsakelig ingen endring over en måned, selv om NAG-pH er omtrent like lav som i prøver som viser < ca. 5,5. Bergartene med lav paste-pH domineres av metasandstein og glimmergneis, som vist av fargestripene i Figur 19.



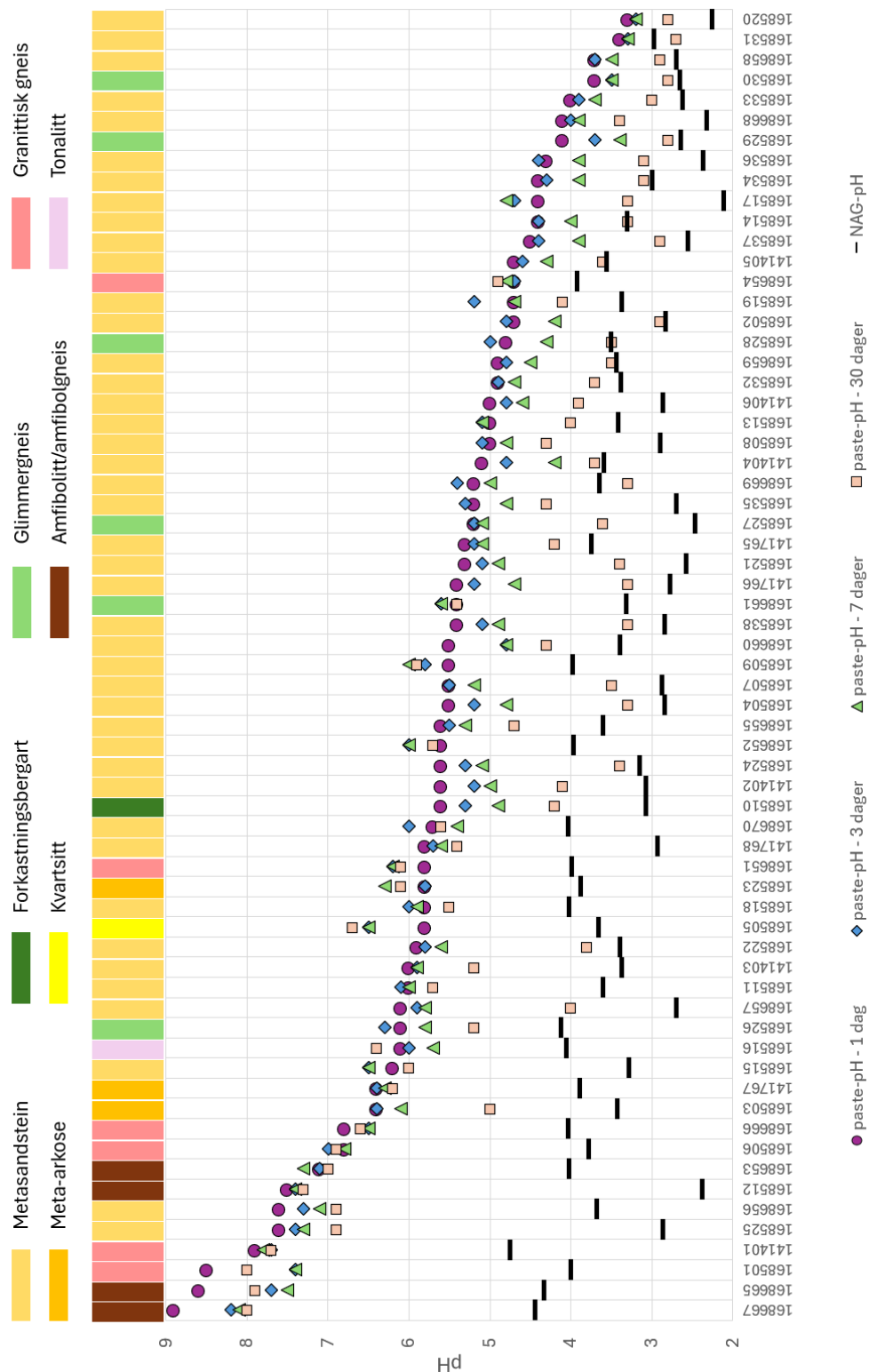
Figur 16. Sannsynlighetsgraf for paste-pH analyser, avlest etter en dag.



Figur 17. Sannsynlighetsgraf for paste-pH analyser, avlest etter en måned.

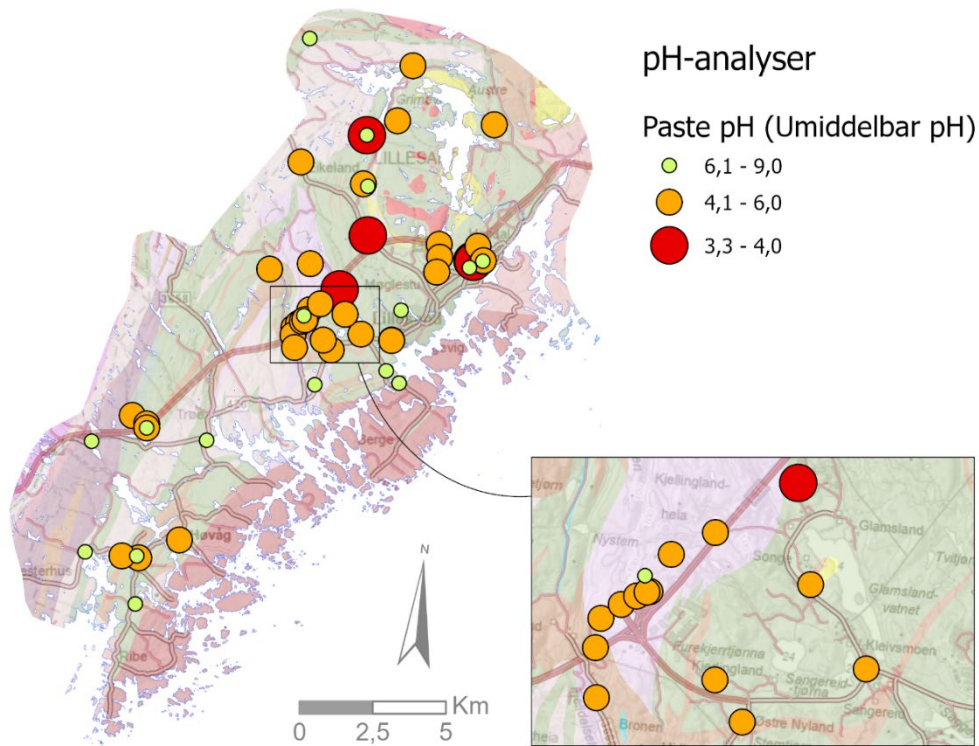


Figur 18. XY-plot av paste-pH resultat etter 1 dag og 1 måned.

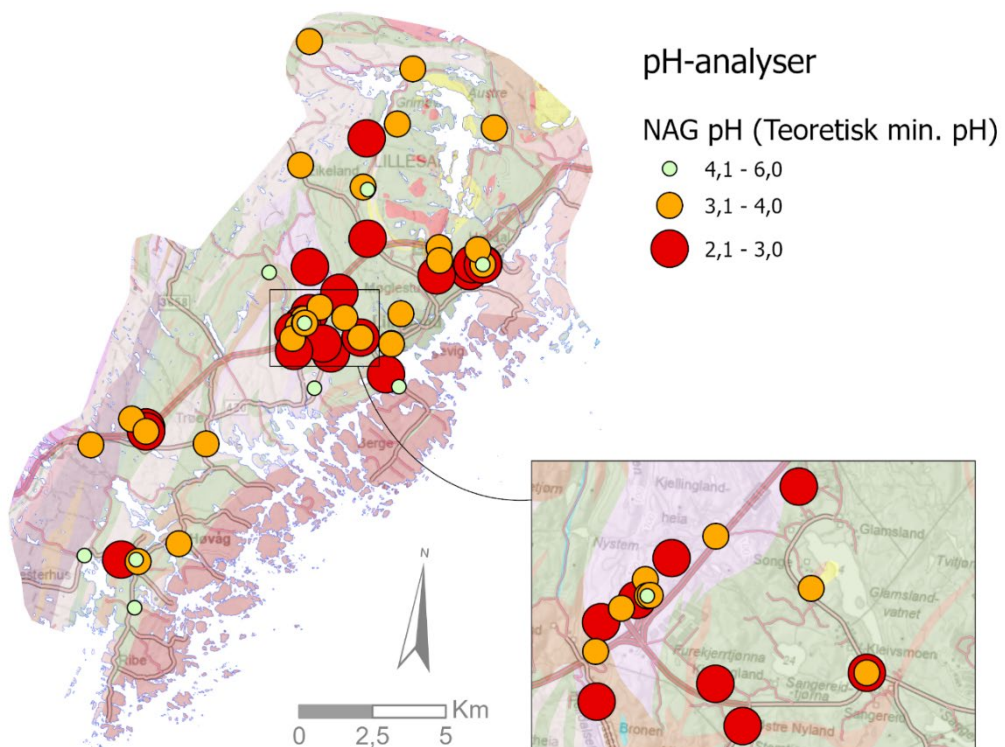


Figur 19. Samlediagram som viser alle pH-målinger per varighet og type. Prøvene er sortert etter paste-pH resultat (1 dag) fra høy til lav. Fargene øverst samsvarer med fargene på hovedbergart for hver prøvelokalitet.

Bergarter med lav paste-pH < 6 opptrer over store deler av kommunen, og grovt sett innenfor området kartlagt som båndgneis på eksisterende berggrunnskart (Figur 20). Nesten samtlige av prøvene samlet inn i området fra Kjerlingland til Tingsakeråsen gir lave paste-pH-verdier. Dette er også området hvor flest prøver med NAG-pH < 3 forekommer (Figur 21). Selv prøver fra antatt ikke-syredannende bergarter (f.eks. granittisk gneis og øyegneis) gir NAG-pH-verdier under 4,7. Dette er hovedsakelig på grunn av mangel på syrenøytraliserende mineraler (avsnitt 6.4.3).



Figur 20. Oversikt over paste-pH-analyser (1 dag).



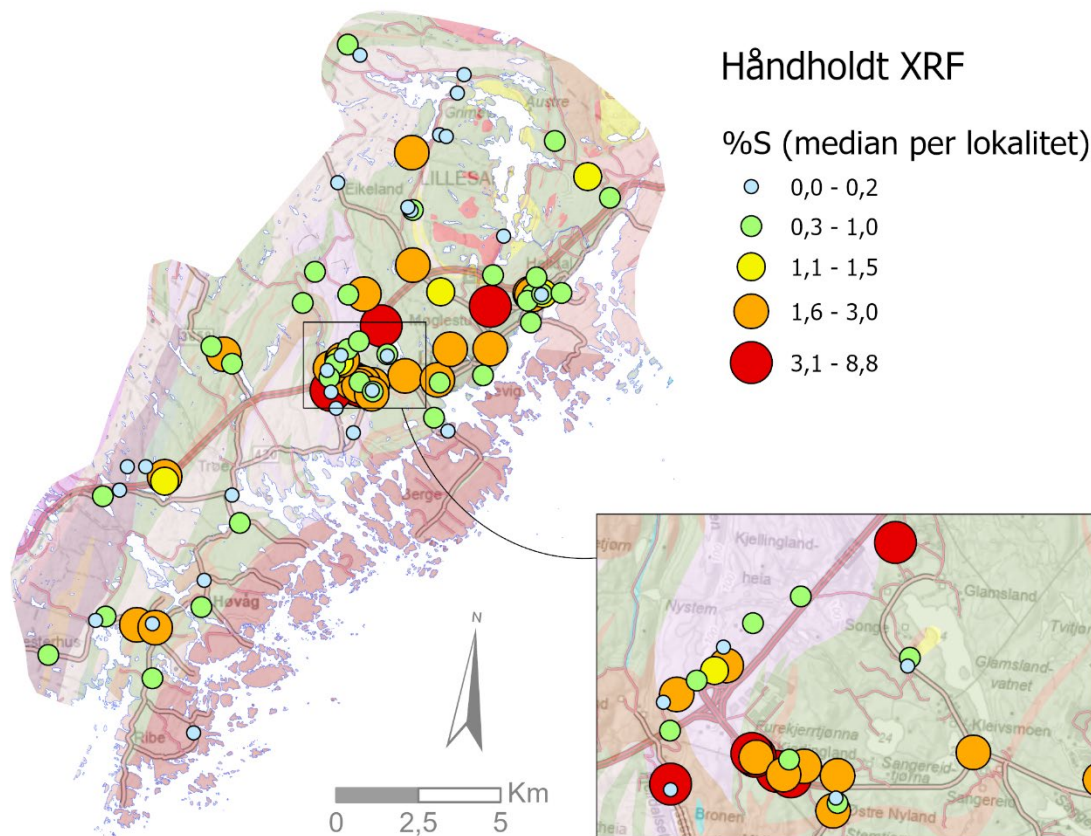
Figur 21. Oversikt over NAG-pH-analyser.

6.4 Geokjemi

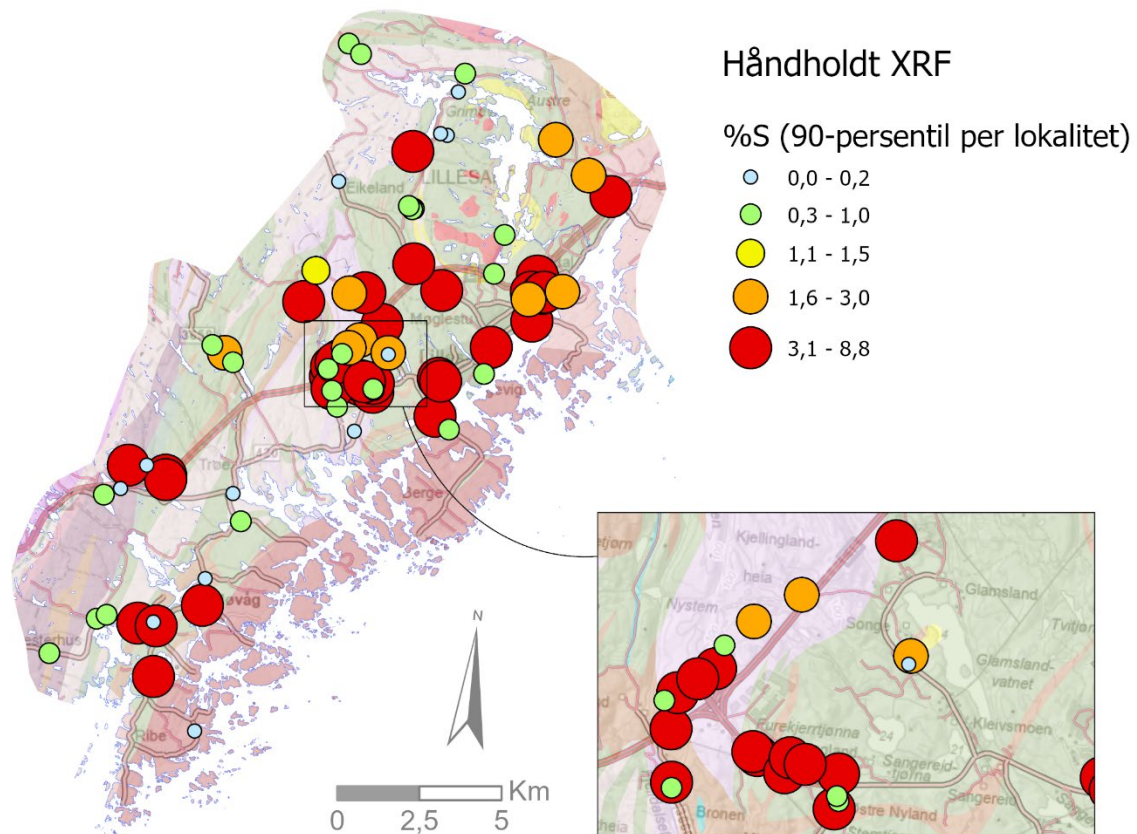
6.4.1 Håndholdt XRF

Totalt ble 745 analyser gjennomført med håndholdt XRF i felt (Vedlegg 1). Instrumentet har høy deteksjonsgrense for mange grunnstoff, og målingene viste akseptable resultat over deteksjonsgrense kun for grunnstoffene aluminium (Al), jern (Fe), mangan (Mn), fosfor (P), bly (Pb), rubidium (Rb), svovel (S), silisium (Si), strontium (Sr), titan (Ti), yttrium (Y), sink (Zn) og zirkonium (Zr). Få grunnstoffer over deteksjonsgrensen er også en konsekvens av måten instrumentet ble satt opp på (se avsnitt 5.2).

For hver lokalitet ble minimum tre og i gjennomsnitt seks HH-XRF-målinger gjennomført. Målingene fordeler seg utover hele kommunen (Figur 22–23). Median av målingene ved hver lokalitet er hovedsakelig over 0,3 % S, spesielt innenfor Lillesandkomplekset. Stedvis er medianverdien svært høy (> 3 % S). Fordi bergartene i Lillesandkomplekset ofte viser svært stor forskjell i svovelinnhold mellom frisk bergart og brudd- og foliasjonsplan (se resultater nedenfor) er det bedre å bruke 90-persentilen for å identifisere lokaliteter med stort potensiale for syredanning (Figur 23). De fleste lokaliteter innenfor Lillesandkomplekset har 90-persentil svovelinnhold > 1 % S.



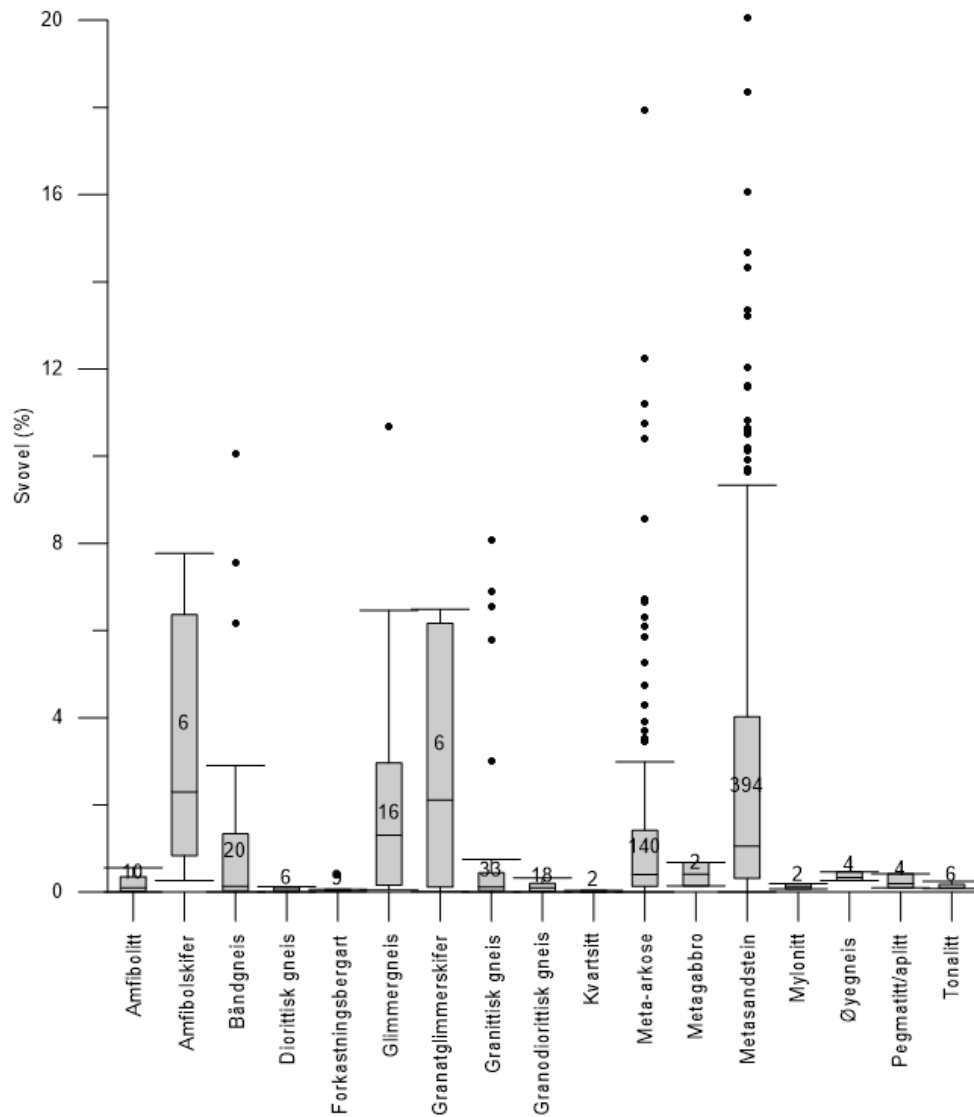
Figur 22. Oversiktskart over lokaliteter hvor det er utført målinger med håndholdt XRF, symbolisert etter median %S-verdi per lokalitet.



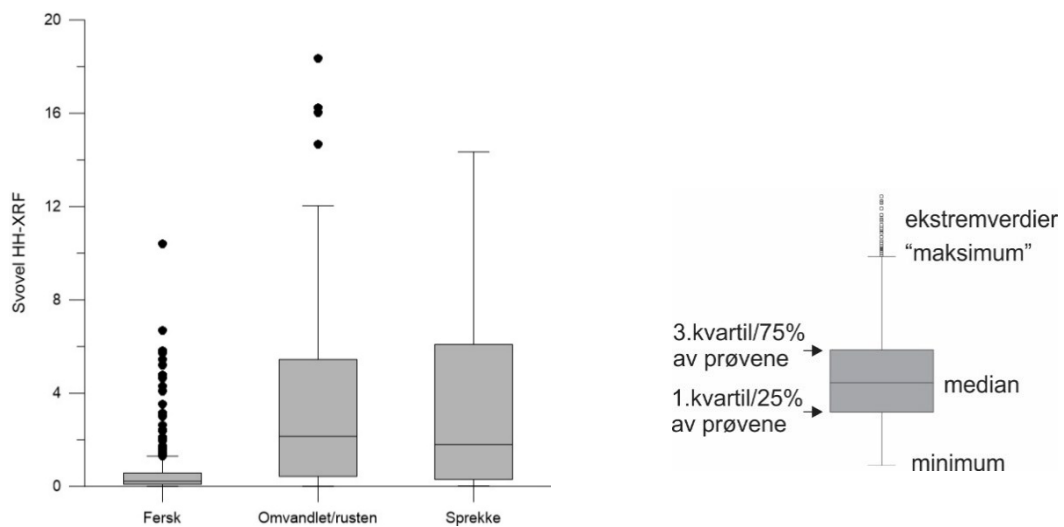
Figur 23. Oversiktskart over lokaliteter hvor det er utført målinger med håndholdt XRF, symbolisert etter 90-persentil %S-verdi per lokalitet.

Forskjell i svovelinnhold mellom ulike bergarter vises tydelig i boksplot (Figur 24). Her representeres hovedbergart for hver lokalitet med alle analyser for den lokaliteten. Alle målinger betyr en sammenstilling av frisk bergart, omvandlingshud, sprekkeplan og utfellinger, derfor kan spredningen i svovelinnhold være ganske stor for noen bergarter. Plottet viser at bergartene der svovelkonsentrasjonen er høyest er metasandstein og glimmergneis, samt granatglimmerskifer og amfibolskifer (få målinger).

Målingene med XRF i felt ble utført på både frisk bergart, dvs. på bergartsoverflate som ikke er påvirket av overflateprosesser som kjemisk omvandling eller mekanisk erosjon, og på omvandlet eller rusten overflate eller overflater/utfellinger i sprekkeplan (Figur 25). Inndelingen i de tre kategoriene er gjort etter feltbeskrivelser om analysepunkt og lokalitet. Boksplottene viser at majoriteten av målinger på frisk bergart viser lave svovelkonsentrasjoner (median 0,2 % S), unntaket er lokaliteter der disseminerte, små sulfidkorn forekommer i høye konsentrasjoner spredt i bergarten. På flater som er omvandlet eller ved målinger av utfellinger i sprekkeplan måles mye høyere svovelkonsentrasjoner (median 2,1 % S).



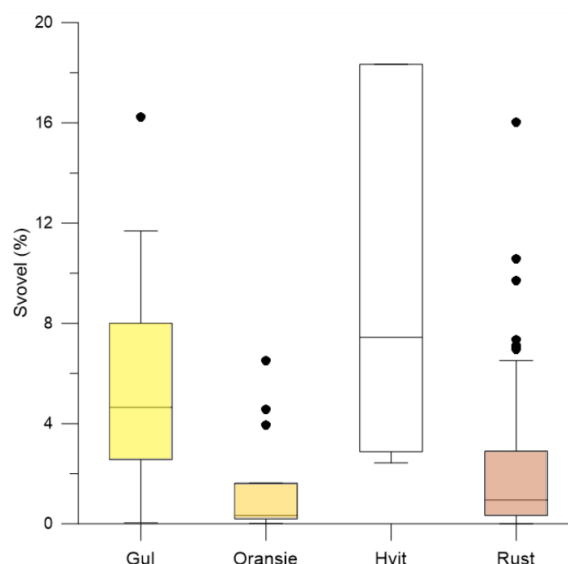
Figur 24. Svovelkonsentrasjoner målt med HH-XRF for de lokale bergartene. Tallene representerer antall analyser per bergart. Forklaring av boksplot i Figur 25.



Figur 25. Svovelkonsentrasjoner delt inn i analyser gjort på ferske/friske bergarter (N=274), omvandlede eller rustne bergarter eller overflater (N=245) og sprekker (N=48). Skissen til høyre forklarer boksplottets struktur.

Omvandling og utfelling av sekundære hydroksidmineraler forekommer i mange forskjellige former og farger i studieområdet, og i en del tilfeller er dette angitt for målingene (Figur 26). Analyser som er definert som gule inkluderer «gusjegul/grønn-grågul» omvandling, hvor bergarten smuldrer opp, men også lysegul utfelling i små brudd som stedvis impregnerer, dvs. trenger inn i frisk bergart. Oransje omdanning opptrer lik den lysegule utfellingen i brudd, men har en særegen lysoransje farge. Hvit farge defineres av gips- eller kalsittutfellinger, ofte i brudd. Rustfarge forekommer i begge som tynn omvandling på bergartsoverflate, men også som tykk «omdanningshud» langs brudd eller overflater.

Målinger på de hvite utfellingene i gips (kalsiumsulfat: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) viser generelt de høyeste svovelskonsentrasjonene som forklares av svovelinholdet i mineralet. Målingene av overflater av rustne brudd og overflater viser generelt lavere konsentrasjoner ved sprekker og overflater som kutter foliasjonen, mens foliasjonsparallele overflater og brudd viser høyere konsentrasjoner. Dette kan muligens være fordi foliasjonsparallele brudd har høyere permeabilitet eller har høyere andel av glimmer som inneholder jern og dermed kan være opphav til rustfarget omvandling. Ved gulfarget omvandling, som viser til de høyeste svovelskonsentrasjonene og det største konsentrasjonsspennet. oppfattes ikke noen spesielt mønster for hvor høye konsentrasjoner forekommer.

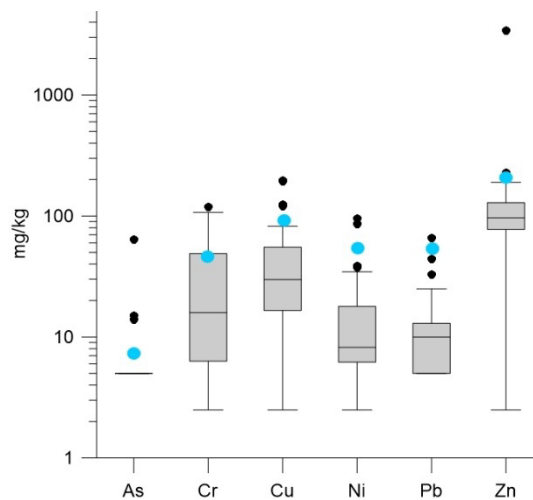


Figur 26. Svovelskonsentrasjon delt inn i farge (Gul N=80, Oransje N=16, Hvit N=5, Rust N=117) for omdannede bergarter eller utfellinger på bruddplan. N=antall målinger

I tillegg til målinger med håndholdt XRF i felt har det også blitt gjennomført målinger med håndholdt XRF på pressete tabletter som lages for sporelementanalyse ved lab-XRF (Vedlegg 11). Disse målingene ble gjennomført for å validere presisjon og nøyaktighet av HH-XRF-resultater og er sammenstilt i Tabell 3. Resultatene diskuteres mot Lab-XRF og LECO i avsnitt 7.5.

6.4.2 Lab-XRF

Fullstendige analyseresultater av hoved- og sporelementer er gitt i Vedlegg 2 og Vedlegg 3. Svovelinnhold er oppsummert i Tabell 3. Figur 27 viser at prøvene tatt i Lillesand generelt har lave metallkonsentrasjoner, sammenlignet med normverdier (Lovdata, 2026). Kun noen utliggere, dvs. prøver med ekstreme konsentrasjoner sammenlignet med datasettet ellers, har høyere konsentrasjoner for de fleste analyserte metaller og arsen. Omtrent 25 % av prøvene har kromkonsentrasjoner over normverdi.



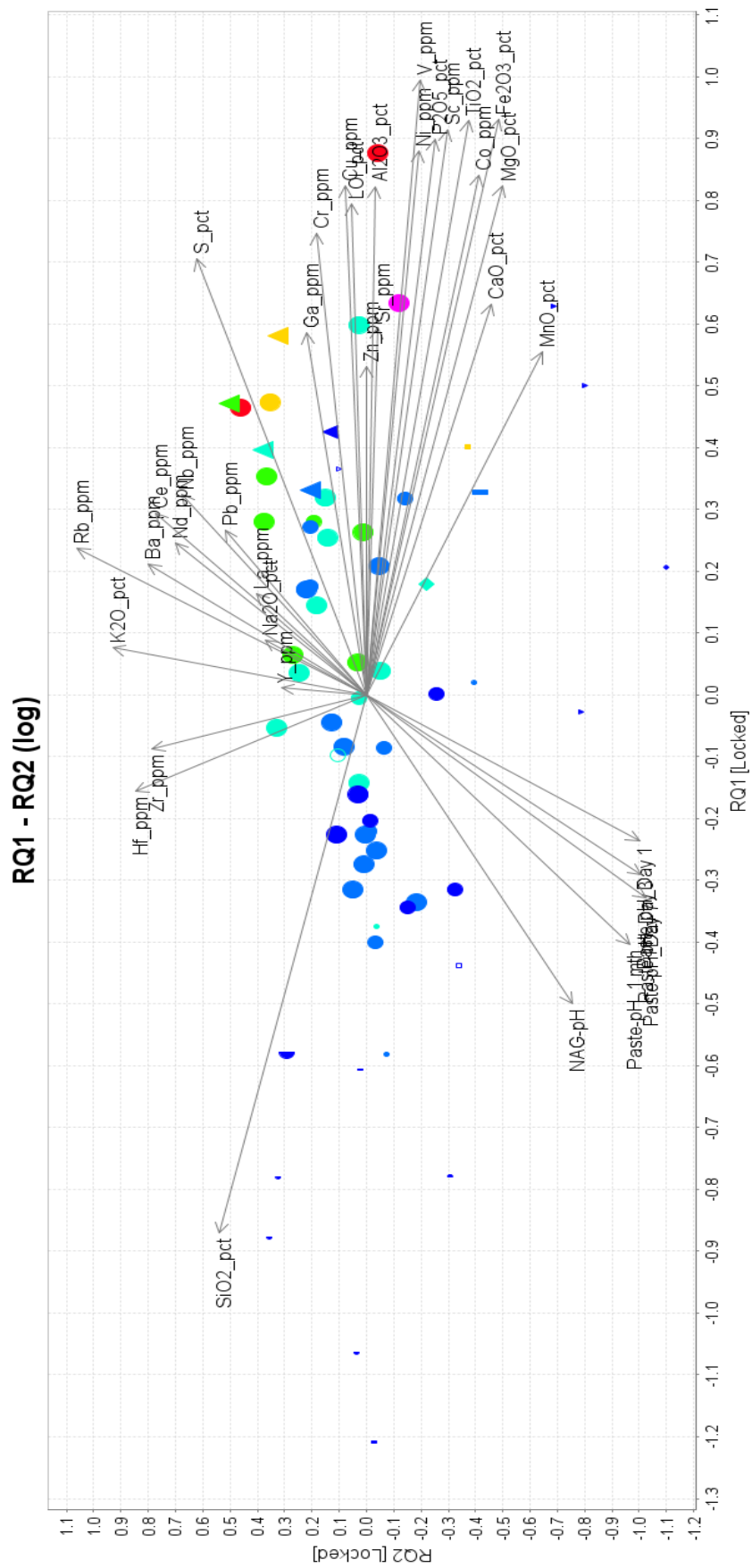
Figur 27. Analyseresultat (XRF, total) for arsen og tungmetaller i alle prøver. De blå prikkene motsvarer normverdiene for forurenset grunn (Lovdata, 2026).

Biplot, som Figur 28, viser samtidig både prøver (punkter) og variabler (grunnstoff; vektorer), i datasettet, og avslører relasjoner mellom begge prøver og analyserte variabler. Plottene hjelper med å identifisere dataklynger, identifisere ekstremverdier, visualisere korrelasjoner, og avgjøre hvilke variabler som bidrar mest til spesifikke klynger. Figur 28 viser plottet for de to fremste komponentene som viser de viktigste sammenhengene og variasjonene. Plot for de andre komponentene ligger i Vedlegg 10.

Punkter nær hverandre representerer prøver med lignende egenskaper, mens fjerne punkter indikerer ulikhet. Lengre vektorer indikerer at variabelen er godt representert i plottet. Små vinkler mellom vektorer antyder høy positiv korrelasjon, 90-graders vinkler tyder på ingen korrelasjon, og vinkler nær 180 grader indikerer negativ korrelasjon.

Å projisere et punkt på en variabelvektor indikerer verdien av observasjonen for den variabelen. Hvis et punkt ligger i samme retning som vektoren, har det en høy verdi; Hvis den er i motsatt retning, har den lav verdi. Klynger kan tolkes ved å se på hvilke vektorer (variabler) som peker mot dem, og vise hvilke variabler som styrer denne gruppen.

Figur 28 viser flere klynger på parametere som viser like egenskaper, for eksempel paste-pH og NAG-pH. Denne pH-klyngen er negativt korrelert med svovel og LOI (glødetap), som betyr at lavere pH-verdier samsvarer med høyere svovel og LOI. SiO₂ (ofte relatert til kvartsinnhold), som korrelerer med mange prøver med lav forskjell i paste-pH (små symboler) samt lav svovelkonsentrasjon (blå symboler), korrelerer negativt med en bred klynge av grunnstoff som for eksempel Cr, Mg, Mn, Fe og Ni samt svovel.

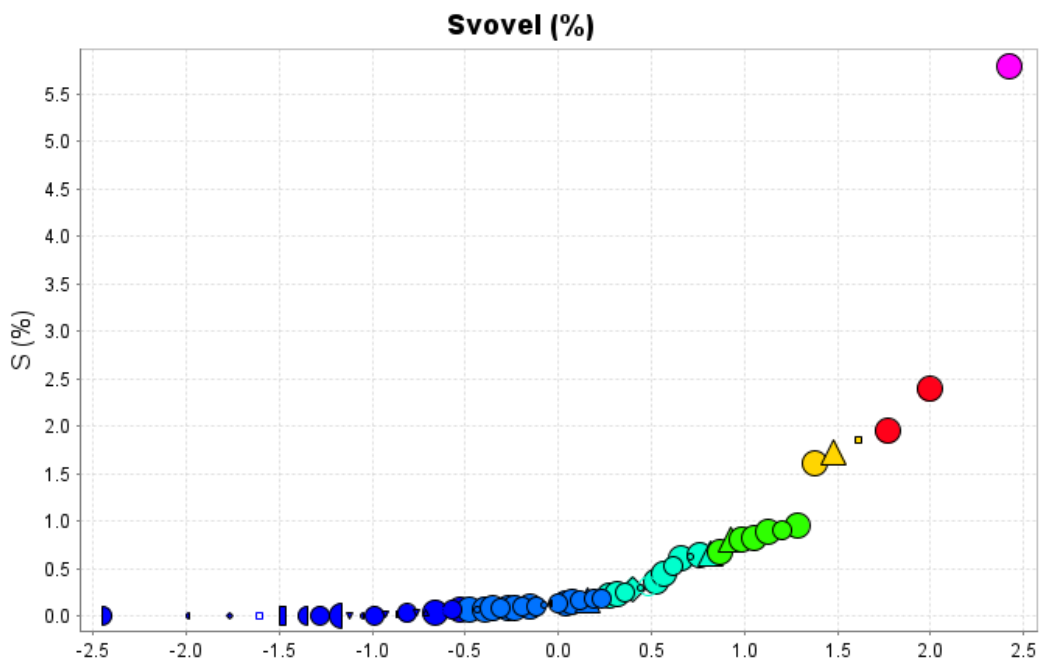


Figur 28. Bi-plot som sammenstiller resultat for alle analyserte grunnstoff og pH-verdier. XRF-resultatene er log-transformert før biplot-analyse i programvaren ioGAS

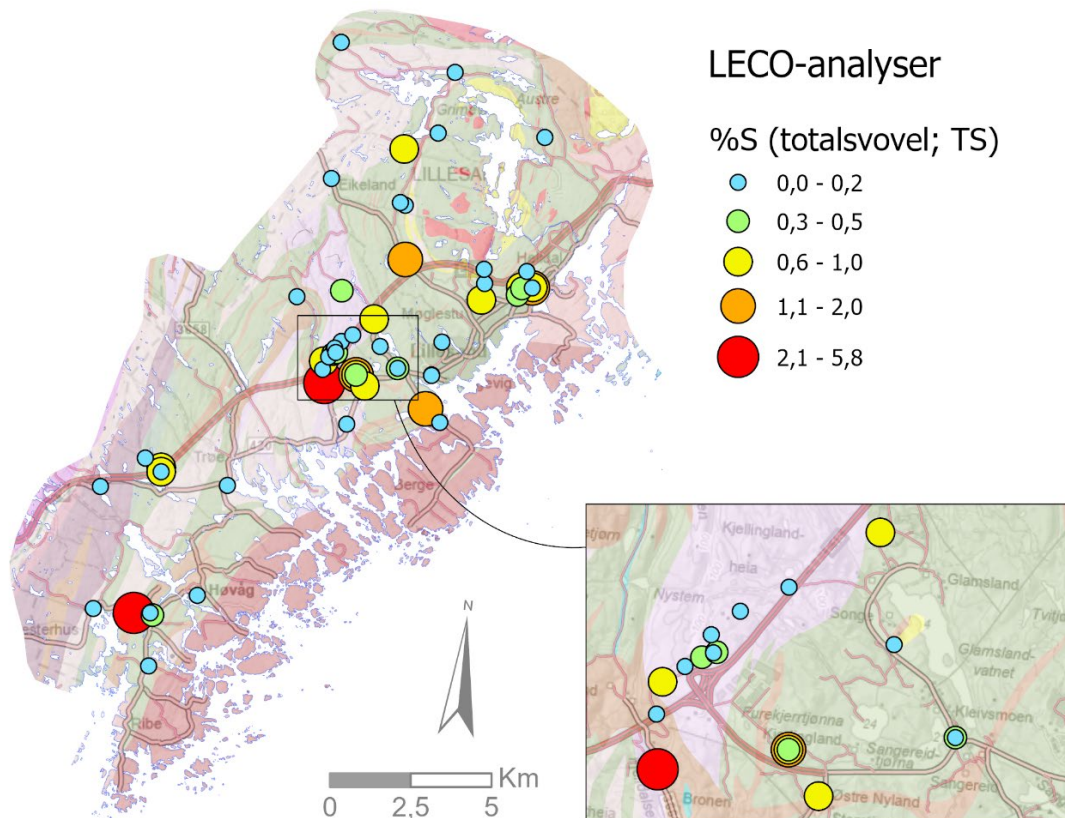
6.4.3 LECO – Totalsvovel (TS), Totalkarbon (TC) og Total Organisk Karbon (TOC)

Analyseresultatene for totalsvovel (TS), totalkarbon (TC) og total organisk karbon (TOC) er oppsummert i Tabell 3 og beskrevet i analyserapportene (Vedlegg 5 og Vedlegg 6). Svovelanalyser ved LECO omtales ofte som totalsvovelanalyser (TS) fordi svovelinholdet blir målt ved høytemperaturforbrenning av prøven i stedet for røntgenfluorescens (XRF). LECO-analyser av svovel er derfor også mer nøyaktig ved lave konsentrasjoner og er mindre påvirket av matriseeffekter.

Svovelinholdet varierer fra under deteksjonsgrensen (< 0,02 % S) til 5,7 % S (Figur 29). De fleste prøver har lite svovel (60 % av prøvene er under 0,2 % S), og kun 9 % av de analyserte prøvene har > 1 % S. De høyeste svovelskonsentrasjonene er hovedsakelig i metasandstein og glimmergneis. Det er ingen tydelig mønster i forhold til hvor prøver med ulikt svovelinhold fordeler seg geografisk (Figur 29) annet enn at de prøvene med høyeste konsentrasjon hovedsakelig kommer fra områder kartlagt som båndgneis på eksisterende kart. Et unntak er prøven fra nært Fjelldalselva, en av de mest svovelrike prøvene i datasettet, og som er «feilaktig» lokalisert i amfibolitt.

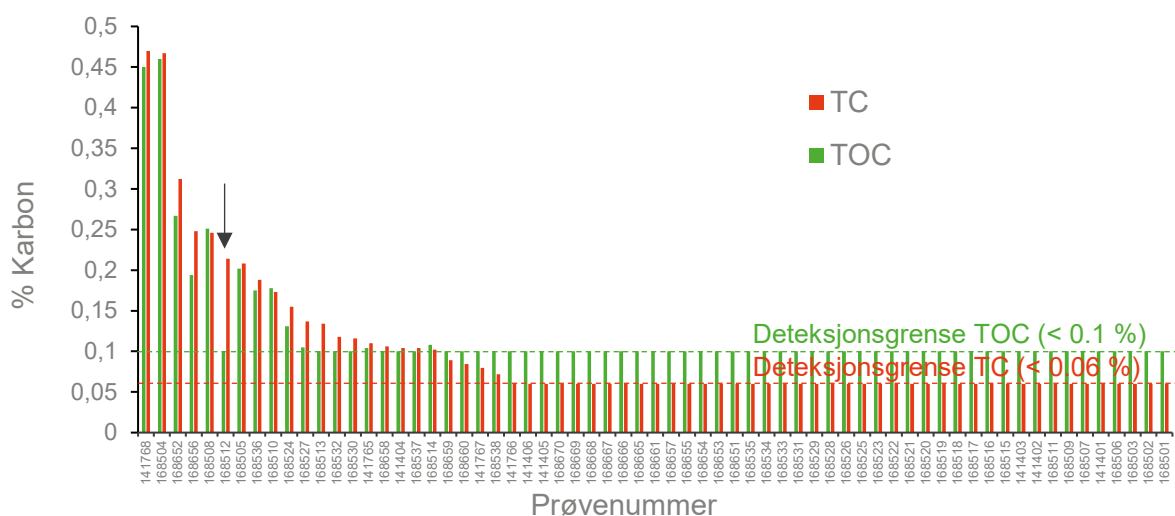


Figur 29. Sannsynlighetsgraf som viser svovelskonsentrasjoner analysert ved LECO for alle prøver.



Figur 30. Oversikt over LECO-analyser (forbrenningsanalyser) symbolisert etter %S (omtales oftest som totalsvovel; TS).

Analysene viser at det aller meste av karbonet i prøvene er organisk. Unntaket er prøve 168512 (sort pil i Figur 31) med 0,1-0,2 % TIC. Dette er en prøve av amfibolgneis hvor spormengder av kalkspat ble observert i tynnslip (Tabell 2).

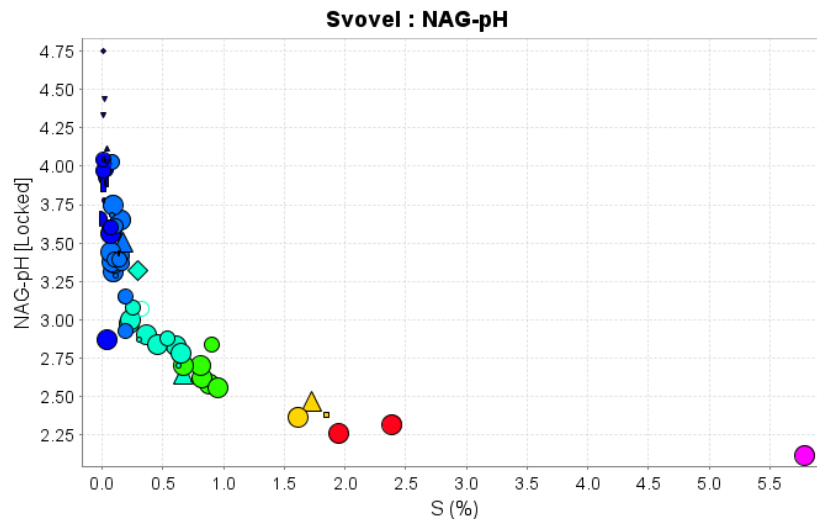


Figur 31. Søylediagram av analyseresultatene for total karbon (TC) og totalt organisk karbon (TOC). De fleste analyser er under deteksjonsgrensen (TC: < 0,06 %, TOC: < 0,1 %). Analysene viser at prøvene inneholder svært lite karbon. Differansen mellom TC og TOC er TIC (totalt uorganisk karbon), som er karbon bundet til karbonater. Kun en prøve (168512, sort pil) har signifikant TIC (0,1-0,2 %).

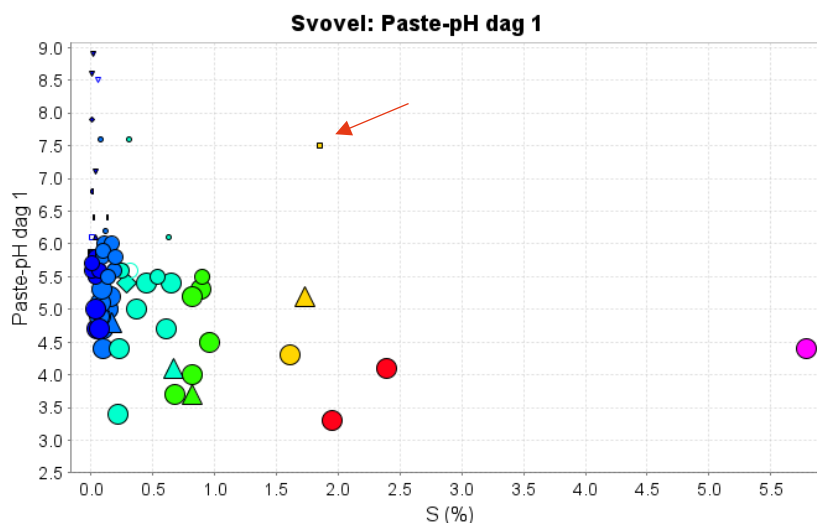
7. DISKUSJON

7.1 Sammenheng mellom svovel og pH

Svovel kan være bundet til ulike mineraler, og denne rapporten viser at det finnes en rekke ulike sulfider og sulfater i bergartsprøvene fra Lillesand. Sammenligning mellom pH-målinger og svovelinnhold (LECO) viser hvor godt svovelkonsentrasjonen korrelerer med syredanning (Figur 32 og Figur 33). Svovelinnhold er sterkt korrelert med NAG-pH ($R^2 = 0,84$; Figur 32), men svakere med paste-pH ($R^2 = 0,24$; Figur 33). Dette er som forventet for bergarter uten signifikant nøytraliseringspotensial, slik som bergartene i Lillesand, hvor NAG-pH utelukkende vil være styrt av svovelkonsentrasjonen. Korrelasjonen er dårligere mot paste-pH fordi paste-pH er avhengig hvor reaktive/lett løselige de svovelførende mineralene er i destillert vann. Siden prøvene fra Lillesandkomplekset inneholder reaktive sulfatmineraler vil disse gi lav paste-pH (< 6) selv ved svært lave svovelkonsentrasjoner (< 0,1 % S). Det er likevel slik at høyere svovelkonsentrasjon oftest er inverst korrelert med paste-pH. Et viktig unntak er amfibolgneis (prøve 168512) som avviker tydelig fra de andre prøvene med nær nøytral paste-pH (rød pil i Figur 33). Dette kan forklares med at svellelet i denne prøven er sterkt bundet til mineralfasen på grunn av mineraltype (dominerende svovelkis), kornstørrelse, omvandlingsgrad, og få mikrosprekker.



Figur 32. XY-diagram som viser sammenheng mellom svovelkonsentrasjon og NAG-pH. Korrelasjonskoeffisienten er 0.84.



Figur 33. XY-diagram som viser sammenhengen mellom svovelkonsentrasjon og paste-pH, avlest etter en dag. Korrelasjonskoeffisienten er 0,24. Legg merke til amfibolgneis med forhøyet svovelinnhold, men nøytral paste-pH (rød pil).

7.2 Klassifisering av syredannende bergarter i Lillesand kommune

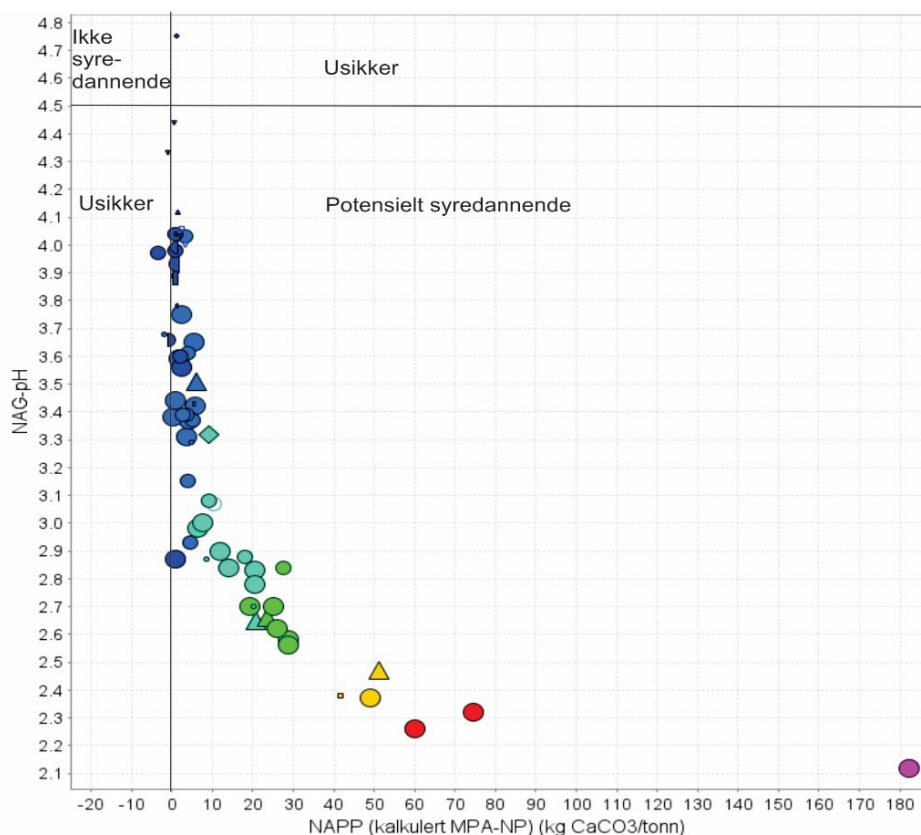
7.2.1 NAG-pH versus Netto syredannende potensial (NAPP)

Resultatene i denne rapporten viser at syredannende bergarter er utbredt i Lillesand kommune, men avgrenset til bestemte bergartsenheter hvorav metasandstein og glimmergneis innenfor Lillesandskomplekset er de viktigste.

Syredanningspotensialet kan klassifiseres ut ifra kjemiske analyser og pH-målinger. Netto syredannende potensial (NAPP; «Net Acid Production Potential») beregnes her ved å bruke maksimal syredanningspotensial (MPA; «Maximal Potential Acidity») kalkulert fra totalsvovel (% TS x 31,2) og nøytraliseringspotensial (NP) kalkulert fra total uorganisk karbon (% TIC x 83,34). For prøvene med TC eller TOC under deteksjonsgrensen har vi tatt konservativ innfallsvinkel (mest syredannende) og regnet ut minimum TIC-verdier (f.eks. dersom TC < 0,06 % og TOC < 0,1 % = TIC = 0 %).

I et NAPP vs. NAG-pH-diagram (Pierce mfl. 2016) faller ingen av prøvene innenfor feltet «Ikke-syredannende» (NAF; Figur 34). Prøver med NAG-pH høyere enn ca. 3 har NAPP nært 0, mens prøver med NAG-pH lavere enn ca. 3 viser en sterk økning i NAPP med lavere NAG-pH. Disse kan skilles generelt ved svovelkonsentrasjon (mørkeblå vs. grønne symboler; Figur 34).

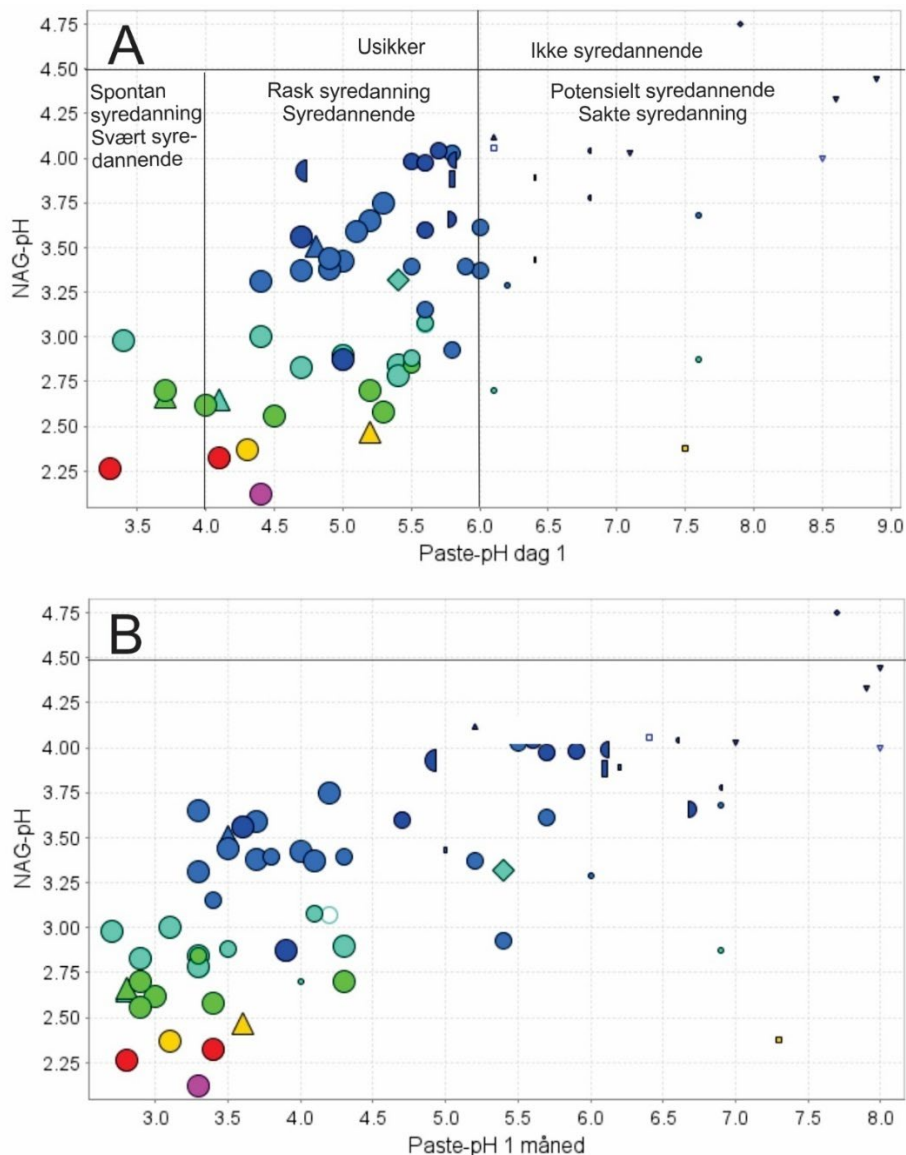
Denne klassifiseringen viser at mange av prøvene har svært lavt netto syredanningspotensial (NAPP < 5 kg CaCO₃/t), men gir likevel lav NAG-pH (< ~4; Figur 34). Dette er særegenhet ved de syredannende bergartene i Lillesand som i stor grad kommer av en kombinasjon av tre forhold: 1) lavt svovelinnhold (< ca. 0,2 % S), 2) betydelig andel reaktive/lett løselige svovelførende mineraler og 3) svært lavt innhold av nøytraliserende mineraler (f.eks. karbonater).



Figur 34. NAG-pH vs. NAPP (Netto syredanningspotensial). NAPP er i denne studien kalkulert fra totalsvovelinnhold (omregnet til maksimal syredanningspotensial; MPA) og total uorganisk karbon (omregnet til nøytraliseringspotensial; NP).

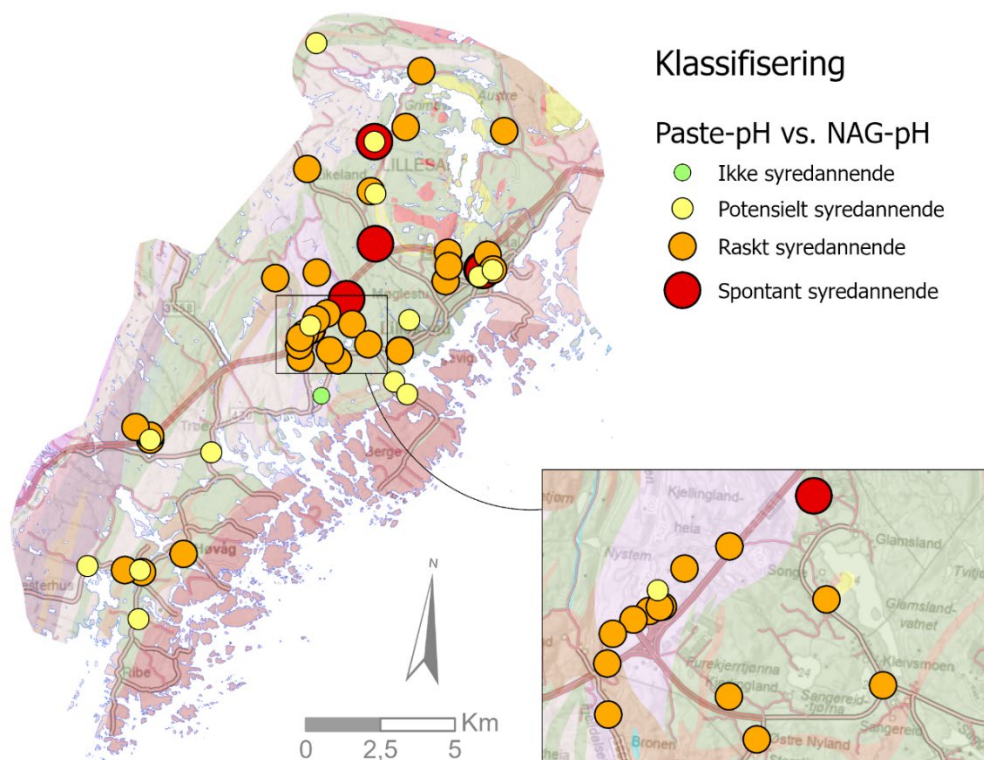
7.2.2 NAG-pH versus paste-pH

Klassifisering av syredanningspotensiale utføres av mange, særlig i gruvebransjen, ved å sammenligne NAG-pH og paste-pH (målt etter et døgn). Figur 35 visualiserer kategoriseringen av prøvene. Plottet viser at høy svovelkonsentrasjon (farge på symboler) korrelerer med lav NAG-pH. Da alle prøvene, unntatt én, resulterte i lav NAG-pH er det, i diagrammet, resultatet for paste-pH som avgjør syredanningspotensialet for prøvene. Figur 35B viser resultater fra paste-pH er avlest etter en måned. Mange flere prøver av glimmergneis og metasandstein har da beveget seg inn i kategorien raskt syredannende.



Figur 35. Klassifisering fra Weber mfl. (2006) av syredanningspotensiale, der A) paste-pH er avlest etter 1 dag og B) paste-pH er avlest etter 1 måned.

Prøvene som klassifiseres som «raskt» eller «spontan» syredannende er til stede i store deler av Lillesand kommune (Figur 36), og i grove trekk korresponderer de med områdene kartlagt som udifferensiert båndgneis på eksisterende berggrunnskart. Flere av prøvene av granittisk gneis, øyegneis og tonalittisk gneis klassifiseres som «potensielt» syredannende, men i realiteten kan ikke disse anses å ha noen reel forsursingsfare. Grunnen til dette er at svovelinnholdet er svært lavt (< 0,2 %) samtidig som de ikke inneholder reaktive/lett løselige svovelførende mineraler slik som bergartene i Lillesandkomplekset.



Figur 36. Oversikt over prøver klassifisert i henhold til paste-pH vs. NAG-pH.

7.3 Hvordan identifisere de syredannende bergartene i Lillesandkomplekset?

Analyser, feltobservasjoner og sammenstillinger viser at kun noen spesifikke bergarter utpeker seg som raskt eller spontant syredannende. Dette er paragneiser innenfor Lillesandkomplekset, vesentlig omvandlet metasandstein. Nedenfor gjennomgår vi noen typiske egenskaper for disse bergartene som også er oppsummert i Tabell 4.

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

Bergart	Metasandstein, meta-arkose og glimmergneis/-skifer i Lillesandkomplekset. 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 omvandlede 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

7.3.1 Feltkarakter

Omvandlet metasandstein og assosierte bergarter innenfor Lillesandkomplekset (meta-arkose, glimmergneis og -skifer) kjennetegnes i felt ved en karakteristisk gulaktig farge på eksponerte bergflater. Denne gulfargede omvandlings huden er relatert til sekundære svovelførende mineraler (f.eks. jarositt, schwertmannitt, markasitt) og spesielt utpreget på bruddplan og foliasjonsplan. Den må ikke forveksles med «normal», mer rustrød, farge som man ofte kan observere på bruddflater.

På utsprengte 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-utsprengte blotninger og utslåtte prøver ofte viser en grå båndet gneis. Slike observasjoner er lite egnet til å friskmelde bergarter som ikke akutt forsurende.

7.3.2 Mineralogi og svovelopptreden

Syredannende bergarter innenfor Lillesandkomplekset består hovedsakelig av kvarts, feltspat (oftest plagioklas) og biotitt. Ingen av de undersøkte prøvene av omvandlet metasandstein, glimmergneis eller meta-arkose inneholder karbonatmineraler. Svovel foreligger i en rekke ulike mineraler, både sulfider (svovelsulfid, magnetkis, markasitt), sulfater (jarositt, schwertmannitt) og stedvis som elementært svovel. Sulfidene viser ofte tegn på omvandling, hvorav magnetkis oftest er det sulfidmineralet som er sterkest omvandlet. I prøver med flere sulfidmineraler kan svovelsulfid være frisk og uomvandlet samtidig som magnetkis er sterk omvandlet. Tilstedeværelsen av magnetkis og omvandlingsprodukter (markasitt, jarositt, schwertmannitt og elementært svovel) er nøkkelen til å forklare hvorfor de syredannende bergartene i Lillesandkomplekset kan gi akutt forsurende av nærmiljøet.

7.3.3 pH-karakter

Generelt har bergartene i Lillesandkomplekset et nært fraværende nøytraliseringspotensiale pga. veldig lavt innhold av organisk og uorganisk karbon (ingen karbonatmineraler). Dette gjør at selv prøver med svært lavt svovelinhold ($< 0,1\% \text{ S}$) gir lav NAG-pH (< 4). NAG-pH er sterkt korrelert mot svovelskonsentrasjon (målt ved LECO) og det er kun prøver med $> 1\% \text{ S}$ som gir NAG-pH $< 2,5$.

Bergartene i Lillesandkomplekset skiller seg tydeligst fra de andre bergartene i kommunen ved å gi lav paste-pH (4 av 5 prøver lavere enn paste-pH 6). 7% av prøvene gir paste-pH < 4 og det er ingen god korrelasjon mellom paste-pH og svovelskonsentrasjon. Målingene viser at prøver med paste-pH $< 5,5$ fortsetter å produsere syre også etter en måned, selv ved lave svovelskonsentrasjoner.

7.3.4 Geokjemisk karakter

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

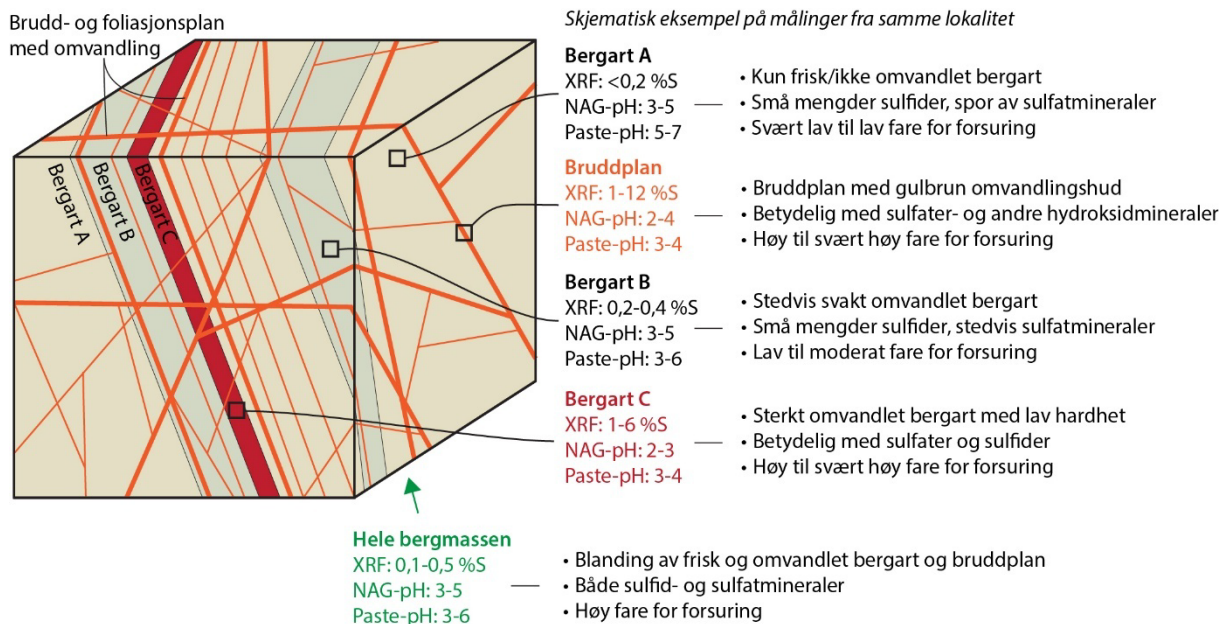
Prøvekolleksjonen i denne studien viser at laboratorieanalyser (XRF eller LECO) av prøver fra Lillesandkomplekset oftest gir relativt lave svovelskonsentrasjoner (median_{XRF} = $0,13\% \text{ S}$ og median_{LECO} = $0,18\% \text{ S}$). Kun 9% av prøvene har $> 1\% \text{ S}$ (LECO), som er langt lavere 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 laboratorieanalyser.

7.4 Modell for syredannelse fra bergarter i Lillesandskomplekset

Forsuring av vannresipienter og økologiske katastrofer forårsaket av syredannende bergarter i Lillesand kommune er først og fremst knyttet til omvandlet metasandstein, glimmergneis/-skifer og meta-arkose i Lillesandskomplekset. Denne konklusjonen understøtter i stor grad tidligere beskrivelser og tolkninger av syredanningsproblematikken fra blant annet Hagelia (2014, 2023) og Hagelia & Huizenga (2025). Til tross for at syredanningsproblematikken har vært kjent i lang tid, har nye økologiske kriser forekommet i flere omganger fra 1980-tallet og frem til i dag. En viktig grunn til dette er at eksisterende veiledere (NGI, 2015, 2021 og Prosjektgruppe Agder, 2023) og metoder (f.eks. H₂O₂-varmemåling) ikke er tilstrekkelig tilpasset de særegne egenskapene til de syredannende bergarter i Lillesandsområdet. Graden av forsuring fra disse bergartene har blitt og blir undervurdert av to grunner: 1) Svovelet er ujevnt fordelt i bergmassen og 2) svovelet foreligger også i svært reaktive/lett løselige mineraler.

Forenklet sett består en bergmasse/et bergvolum av to deler: bergarter (f.eks. granitt, glimmergneis, metasandstein) og bruddplan (f.eks. sprekker, forkastninger; Figur 37). I «normale» tilfeller (utenom Lillesandskomplekset) er svovel bundet til sulfider, og først og fremst svovelkis. Sulfidene er oftest jevnt fordelt i bergmassen, og bruddplan kan ha rustbrun farge som følge av den gradvise oksideringen av sulfidene og utfelling av sekundære jernhydroksidmineraler (+/- jernhydroksidsulfater). I slike tilfeller vil bergartsprøver med stor sannsynlighet være representative for bergmassen som helhet, og kan derfor brukes til å ekstrapolere syredannende egenskaper utover de spesifikke prøvene. Dette gjelder i mindre grad for bergartene i Lillesandskomplekset.

Bergarter i Lillesandskomplekset inneholder svovel som *ikke bare* er bundet til sulfider (magnetkis, svovelkis), men en rekke ulike sulfid- og jernhydroksidsulfatmineraler (markasitt, jarositt, schwertmannitt). Disse svovelførende mineralene er i tillegg ujevnt fordelt i bergmassen. Svovel opptrer oftest i små mengder (< 0,2 % S), men kan stedvis være høyere i bergartslag med høyere sulfidinnhold. På bruddplan med omvandling (guldfarget) er svovelet oftest bundet til sulfatmineraler, og disse planene kan være svært svovelrike (< 12 % S).



Figur 37. Skjematisk skisse av et bergvolum med metasandstein i Lillesand kommune. Tilstedeværelsen av tallrike sulfatførende bruddplan og stedvis svovelrike omvandlete lag, samt fraværet av nøytraliserende mineraler, gjør at bergmassen kan føre til rask, eller spontan syredanning selv om flere enkeltmålinger indikerer det motsatte.

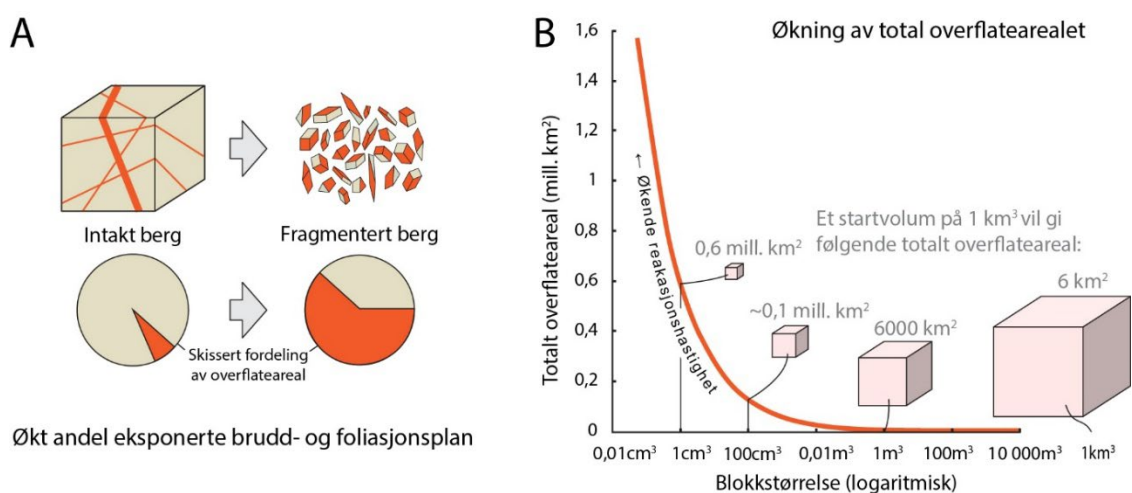
Figur 37 viser en modell av den geologiske situasjonen for de syredannende bergartene i Lillesandkomplekset. Figuren viser at den syredannende bergmassen ikke består av en homogen bergart, men av lag (noen ganger kalt «bånd») med varierende sammensetning (f.eks. ulik mengde biotitt) og en rekke brudd- og foliasjonsplan med gulffarget omvandlingshud. Bergmassen består vesentlig av bergart (metasandstein/meta-arkose) med svært lavt svovelinnhold ($< 0,2\%$ S; bergart A i Figur 37), men det finnes også lag hvor svovelinnholdet er forhøyet ($0,2-0,5\%$ S; bergart B) eller svært forhøyet ($> 1\%$ S; bergart C). De to sistnevnte utgjør et mindretall ved de fleste lokaliteter, men kan som oftest lett gjenkjennes ved større grad av gulffarget omvandling, mer skiffrighet og lavere mekanisk styrke (lett knuses med hammer). Den økende mengden gulffarget omvandling (bergart A \rightarrow B \rightarrow C) gjenspeiler en økende mengde jernhydroksidsulfatmineraler. Dette vises også i paste-pH-målinger hvor lite omvandlede bergarter med lavt svovelinnhold (bergart A) typisk gir paste-pH = 5–7, mens sterkt omvandlede bergarter med høyere svovelinnhold (bergart C) gir paste-pH = 3–4.

Brudd- og foliasjonsplan i de syredannende bergartene i Lillesandskomplekset har gjerne en gulffarget omvandlingshud som gjenspeiler tilstedeværelsen av jernhydroksidsulfatmineraler. Disse planene er typisk svært svovelrike ($1-12\%$ S) og gir svært lav NAG- og paste-pH (pH $\sim 2-4$).

Enkeltprøver av en slik bergmasse (Figur 37) kan føre til en undervurdering av faren for forsurening fordi den volummessig domineres av bergarter med lavt svovelinnhold og lite umiddelbar endring av pH (bergart A). Det er derimot tilstedeværelsen av tallrike sulfatførende bruddplan og stedvis svovelrike omvandlede lag, samt fraværet av nøytraliserende mineraler, som gjør at bergmassen kan føre til rask, eller spontan syredanning, selv om flere enkeltmålinger indikerer det motsatte. Utstrakt bruk av HH-XRF i felt og strategisk prøvetaking med fokus på å representere hele bergmassen er derfor sterkt anbefalt.

En annen faktor som styrer graden og hastigheten av forsurening, er sammenheng mellom omvandling, oppsprekkingstetthet og fragmentering av bergmassen, slik som det vises i Figur 38. Sprengning og fragmentering av en bergmasse til mindre biter har to viktige effekter:

- Ved sprengning vil bergmassen fortrinnsvis sprekke opp langs brudd- og foliasjonsplan. For syredannende bergarter i Lillesandkomplekset vil dette bety at en større andel av omvandlede brudd- og foliasjonsplan blir eksponert for kontakt med luft og vann (Figur 38A).
- Sprengning fører også til at overflatearealet øker, fordi oppdeling av en blokk i små fragmenter fører til et høyere totalt overflateareal enn det den opprinnelige blokken av intakt berg hadde (Figur 38B).



Figur 38. Fragmentering av bergmassen har to viktige effekter: A) økt andel eksponerte brudd- og foliasjonsplan relativt til bergart og B) økning av det totale overflatearealet. Samlet sett bidrar disse til at fragmentert bergmasse kan ha svært ulikt påvirkning på nærmiljøet sammenlignet med intakt fjell.

Økt overflateareal fører til at mange flere bergflater (overflater og bruddplan) eksponeres for luft og vann, som i sin tur vil kunne påvirke pH. Mineralogi er avgjørende for syredanningspotensialet, men syredanningshastighet (rate) er i tillegg avhengig av kornstørrelse, overflateareal, sprekke- og porositet, porøsitet og permeabilitet (innvendig hulrom, og tilgjengelighet av og mellom hulrom/porerom). Kombinasjonen av mineralogi (svovelmineral og bergart), tetthet av bruddplan og fragmentstørrelse er derfor helt avgjørende for syredannelse.

Sulfatmineraler på bruddplan kan reagere mye raskere enn sulfidene i bergartene. Desto større andel av overflaten som består av brudd- og foliasjonsplan med omvandling, desto raskere syredannelse. Noen sulfider omvandles raskere til sulfater enn andre, for eksempel magnetkis omvandles mye raskere enn svovelkis. Når sulfider har blitt omdannet til sulfater, vil omvandlings- og syredanningsgrad øke

7.5 Representativitet og analysemetoder

7.5.1 Prøvetaking

Feltprøver utgjør grunnlaget for alle lab-analyser. Det er derfor avgjørende at det blir tatt representative prøver av hele bergmassen i et område for å få grunnleggende dokumentasjon om bergarten har et syredanningspotensiale. Med hele bergmassen menes både friske lag, omvandlede lag, og bruddsoner, inkludert utfelling av mineraler på bruddplan og omvandling i bergarten inn mot bruddplan. Det er viktig å huske at naturlig blotninger som har vært eksponert siden siste istid kan fremstå grå (uten gulffarget omvandling) på grunn av utvasking. Det må derfor bli tatt like mange prøver i en fersk og tilsynelatende frisk skjæring / område, som i områder hvor den eksponerte bergflaten er omvandlet.

Bergarter med syredanningspotensiale i Lillesand er lagdelte og utgjøres av vekslende lag av metasandstein- og meta-arkose, med enkelte lag av glimmergneis, med varierende mektighet og sammensetning (f.eks. ulik mengde biotitt, og sulfider). Metasandstein har i tillegg en intern variasjon i sammensetning, avhengig av mengde av biotitt, sulfider, lagtykkelse, tetthet mellom og tykkelse på foliasjonsplan (Figur 9A). I tillegg er det utallige brudd og foliasjonsplan med gulffarget – gulgrå omvandlingshud.

I slike lagdelte, heterogent sammensatte bergmasser er det derfor viktig å lage et prøveprofil som inkluderer alle lag med *forskjellig* sammensetning for å kunne dokumentere variasjonen i bergmassen gjennom senere analyser. Prøvetetthet må tilpasses den totale bergmassen og kan ikke oppgis som et fast antall pr. areal eller løpemeter. Dette betyr at det må være høy tetthet mellom prøver, der lag med varierende sammensetning, og/eller variasjon i omvandlingshud (tykkelse, farge) veksler hyppig (tett) med hverandre. For en bergmasse av mer homogene, tykkere lag, vil det ikke være behov for så høy prøvetetthet.

Erfaring fra Lillesand har vist at hvis bergarten er omvandlet eller er oppsprukket, må det tas flere prøver av samme lag. For å få god nok dokumentasjon av tilstedeværelse av svovel og mineralisering, må det tas prøver av:

- frisk bergart
- omvandlet berg(over)flate
- omvandlingshud – inkludert fargeforskjeller
- foliasjonsplan
- bruddplan
- mineralutfelling i brudd
- oppsmuldet bergart

Målinger med håndholdt XRF i felt har dokumentert til dels store variasjoner i svovelinnhold på ulike flater med omvandlingshud på samme bergart (Figur 25 og Figur 26) (gjerne definert som gulgrå–gusjegule–gulbrune fargenyanser). Tykkelsen på omvandlingshud kan også gi et signal på hvor lett en bergart kan omvandles, for så å bli syredannende

Mineralogiske analyser av prøvematerialet (innsamlet etter punktene ovenfor), viser tilstedeværelse av både svovelkis og magnetkis, hvorav sistnevnte ofte er sterkt omvandlet. Disse sulfidene forekommer sammen med flere sekundære mineraler som jernhydroksidsulfatmineraler (jarositt, schwertmannitt mfl.), markasitt og elementært svovel. Det er sekundærmineralene som gir bergarten den karakteristiske gulfargen på omvandlete flater, og som forårsaker den raske endringen i pH dokumentert ved paste-pH-målingene.

Det kan synes tidkrevende og kostbart med så høy tetthet av prøver. Erfaring og analyseresultater i dette arbeidet har imidlertid vist målinger av paste-pH (fra finknust materiale) er en rimelig og effektiv metode for påvisning av syredanningspotensialet i bergartene i Lillesand. Det er i tillegg viktig å forholde seg til listen ovenfor- da det har vist seg at syredanningspotensialet påvirkes av omvandlingshud, bruddplan, mineralutfelling i brudd, og smuldringsgrad i tillegg til fordeling og sammensetning av mineraler i forskjellige lag. Omvandlingshud på en prøve må ikke kuttes bort, da det vil gi feil analysegrunnlag. Alternativt kan prøven deles i to, hvor omvandlingshud analyseres for seg. Prøvetaking på denne måten, med tilhørende målinger av paste-pH kan også friskmelde bergarter i et område. Det er viktig å understreke at dette krever representative prøver av den totale bergmassen.

7.5.2 Representativitet i lab

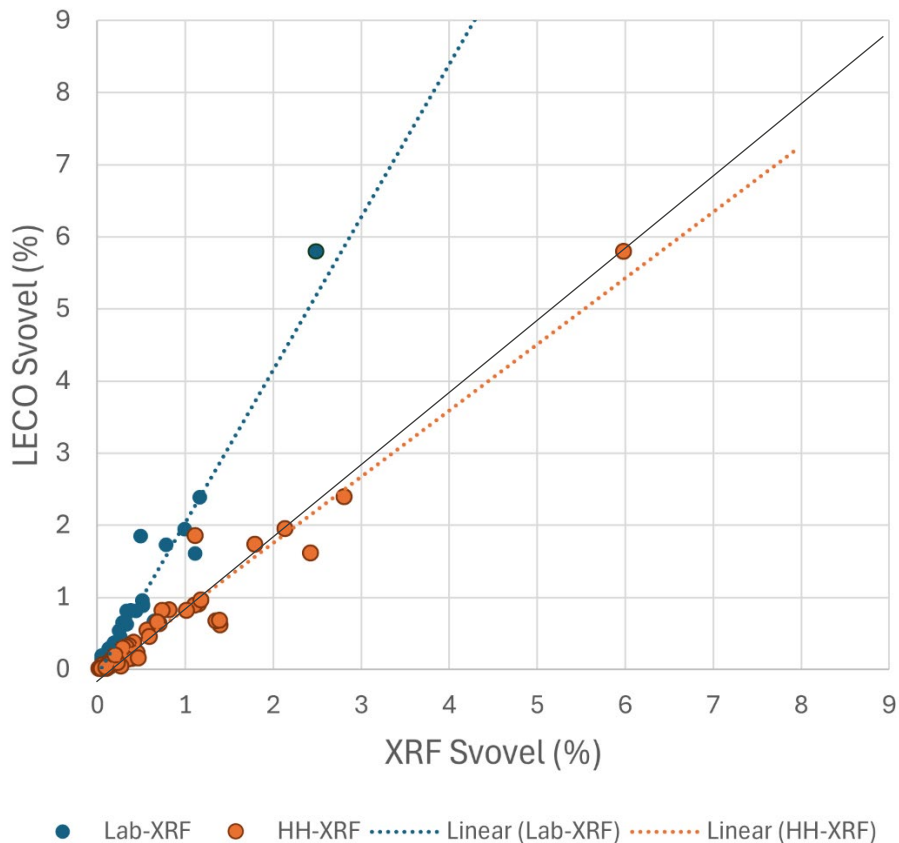
Foran en kjemisk analyse veies generelt en veldig liten prøvemengdene til analyse, hvilket kan gi noen utfordringer for presisjonen av analyser. En lav innvekt gir opphav til noen utfordringer da prøven skal være så representativ som mulig for materialet som prøven er tatt fra. En liten prøve setter store krav til homogenitet, samt at det er lagt vekt på minimal kontaminering av prøve under preparering. Homogenitet betyr, ved lav innvekt, at prøven burde være så finfordelt som mulig, derfor knuses og mølles prøvene før lab-XRF, LECO-analyser samt NAG-pH analyser. Den samme problemstillingen gjelder også for mikroskopering av tynnslip, hvorav tynnslipet representerer et minimalt volum av den prøvetatte bergarten.

7.5.3 Svovelanalyser

Tilstedeværelsen av svovel er helt sentral for syredanning fra berggrunnen. I denne rapporten har vi vist at selv bergarter med svært lite svovel (< 0,1 % S) kan være med å bidra til den umiddelbare forsureningen av nærliggende vannresipienter på grunn av tilstedeværelsen av reaktive sulfatmineraler og sterkt omvandlet magnetkis.

Prøvene som analyseres ved LECO og XRF (lab) er knust og møllet og gir den totale svovelkonsentrasjonen der overflater og frisk bergart er blandet. Selv om lab-analyser er mer presise enn håndholdt XRF, så er slike analyser av de syredannende bergartene i Lillesandkomplekset mindre representative for det faktiske svovelinnholdet ved lokaliteten. Grunnen er sammensatt, men avhengig av hvordan man tar prøver (geologer er opplært til å unngå forvittra prøver) og hvordan laboratoriene behandler prøvematerialet (mange laboratorier skjærer bort omvandlingshud), samt at det er vanskeligere å fange opp variasjonen i bergarten med få prøver kontra mange analysepunkter med håndholdt XRF.

Resultater fra LECO- og XRF-analyser av svovel (lab) indikerer for begge analysemetoder det totale innholdet av svovel i prøvene. Likevel viser Figur 39 en stor forskjell i resultat mellom LECO- og XRF-analyser gjort på lab fra samme prøve. Forbrenningsanalysen gjort ved LECO er forventet å gi det mest riktige svaret, da svovel er kjent som et vanskelig grunnstoff å analysere ved lab-XRF. Det er derfor viktig å huske at svovelkonsentrasjoner analysert ved lab-XRF kan vise konsentrasjoner som kun utgjør halvparten av det reelle svaret. Svovelanalyser utført ved bruk av håndholdt XRF har en bedre overenstemmelse med LECO-analysene. Det må poengteres at alle analyser er gjort på homogenisert, pulverisert prøve, og det ble ikke målt rett på bergart.



Figur 39. Sammenligning av svovelinnhold analysert ved lab-XRF og LECO, hvorav sistnevnte analysemetode gir dobbelt så høye svovelverdier. Sammenligning av HH-XRF (målt på samme pressete tabletter som lab-XRF) og LECO gir et bedre samsvar. Svart linje viser 1:1-forholdet.

7.6 Syredanning i løsmasser

Syredanningsprosesser foregår ikke bare i bergarter, men også i løsmasser. Løsmasser som for eksempel marin leire, men også morene som har sin opprinnelse i sulfidførende bergarter, kan inkludere sulfider. Sulfider i marin leire har blitt etablert under anoksiske dannelsesforhold, og vil ved menneskelig påvirkning gjennom f.eks drenering, omvandles til sulfater.

Syredannings- og metallutlekkingsprosessene er derfor akkurat de samme i disse «ferske» løsmassene som i syredannende bergarter. Da vann renner gjennom disse, ender det sure vannet og metaller ut i bekker og andre vassdrag med en påfølgende negativ miljøpåvirkning.

Syredannende løsmasser er ikke undersøkt i dette studiet, så det er ikke mulig å kommentere på mulig oppreden av disse. Svovelførende løsmasser må prøvetas og analyseres separat gjennom pH-inkubasjonstester.

8. KONKLUSJONER OG VEIEN VIDERE

De viktigste konklusjonene fra prosjektet er:

- Syredannende bergarter i Lillesand kommune er utbredt, men samtidig avgrenset til en spesifikk gruppe med bergarter innenfor det såkalte Lillesandkomplekset.
- Lillesandkomplekset består hovedsakelig av paragneiser som videre kan deles inn i metasandstein, meta-arkose, glimmergneis/-skifer og kvartsitt. De fleste av bergartene innenfor dette komplekset er på nåværende berggrunnskart betegnet som udifferensiert båndgneis.
- Gulaktig til gulbrun og gulgrå omvandling i bruddsoner og på eksponerte bergflater er en svært viktig feltkarakter ved de syredannende bergartene innenfor Lillesandkomplekset. Vi anbefaler at man bruker begrepet «omvandlet metasandstein» om de klassiske gulforvitrede syredannende paragneisene i Lillesand.
- De syredannede bergartene i Lillesandkomplekset består hovedsakelig av kvarts, feltspat og glimmer (vesentlig biotitt). Over halvparten av prøvene har lavere svovelkonsentrasjoner enn 0,2 % S [LECO]), men det forekommer store forskjeller mellom friske overflater (lavt) og brudd- og foliasjonsplan (høyt). Enkelte lag er svært glimmerrike og har vesentlig forhøyet svovelinnhold (< 5,8 % S [LECO]).
- Nøytraliseringspotensialet til alle de prøvetatte bergartene er tilnærmet lik null ettersom de ikke inneholder mineraler med effektiv bufferkapasitet slik som karbonatmineraler. Unntaket er en amfibolgneis som inneholder små mengder kalkspat.
- Alle innsamlete prøver har lav NAG-pH (< 4,75), mye på grunn av fraværet av mineraler med effektiv bufferkapasitet. Dette medfører også at NAG-pH korrelerer sterkt ($R^2 = 0,84$) med svovelinnhold (totalsvovel ved LECO). Det bør i fremtiden vurderes om det er tilstrekkelig med totalsvovelanalyser.
- Det er stor variasjon i resultatene fra paste-pH-målingene. Kun bergarter i Lillesandkomplekset har paste-pH < 6, og 7 % av disse prøvene har paste-pH < 4. For bergarter i Lillesandkomplekset er median av NAG-pH = 3,22, mens median av paste-pH = 5,35.
- De syredannende bergartene i Lillesandkomplekset består hovedsakelig av kvarts, feltspat (ofte plagioklas) og biotitt. Karbonatmineraler er fraværende i alle studerte prøver utenom amfibolgneis. Sulfider forekommer som både svovelkis og magnetkis. Mengden sulfider er tilsynelatende korrelert med syredanningspotensialet. Prøver hvor magnetkis er det dominerende sulfidmineralet ser ut til å gi høyere syredanningspotensial og kan kanskje forklares ved at magnetkisen er enklere å bryte ned, sammenlignet med svovelkis.
- Magnetkis blir omvandlet til markasitt, goethitt og gedigen svovel. Nedbryting av svovelkis fører til utfelling av schwertmannitt og jarositt. Omvandling av magnetkis til jarositt er ikke observert i de studerte prøvene. Magnetkis er vesentlig mer reaktivt enn svovelkis, og svovelkis viser liten grad av nedbryting i tynnslipp prøvene. Schwertmannitt og jarositt er hovedsakelig relatert til sprekker i bergartene, og kun tidvis et resultat av *in situ* erstatning av svovelkis. Det totale innholdet av sulfider kan i stor grad relateres til pH-målingene og total svovel. Tidvis frakobling mellom observerte sulfider og svovel/pH-målinger kan forklares med heterogen distribusjon av sulfider i bergartene, eller lokal opptreden av kalkspat som pH-buffer.
- De syredannende bergartene i Lillesandkomplekset («omvandlet metasandstein») klassifiseres hovedsakelig som raskt eller spontant syredannende. Dette gjelder også prøver med svært lavt innhold av svovel (< 0,1 % S [LECO]). Grunnen til dette er tilstedeværelsen av jernhydroksidsulfatmineraler (f.eks. jarositt og schwertmannitt) som

omvandlingsprodukter av svovelkis. Disse mineralene reagerer spontant i kontakt med luft og nøytralt til svakt surt vann og produserer svovelsyre. I mangel på mineraler med effektiv bufferkapasitet vil selv små mengder sulfatmineraler føre til en rask forsuring av nærliggende vannresipienter.

- Tilstedeværelse av tallrike sulfatførende bruddplan og stedvis svovelrike omvandlete lag, samt fravær av nøytraliserende mineraler, gjør at bergmassen kan føre til rask, eller spontan syredanning selv om flere enkeltmålinger indikerer det motsatte.

Evaluering av videre arbeid

I prosjektforslaget som ble lagt til grunn ved oppstarten av prosjektet ble det formulert tre spørsmål for evaluering etter feltarbeid og analyser:

1. Er det behov for ny kartlegging, eller er kartgrunnlaget godt nok?
2. Er grunnlaget (etter feltarbeid og analyser) godt nok til å avgrense områder med sannsynlig syredannende bergarter?
3. Er det fortsatt usikkerhet/kunnskapshull rundt prosessene som forårsaker forsuring fra syredannende bergarter som må undersøkes videre?

Svarene på disse spørsmålene er:

1. Ja, det er behov for ny kartlegging fordi utbredelsen av syredannende bergarter (omvandlet metasandstein, kartlagt som «båndgneis» på eksisterende kart) er unøyaktig og stedvis feil. Dagens berggrunnskart angir at det finnes båndgneis i enkelte områder hvor det i realiteten er ikke-syredannede bergarter, og at enkelte områder består av ikke-syredannende bergarter mens de i virkeligheten gjør det.
2. Nei, kartleggingsgrunnlaget per i dag er ikke godt nok til å avgrense områder med sannsynlig syredannende bergarter med en nøyaktighet som tilfredsstillende behovet i arealplanlegging.
3. Ja. Selv om forståelsen av prosessene som forårsaker forsuring fra de syredannende bergartene i Lillesand har blitt mye høyere, så gjenstår det fremdeles å bygge et sterkere datagrunnlag som gjør en til stand å bestemme de definitive faktorene som innvirker på syredanningspotensialet.

Vi anbefaler at det utføres ny berggrunnskartlegging i Lillesand kommune med fokus på å forbedre detaljeringen av hvor det finnes syredannende bergarter og hvilke områder som kan friskmeldes. Med ny kunnskap forsket frem i dette prosjektet, samt tilgang til nye fjernanalysedata (flygeofysikk og detaljert høydemodell), kan man gjennomføre en effektiv kartlegging av område og sammenstille et nytt berggrunnskart som vil ha stor verdi for lokalsamfunnet, næringsliv og naturmiljøet i Lillesand kommune.

9. REFERANSER

- 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. <http://www.amira.com.au/documents/downloads/P387AProtocolBooklet.pdf>
- Asta, M.P., Cama, J. & Acero, P. (2010). Dissolution kinetics of marcasite at acidic pH. *European Journal of Mineralogy*, 22.
- Bigham, J. M., Schwertmann, U., Traina, S. J., Winland, R. L. & Wolf, M. (1996). Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1996 Vol. 60 nummer 12 s. 2111-2121.
- Bjerkgård, T. & Nordgulen, Ø. (2002). Sulfidførende gneiss E18; Geokjemi og petrografi, NGU rapport 2002.052 [2002_052.pdf](http://www.ngu.no/rapporter/2002_052.pdf)
- Dewaal, S.A. (1984). Experimental Simulations of the Supergene Reaction: Pyrrhotite → Marcasite + Fe²⁺ + electrons
- Frigstad, O.F. (2009). Sulfidholdige bergarter i Kristiansandregionen, Rapport til Arealprosjektet, Kristiansand kommune. Utarbeidet av Agder naturmuseum og botaniske hage
- Hagelia, P. (2015). Impact of iron sulfides and secondary sulfate minerals on the potential for acid rock drainage (ARD). *12th Urban environment symposium urban future for a sustainable world, Oslo*. Available at: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17208.65287>.
- Hagelia P. (2023). Sur avrenning frå rusta svovelførende gneis. Statens vegvesen rapport 922. <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/3083450>
- Hagelia P. & Fjermestad H. (2016). Bruk av XRF på bergarter for vurdering av miljørisiko. Eksempel frå Rv 4 Gran og E18 Grimstad-Kristiansand. Statens vegvesen rapport 516. <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/2671251>
- Hagelia, P. & Huizenga, J. M. (2025). Acid Rock Drainage Caused by Hydronium-Bearing and Fe-Deficient Jarosite: An Example from Lillesand, Southern Norway. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5239518> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5239518>
- Hindar, A. (2012). E18 Grimstad-Kristiansand gjennom sulfidholdige bergarter - syreproduksjon og effekter på avrenningsvann. Norsk vannforening. <https://vannforeningen.no/dokumentarkiv/e18-grimstad-kristiansand-gjennom-sulfidholdige-bergarter-syreproduksjon-og-effekter-pa-avrenningsvann/>.
- Hindar, A., & Lydersen, E. (1994). Extreme acidification of a lake in southern Norway caused by weathering of sulphide-containing bedrock. *Water, Air, and Soil Pollution*, 77, 17-25. <https://doi.org/10.1007/bf00483048>
- Hindar, A., & Nordstrom, D. K. (2015). Effects and quantification of acid runoff from sulfide-bearing rock deposited during construction of Highway E18, Norway. *Applied Geochemistry*, 62, 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.016>
- 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. Master of Science thesis. Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. [2024-Karlsen.pdf](https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/3148285) <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/3148285>
- Kocabag, D., Shergold, H.L. & Kelsall, G.H. (1990). Natural oleophilicity/hydrophobicity of sulfide minerals, II. Pyrite. *Int. J. Miner. Process.* 29, 211.
- Lovdata (2026). Forskrift om begrensning av forurensning (forurensningsforskriften). https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-931/*#*; (åpnet februar 2026)
- Multiconsult. (2020). Agderparken Nord, Arendal, Miljøtekniske grunnundersøkelser, berggrunn.

- NGI. (2015). Identifisering og karakterisering av syredannende bergarter. Miljødirektoratet rapport M-310. <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m310/m310.pdf>
- NGI. (2021). Håndtering av potensielt syredannende svartskifer. Miljødirektoratet rapport M-2105. <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2022/januar/handtering-av-potensielt-syredannende-svartskifer/>
- NIVA. (1992). Ekstreme aluminiumskonsentrasjoner og lav pH i Langedalstjønna, Lillesand kommune, årsaker, virkninger og mulige tiltak, <https://vann-nett.no/service/attachment/5103-487-M/181>
- NIVA. (2006). Utsprengning i sulfidholdig berggrun på Storemyr i Lillesand – effekter på vannmiljø og forslag til tiltak (NIVA-rapport 5316-2006)
- NIVA. (2010). Kartlegging av økologisk tilstand i Moelva, Lillesand (NIVA-rapport 6073-2010) <https://core.ac.uk/download/pdf/30884283.pdf>
- NIVA. (2010). (NIVA-rapport 6041-2010) [Forslag Til Overvåkingsplan for Vannforekomster I Vannregion Agder - DocsLib](#)
- NIVA. (2021). (NIVA-rapport 7679-2021) [Resipientundersøkelse for Lillesand kommune 2021 i forbindelse med utslipp av kommunalt avløpsvann](#)
- Novatem. (2017). Fixed-wing magnetic and radiometric survey over Agder in southern Norway (AFS-16 Agder fixed-wing survey). Novatem Operations Report C16116.
- Nystuen, J.P. (1986). Regler og råd for navnsetting av geologiske enheter i Norge, kapittel 3.3. [Nystuen, J.P. \(Ed\) 1986 - Norske regler - Norsk-Strat-Komite-NGTvol66supplement1_1986-OCR.pdf](#)
- Padget, P. (1993). Berggrunnskart N50 Høvåg 1511-2, Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
- Pearce, A. (2018). A Mineralogical and Geochemical Description of Potentially Acid-producing Gneisses from the Lillesand Area, Implications for Leaching Behaviour, Master Thesis geosciences, Universitet i Oslo, juni 2018, Available at: <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-66959>.
- Prosjektgruppe Agder. (2021). Retningslinjer for tiltak i områder med syredannende gneis. Felles saksbehandlingsrutiner, krav til prøvetaking, klassifisering av steinmasser og miljøoppfølging. [Retningslinjer](#)
- Skjønborg, I. (2023). An evaluation of methods for acid rock drainage prediction. Master of Science thesis, Oslo Universitet. <https://www.duo.uio.no/handle/10852/105981>
- Starmer, I, 1983. Manuskart, N50 Høvåg1511-2, NGU, Norges geologiske undersøkelse.
- Svendby, A.K, Bingen, B., Torgersen, E., Andersson, M., Nordgulen, Ø., Granseth, A, Olesen, O., Tetreault, J., Gellein, J. & Larsen, B.E. (2026). NGU Rapport 2026.010, BRUK-Berggrunnsressurser og utfordringer i Kristiansand kommune.
- Torgersen, E., Andersson, M. & Svendby, K. (2024). Hva er syredannende bergarter og hvilken kunnskap har vi om disse i dag? Abstrakt Fjellsprengningskonferansen 2024. <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2024/11/259534-Fjellsprengningskonferansen-2024-bok.pdf>
- Tveten, E. & Nilsson, L.P. (2005). E18 Grimstad-Kristiansand. Geologisk kartlegging 2005. NGU rapport 2005-052 NGU Rapport 1-279A. aps.ngu.no/pls/oradb/rf.Visdok?c_dokid=0000052552
- 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. 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Published by the American Society of Mining and Reclamation (ASMR). pp 2289-2310 DOI: 10.21000/JASMR06022289

10. VEDLEGG

Vedleggene 1–11 nedenfor er tilgjengelige digitalt ved nedlastning fra:

https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2026/2026_013_Vedlegg.zip

Vedlegg 1 – Håndholdt XRF, rådata og sammenstilling med feltobservasjoner

Vedlegg 2 – XRF hovedelementer, analyserapport

Vedlegg 3 – XRF sporelementer, analyserapport

Vedlegg 4 – Petrofysiske målinger (tetthet, magnetisk susceptibilitet, remanens mm.), analyserapport

Vedlegg 5 – Totalsvovelanalyser (TS; LECO), analyserapport

Vedlegg 6 – Totalkarbon (TC) og Total organisk karbon (TOC; LECO), analyserapport

Vedlegg 7 – EDS-analyser fra skanningelektronmikroskop

Vedlegg 8 – Bildemosaikk av slabs

Vedlegg 9 – Tynnslip-scans (labelled)

Vedlegg 10 – Bi-plot av alle analyser

Vedlegg 11 – Håndholdt XRF på pressede tabletter av prøver



NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE

- NGU -

Norges geologiske undersøkelse
Postboks 6315 Torgarden,
7491 Trondheim, Norge

Geological Survey of Norway
P.O. Box 6315 Torgarden,
NO-7491 Trondheim, Norway

Besøksadresse:
Leiv Eirikssons vei 39,
7040 Trondheim

Visiting address:
Leiv Eirikssons vei 39,
7040 Trondheim

Telefon: 73 90 40 00
E-post: ngu@ngu.no
Nett: www.ngu.no

Tel: +47 73 90 40 00
E-mail: ngu@ngu.no
Web: www.ngu.no/en