

Rapport nr.: 2004.030		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen	
Tittel: Bjerkreim-Sokndal intrusjonen, Rogaland - Muligheter for videreforedling av vanadiumholdig magnetitt og ilmenitt i kombinasjon med bruk av CO ₂ .				
Forfatter: Are Korneliussen og Jan Kihle		Oppdragsgiver: Rogaland fylkeskommune		
Fylke: Rogaland		Kommune: Bjerkreim, Egersund, Sokndal, Lund		
Kartblad (M=1:250.000) Stavanger, Mandal		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) 1311 IV, Sokndal; 1312 III, Ørsdalsvatnet; 1212 II, Bjerkreim		
Forekomstens navn og koordinater: Bjerkreim-Sokndal intrusjonen		Sidetall: Kartbilag:	Pris: kr 81,-	
Feltarbeid utført:	Rapportdato: 12. mai 2004	Prosjektnr.: 293700	Ansvarlig:	
<p>Sammendrag:</p> <p>Bjerkreim-Sokndal intrusjonen i Rogaland Anortosittprovins (Egersundfeltet) er anrikt på ilmenitt, vanadiumholdig magnetitt og apatitt på visse nivåer i den magmatiske sekvensen. Omtrent 50 km² av intrusjonen er markant anrikt på disse verdimineraler, hvorav 1 km² anses som "malm" med i størrelsesorden 30% ilmenitt + apatitt + vanadiumholdig magnetitt. Enkeltvis anses innholdet av disse mineraler å være for lavt til å kunne gi grunnlag for økonomisk utnyttelse, mens mineralressursen kan bli økonomisk meget interessant hvis en kan kombinere drift alle tre verdimineralene samtidig.</p> <p>Et nytt moment som kan bidra til å gjøre forekomsten mer attraktiv er muligheten for å forbedre mineralprosesseringen ved bruk av CO₂, noe som kan gi en mere effektiv mineralseparasjonsprosess. CO₂-leaching eksperimenter på magnetittkonsentrat viser at silikatmineraler som representerer urenheter i konsentratet, kan dekomponeres og komponentene fjernes, mens oksydmineralene magnetitt og ilmenitt bevares. Dette åpner opp for at både ilmenitt- og magnetittkonsentrater kan "renses" ved CO₂-leaching og derigjennom bli markedsmessig mer attraktive, samtidig som utvinningsgraden kan økes.</p> <p>Videre FoU på dette temaet vil skje i regi av IFE m/samarbeidspartnere i et 4-års prosjekt finansiert av Forskningsrådet.</p>				
Emneord: Fagrapport		Ilmenitt		Apatitt
Industrimineraler		Vanadium		Magnetitt
CO ₂		Mineralforekomst		

Bjerkreim-Sokndal intrusjonen, Rogaland - Muligheter for videreforedling av vanadiumholdig magnetitt og ilmenitt i kombinasjon med bruk av CO₂.

Basert på CO₂-leaching eksperimenter av vanadiumholdig magnetittkonsentrat

Are Korneliussen, Jan Kihle (IFE)

Innhold

1. Bakgrunn for undersøkelsen.....	4
2. Bjerkreim-Sokndal intrusjonen	5
3. Eksperimentell prosedyre og resultater	6
4. Vurdering av resultatene	12
5. Videre undersøkelser.....	13
6. Referanseliste	14

Figurer

Figur 1: SEM-bilder (bse) av magnetittkonsentrat etter CO ₂ -leaching.	9
Figur 2: Eksempler på SEM-bilder (bse) av magnetittkonsentrat etter CO ₂ -leaching.	10
Figur 3: Søylediagram som viser gjennomsnittlig innhold av elementer i vannprøver etter CO ₂ -leaching.	11
Figur 4: Søylediagram som viser prosentvis endring i hovedelement sammensetning av magnetittkonsentratet etter CO ₂ -leaching.	11
Figur 5: Søylediagram som antyder relativ mobilitet av hovedelementer ved CO ₂ -leaching basert på kombinasjon av data fra tabell 2 og 3.	12

Tabeller

Tabell 1: Eksperimentelle data * vedr. CO ₂ -leaching av magnetittkonsentrat.....	7
Tabell 2: Analyse (ICP-AES, mg/l) av vannprøver etter CO ₂ -leaching.....	8
Tabell 3: XRF hovedelementanalyser av magnetittkonsentrat.....	12

1. Bakgrunn for undersøkelsen

Hovedpunkter i begrunnelsen for undersøkelsen:

- Bjerkreim-Sokndal intrusjonen (Robins 2000) i Egersundfeltet (Rogaland anortosittprovins) inneholder store mengder av titanmineralet ilmenitt, fosformineralet apatitt og jernmineralet magnetitt (Korneliussen 2000, Schiellerup mfl. 2001, Meyer mfl. 2002). Magnetitten har et relativt høyt innhold av legeringsmetallet vanadium.
- Forekomsten er imidlertid ikke uten videre drivbar fordi gehalten av hvert av verdimineralene er for lav til at dette kan gi grunnlag for drift alene; det vil være nødvendig med en kombinasjonsdrift på to eller helst alle tre av verdimineralene. Dette er en kompleks problemstilling som stiller store krav til FoU så vel som investeringer. Prosjektet anses å være av høg-risiko, men kan gi god lønnsomhet hvis en lykkes.
- Ny forskning (se nedenfor) antyder at bruk av CO₂ i mineralprosessering i visse tilfeller kan gi vesentlig forbedring i utvinningen av mineraler, men en har vært usikker på i hvilken grad dette kan anvendes i forhold til Bjerkreim-Sokndal intrusjonen.
- På denne bakgrunn er det utført CO₂-leaching eksperimenter på titanomagnetittkonsentrat fra Bjerkreim-Sokndal intrusjonen. En vil med dette være kommet et skritt videre i å kunne vurdere om bruk av CO₂ kan ha industrielle muligheter relatert til denne forekomsten.

Institutt for Energiteknikk (IFE) har over flere år videreutviklet en metode for ekstraksjon av aluminiumoksid (Al₂O₃) fra anortosittiske bergarter i Gudvangen i Sogn og Fjordane. CO₂ inngår i denne prosessen på den måten at en kan binde CO₂ med CaO fra feltspat og produsere kjemisk utfelt karbonat, som vil være et verdifullt biprodukt til Al₂O₃-produksjon. Med utgangspunkt i den kunnskap og erfaring som ble ervervet i anortosittprosjektet, så en for seg at CO₂-baserte mineralreaksjoner burde kunne anvendes også i andre mineralressurs-sammenhenger. Følgende ble så utført:

- Det ble i 2002 gjennomført diverse laboratorieeksperimenter av IFE og deres samarbeidspartner i Toulouse i Frankrike, som viste at CO₂ under visse betingelser (høyt trykk og temperatur) er reaktiv med visse silikatmineraler (olivin, pyroksen) og også med oksidmineralet ilmenitt.
- Det ble samme året skrevet en "Expression of Interest" (EOI) til EU-kommisjonen med anbefaling om å ta binding av CO₂ i mineralogisk materialer inn som et prioritert forskningsfelt i den 6. rammeplan. EOI'en ble vellykket, noe som resulterte i et samarbeide mellom en rekke partnere innen EU/EØS området rettet mot å få etablert et stort prosjekt innenfor dette temaet. Det ble imidlertid ikke bevilget penger til dette prosjektet.
- I 2003 ble det søkt Norges Forskningsråd om et prosjekt rettet mot økt verdiskapning av mineralressurser i kombinasjon med bruk av CO₂. Prosjektsøknaden ble innvilget i desember 2003 og prosjektet ble igangsatt våren 2004 og vil gå over 4 år. IFE er operatør for dette prosjektet, med NGU, NTNU og universitetet i Toulouse (Frankrike) som samarbeidspartnere.
- Samtidig valgte en å gå videre med eksperimenter på materiale fra Bjerkreim-Sokndal intrusjonen, med økonomisk støtte fra fylkeskommunen. Dette arbeidet er basis for denne rapporten.

2. Bjerkreim-Sokndal intrusjonen

Bjerkreim-Sokndal intrusjonen har fire verdifulle komponenter (jfr. Korneliussen 2000, Schiellerup mfl. 2001 og Meyer mfl. 2002):

- Apatitt (fosfatmineral - råstoff for produksjon av kunstgjødsel)
- Ilmenitt (titanmineral - råstoff for titanproduksjon)
- Magnetitt (jernmineral – råstoff for jernproduksjon)
- Vanadium (inngår i magnetitt – vanadiumholdig magnetitt er råstoff for produksjon av ferrovanadium som igjen brukes i stålindustri)

De aktuelle deler av Bjerkreim-Sokndal intrusjonen inneholder i størrelsesorden 10% apatitt, 10% ilmenitt og 10% vanadiumholdig magnetitt, med lokale variasjoner. Enkeltvis er dette ikke nok til å kunne gi grunnlag for gruvedrift; til sammenlikning inneholder Tellnes-forekomsten 28% ilmenitt. Det er kun i kombinasjon at en kan oppnå tilstrekkelig tonnasjeverdi til at gruvedrift kan bli lønnsom, for eksempel ved produksjon av apatitt + ilmenitt eller apatitt + ilmenitt + vanadium/magnetitt.

Forekomsten(e) er i denne sammenheng meget betydelig; ”mulig ressurs” vil være i størrelsesorden 1 MRD tonn malm med 30 % apatitt + ilmenitt + magnetitt. Dette er definitivt en mineralressurs av nasjonal så vel som internasjonal betydning.

Apatitt ble vurdert i detalj gjennom et samarbeide mellom NGU og Norsk Hydro AGRI (som er storforbruk av importert apatitt) i 2001-2002 (Schiellerup m.fl. 2001, Meyer m.fl. 2002). Konklusjonen var at apatittinnholdet var for lavt sett fra Norsk Hydro's synspunkt, og siden gruvedrift ikke er innenfor selskapets satsningsområder, ble dette prosjektet nedlagt. Apatitten har imidlertid av en slik kvalitet at den ville kunne produseres uten spesielle tekniske problemer ved en eventuell framtidig gruvedrift.

Ilmenitt ble også inngående vurdert i ovenfor nevnte prosjekt. En så heller ikke her spesielle problemer utover det at gehalten kan anses å være for lav til å kunne gi grunnlag for tilstrekkelig lønnsom drift i kombinasjon med apatitt. Det er grunn til å tro at ilmenitt fra Bjerkreim-Sokndal intrusjonen kan være velegnet for produksjon av titanslagg; det er i denne sammenheng viktig at MgO-innhold i ilmenitten er relativt lavt (varierer fra < 1 % til ca. 2.5 % MgO).

Det er i dag ikke markert for vanadiumholdig magnetitt, mens det metallurgiske mellomproduktet ferrovanadium som brukes i stålindustri, er internasjonal handelsvare. Dagens produsenter av ferrovanadium (ingen i Europa så vidt vites) har en industristruktur hvor magnetittgruven er nært integrert med smelteverk. I Norge hadde Elkem et slikt opplegg fram til 1981; vanadiumholdig magnetitt ble produsert ved Raudsand gruve i Møre og Romsdal og deretter skipet til selskapets smelteverk i Svelgen i Sogn og Fjordane for videreforedling til ferrovanadium. Dagens viktigste produsentland av ferrovanadium er Sør-Afrika og Kina.

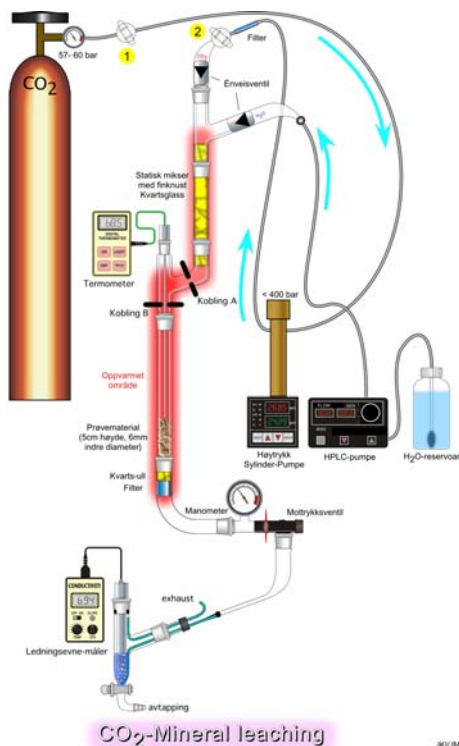
For Bjerkreim-Sokndal intrusjonen vil det trolig være nødvendig med en prosessindustri integrert med gruvedriften (men ikke nødvendigvis samlokalisert) som videreforedler vanadium/magnetittkomponenten av forekomsten.

Begrunnelsen for å gjøre CO₂-eksperimentene på magnetittkonsentrat har vært å se nærmere på hvordan dette oppfører seg ved CO₂-leaching, og om en ut fra observasjonene kunne komme fram til nye ideer for videreforedling.

3. Eksperimentell prosedyre og resultater

Utførelse:

- Ulike fraksjoner av magnetittkonsentrat fra NGUs tidligere undersøkelser ble slått sammen i en prøve. Fra denne prøven ble det splittet ut to deler hvorav den ene prøven ble tatt vare på som referanseprøve mens den andre var disponibel for eksperimentering.
- Det ble det benyttet 3.602g. Det resterende etter eksperimentet veide 3.2226g. Differansen på 0.3794 g (11%) representerer derfor det som var gått i løsning ved CO₂-leachingen.
- Metoden benyttes for (selektiv) mineraloppløsning av mineralkonsentrater ved å utsette disse for CO₂ og H₂O ved varierende fluidgjennomstrømming, -trykk og -temperatur



med tanke på oppskalering til kommersialiserbare prosesser.

Mineralkonsentrat med kjent sammensetning, masse og kornfordeling blir lagt i en prøvesylinder tilkoblet CO₂ og H₂O under trykk som vist i konseptskissen i Figur 1. Eksperimentene løper fra timer til dager. En ledningsevne-måler benyttes til å indikere oppløste ioner i fluid-fasen som har blitt dannet fra mineral-CO₂ reaksjonene. Etter avsluttet forsøk blir prøven analysert ved SEM for å studere effektiviteten av mineraloppløsningsreaksjonene. Detaljert informasjon om laboratorieoppsettet er tilgjengelig på forespørsel.

Figur 1: Illustrasjon av laboratorieoppsettet for CO₂-leaching eksperimenter.

Resultater:

- Eksperimentelle data er gjengitt i Tabell 1.
- Analyser av vannprøver etter CO₂-leachingen er oppgitt i Tabell 2.
- Figur 1 og 2 viser hvordan magnetittkonsentratet ser ut etter CO₂-leachingen. Mineralkornene er i stor grad påvirket i randsoner og i mindre grad innover i kornene. I de tilfeller hvor reaksjonen har gått innover i korn ser dette ut til å vært langs svakhetssoner/sprekker slik som i det store magnetittkornet i Fig. 1. Det er helt tydelig at CO₂-leachingen har vært ujevn; løsningen har ikke vært jevnt eksponert for mot prøvematerialet, men synes å ha fulgt kanaler i prøvematerialet. Dette har medført at oppløst mineralogisk materiale er lavere enn en hadde forventet. Videre laboratorieeksperimenter vil kreve et forbedret eksperimentelt oppsett som gir en kontinuerlig eksponering av prøven.
- Figur 3 viser gjennomsnittsinholdet av hoved- og sporelementer i vannprøvene etter CO₂-leachingen. Dette viser helt klart at silikatminerale (med Si, Fe, Ca, Mg, Na, K) er lettere løselig ved CO₂-leaching enn magnetitt; fra tidligere er det kjent at det samme gjelder for ilmenitt.

- Tabell 3 viser den kjemiske hovedelementsammensetningen av magnetittkonsentratet før og etter CO₂-leaching. Det markante innholdet av SiO₂, Al₂O₃, MgO og CaO skyldes et høyt innhold av silikatmineraler i konsentratet, men uten at dette er undersøkt i detalj.
- Den prosentvise endring i sammensetningen til magnetittkonsentratet ved CO₂-leaching basert på XRF analyser av hovedelementer framgår både av Tabell 3 og Fig. 4. Disse data antyder en god mobilitet for SiO₂, middels mobilitet for MgO, CaO, P₂O₅, MnO og Fe₂O₃ og en dårlig mobilitet for TiO₂. Al₂O₃ er anriktet i reaksjonsprøven og anses som ikke mobilt.

Tabell 1: Eksperimentelle data * vedr. CO₂-leaching av magnetittkonsentrat.

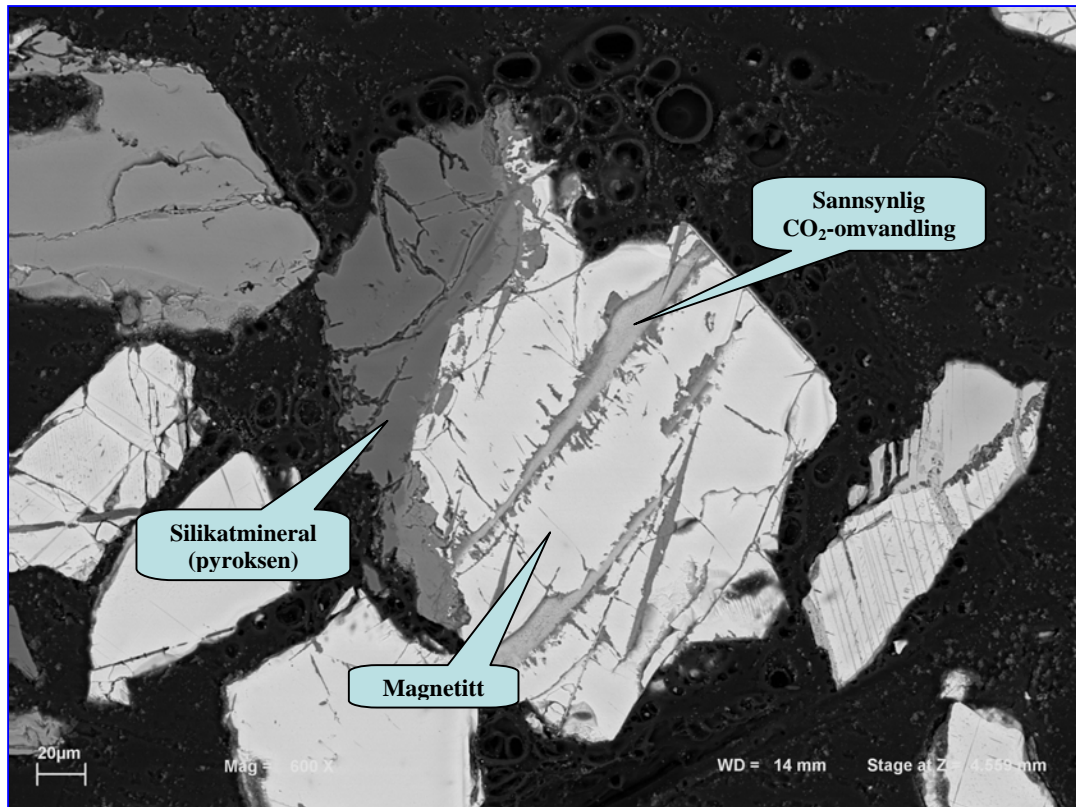
An.nr	Prøve	pH @ 20°C N	Trykk bar	Temperatur	volum ml	Tid (t)
1	BK-1	5.04	110	156	4	14,20 2-12
2	BK-2a	5.02	108	154	8	08,30 3-12
3	BK-3	5.07	107	158	8	10,40 3-12
4	BK-4	5.27	115	151	8	13,50 3-12
5	BK-5	5.29	117	154	6	15,50 3-12
6	BK-6	5.30	109	152	6	16,30 3-12
7	BK-7b	5.32	130	160	8	08,00 4-12
8	BK-8	5.36	100	156	8	13,30 4-12
9	BK-9b	5.30	108	153	8	10,45 5-12
10	BK-10	5.17	121	159	8	15,55 5-12
11	BK-11	4.79	105	148	7	4t 33min
12	BK-12	4.81	74	144	8	08,30 9-12
13	BK-13	5.01	101	161	8	13,00 9-12
14	BK-14	5.64	103	152	8	17,40 9-12
15	BK-15	5.20	99	153	8	11,00 10-12
16	BK-16	4.99	92	153	8	15,30 10-12
17	BK-17	5.00	108	153	8	10,00 11-12
18	BK-18	4.92	99	148	8	15,00 11-12
19	BK-19b	4.96	106	153	8	08,10 12-12
20	BK-20	5.36	93	156	8	17,40 15-12
21	BK-21	5.36	90	156	8	08,30 17-12
22	BK-22	5.37	91	159	8	08,30 18-12
23	BK-23	5.4	87	157	8	08,30 19-12
24	BK-24	5.51	110	158	8	08,30 22-12
25	BK-25	5.31	83	155	8	14,20 23-12

* Forenklet tabell. De fullstendige analysedata er tilgjengelig på forespørsel.

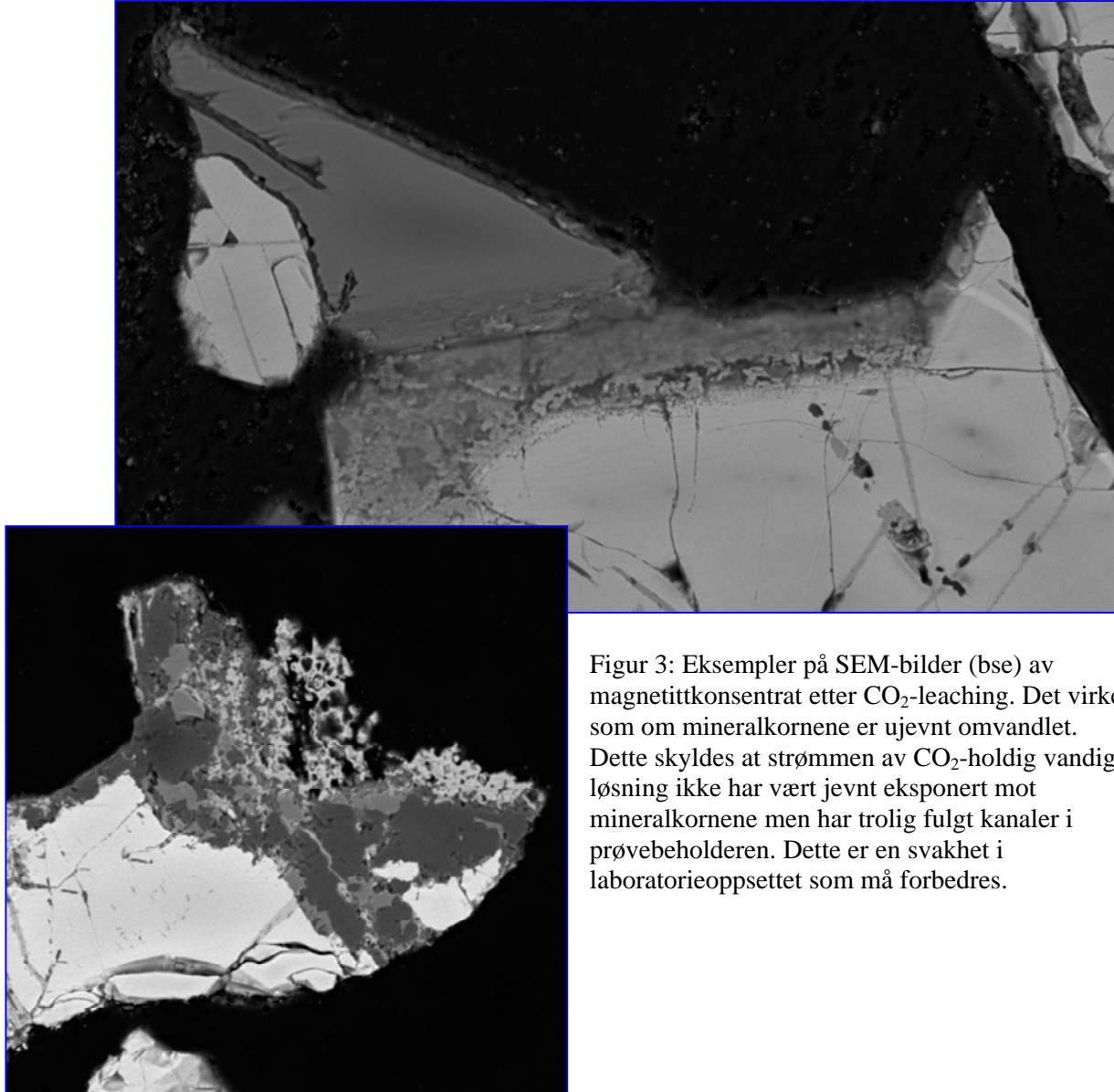
Tabell 2: Analyse (ICP-AES, mg/l) av vannprøver etter CO₂-leachingen.

Prøve	Si	Al	Fe	Ti	Mg	Ca	Na	K	Mn	P	Cu	Zn	Pb	Ni	Co
1	59.10	0.296	4.91	<0.005	5.31	7.02	4.79	4.06	1.43	0.27	0.120	0.221	<0.05	0.312	0.041
2	47.50	0.089	2.06	<0.005	10.00	8.39	5.94	6.38	0.42	0.60	0.026	0.124	<0.05	0.025	<0.01
3	35.60	0.216	2.91	<0.005	6.32	8.27	6.51	7.66	0.61	0.10	<0.005	0.032	<0.05	<0.02	<0.01
4	37.90	0.249	7.36	<0.005	9.19	12.50	6.84	8.88	1.11	0.21	<0.005	0.032	<0.05	<0.02	<0.01
5	27.10	0.313	5.25	<0.005	6.73	9.84	6.69	5.77	0.93	<0.1	<0.005	0.024	<0.05	<0.02	<0.01
6	26.40	0.322	8.70	<0.005	5.65	8.59	6.95	5.43	0.78	<0.1	<0.005	0.020	<0.05	<0.02	<0.01
7	39.40	0.276	9.09	<0.005	7.98	11.60	7.75	6.22	0.42	<0.1	<0.005	0.031	<0.05	<0.02	<0.01
8	28.20	0.328	6.86	<0.005	5.94	9.11	7.26	7.11	0.30	0.21	0.006	0.038	<0.05	0.020	<0.01
9	27.60	0.300	5.87	<0.005	5.26	9.30	6.33	4.33	0.21	<0.1	<0.005	0.022	<0.05	<0.02	<0.01
10	20.30	0.333	7.56	<0.005	4.15	8.10	4.69	5.83	0.18	<0.1	<0.005	0.020	<0.05	<0.02	<0.01
11	21.90	0.443	9.19	<0.005	3.04	4.70	6.30	2.17	0.13	0.19	0.006	0.035	<0.05	0.073	<0.01
12	16.70	0.249	7.71	<0.005	2.75	4.81	4.63	<0.5	0.12	0.13	0.007	0.026	<0.05	0.051	<0.01
13	17.60	0.425	9.74	<0.005	2.88	5.44	6.19	<0.5	0.12	0.11	0.021	0.437	<0.05	0.036	<0.01
14	18.40	0.309	7.70	<0.005	2.80	5.73	5.35	2.68	0.13	<0.1	<0.005	0.022	<0.05	0.039	<0.01
15	13.80	0.312	10.70	<0.005	2.11	4.49	4.22	1.41	0.10	<0.1	<0.005	0.037	<0.05	0.060	<0.01
16	12.80	0.318	10.60	<0.005	1.88	4.09	4.12	2.34	0.09	<0.1	<0.005	0.023	<0.05	0.070	<0.01
17	12.60	0.277	5.87	<0.005	1.58	3.82	4.46	0.75	0.08	<0.1	<0.005	0.019	<0.05	0.091	<0.01
18	9.79	0.227	6.46	<0.005	1.32	3.48	3.51	1.15	0.06	<0.1	<0.005	0.018	<0.05	0.110	<0.01
19	10.00	0.220	10.60	<0.005	1.43	3.54	3.31	<0.5	0.06	<0.1	<0.005	0.021	<0.05	0.120	<0.01
20	27.00	0.312	8.59	<0.005	7.56	8.50	24.40	1.63	0.11	0.26	<0.005	0.048	<0.05	0.132	<0.01
21	52.00	0.209	7.45	<0.005	10.80	17.80	14.80	0.61	0.27	0.26	<0.005	0.068	<0.05	0.078	<0.01
22	58.20	0.190	6.45	<0.005	13.00	20.70	16.60	0.62	0.32	0.30	<0.005	0.026	<0.05	0.055	<0.01
23	52.20	0.175	7.80	<0.005	11.30	19.60	15.00	0.73	0.45	0.38	0.010	0.027	<0.05	0.070	<0.01
24	40.80	0.155	5.20	<0.005	7.93	16.00	11.80	<0.5	0.41	<0.1	<0.005	0.041	<0.05	0.065	<0.01
25	38.10	0.157	5.26	<0.005	9.19	14.500	13.800	<0.5	0.368	0.250	<0.005	0.027	<0.05	0.195	<0.01

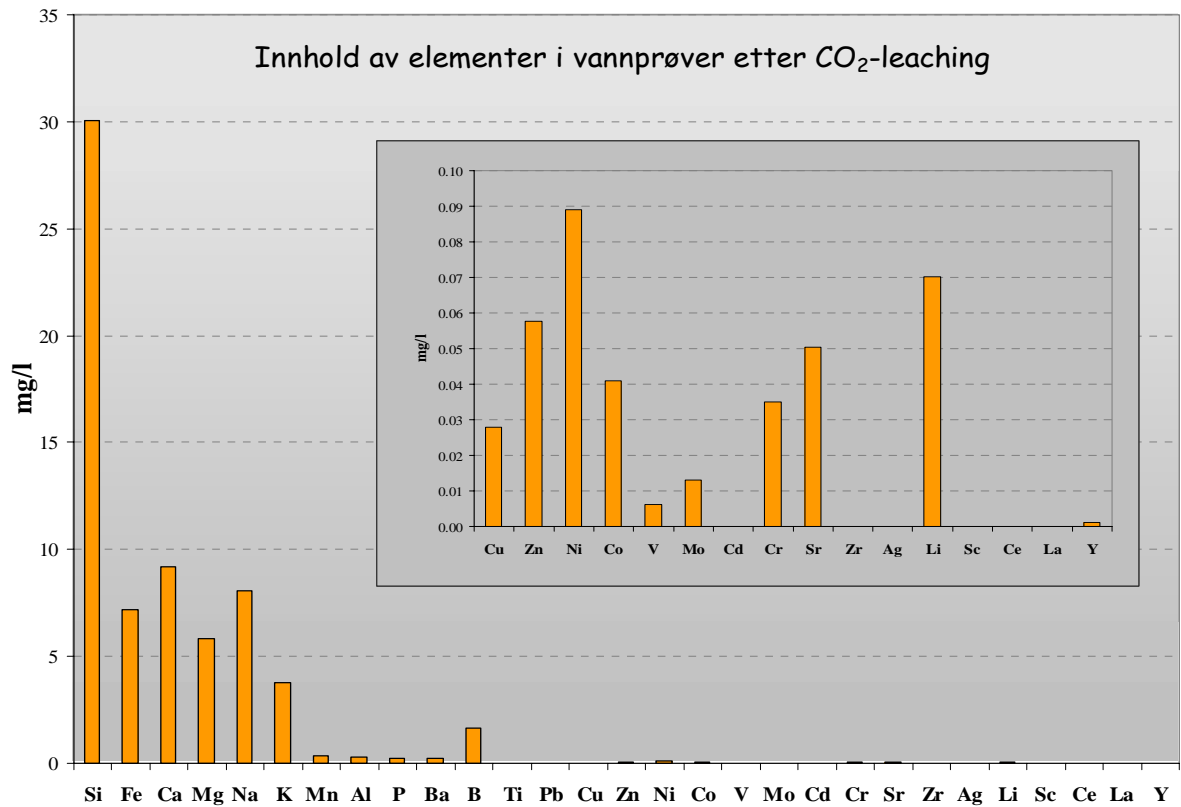
Prøve	V	Mo	Cd	Cr	Ba	Sr	Zr	Ag	B	Be	Li	Sc	Ce	La	Y
1	<0.005	0.012	<0.005	<0.01	0.078	0.051	<0.005	<0.01	1.64	<0.001	0.195	<0.001	<0.05	<0.01	0.001
2	0.006	0.016	<0.005	<0.01	0.088	0.068	<0.005	<0.01	0.67	<0.001	0.154	<0.001	<0.05	<0.01	0.001
3	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.275	0.058	<0.005	<0.01	1.77	<0.001	0.021	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
4	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.560	0.088	<0.005	<0.01	1.96	<0.001	0.048	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
5	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.486	0.067	<0.005	<0.01	2.20	<0.001	0.062	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
6	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.509	0.058	<0.005	<0.01	2.29	<0.001	0.168	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
7	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.486	0.085	<0.005	<0.01	1.46	<0.001	0.039	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
8	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.366	0.066	<0.005	<0.01	1.31	<0.001	0.451	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
9	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.246	0.061	<0.005	<0.01	1.65	<0.001	0.019	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
10	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.224	0.054	<0.005	<0.01	1.58	<0.001	0.010	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
11	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.197	0.026	<0.005	<0.01	1.67	<0.001	0.197	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
12	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.091	0.030	<0.005	<0.01	1.09	<0.001	0.069	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
13	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.098	0.033	<0.005	<0.01	2.26	<0.001	0.017	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
14	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.093	0.034	<0.005	<0.01	1.70	<0.001	0.009	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
15	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.087	0.027	<0.005	<0.01	1.61	<0.001	<0.005	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
16	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.075	0.026	<0.005	<0.01	1.69	<0.001	<0.005	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
17	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.066	0.025	<0.005	<0.01	1.68	<0.001	0.005	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
18	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.071	0.024	<0.005	<0.01	1.21	<0.001	0.006	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
19	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.065	0.022	<0.005	<0.01	0.93	<0.001	0.008	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
20	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.061	0.027	<0.005	<0.01	1.95	<0.001	0.046	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
21	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.163	0.067	<0.005	<0.01	1.82	<0.001	0.019	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
22	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.312	0.079	<0.005	<0.01	1.90	<0.001	0.011	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
23	<0.005	0.011	<0.005	0.04	0.293	0.076	<0.005	<0.01	1.85	<0.001	0.013	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
24	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.232	0.061	<0.005	<0.01	1.48	<0.001	0.016	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001
25	<0.005	<0.01	<0.005	<0.01	0.232	0.050	<0.005	<0.01	1.21	<0.001	0.031	<0.001	<0.05	<0.01	<0.001



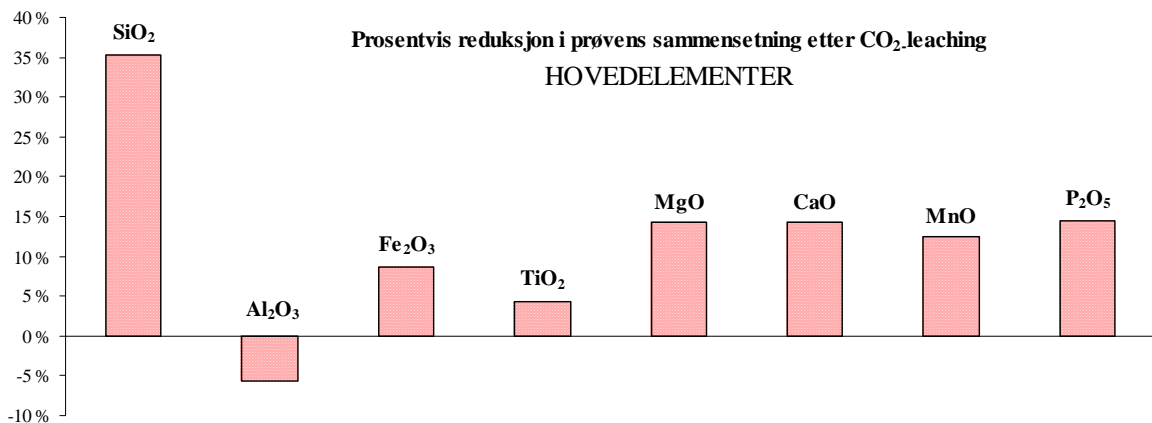
Figur 2: SEM-bilder (bse) av magnetittkonsentrat etter CO₂-leaching. Magnetitt er lys grå til hvit, silikatmineraler framstår i forskjellige nyanser av grått, mens mellommassen i slipet (innstøpningsmasse) er sort. Flere bilder med analyseprofiler er vist i vedlegg 5.



Figur 3: Eksempler på SEM-bilder (bse) av magnetittkonsentrat etter CO₂-leaching. Det virker som om mineralkornene er ujevnt omvandlet. Dette skyldes at strømmen av CO₂-holdig vandig løsning ikke har vært jevnt eksponert mot mineralkornene men har trolig fulgt kanaler i prøvebeholderen. Dette er en svakhet i laboratorieoppsettet som må forbedres.



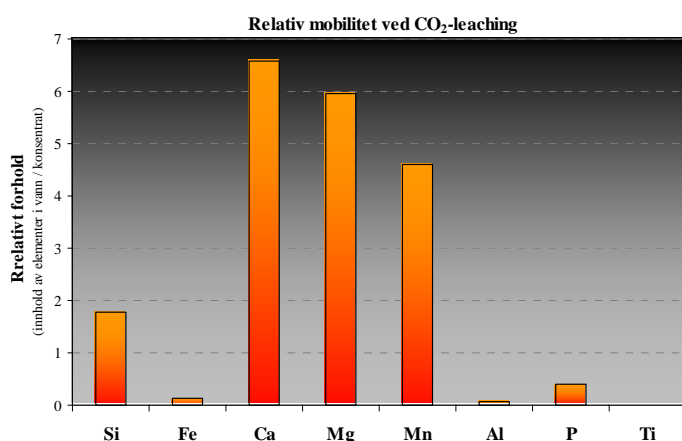
Figur 4: Søylediagram som viser gjennomsnittlig innhold av elementer i vannprøver etter CO₂-leachingen. Av dette framgår at de mest lettløselige hovedelementer er Si, Fe, Ca, Mg, Na og K. Av sporelementer er Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Sr og Li distinkt i vannprøvene. De komplette analyses tall er oppgitt i Tabell 1.



Figur 5: Søylediagram som viser prosentvis endring i hovedelement sammensetning av magnetittkonsentratet etter CO₂-leaching. Analysedataene er gitt i tabell 3.

Tabell 3: XRF hovedelementanalyser av magnetittkonsentrat.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	MnO	P ₂ O ₅
Originalt magnetittkonsentrat (1)	17.00	3.50	58.00	4.60	0.98	1.40	0.08	0.62
CO ₂ -behandlet magnetittkonsentrat (2)	11.00	3.70	53.00	4.40	0.84	1.20	0.07	0.53
Forhold (1) / (2)	1.55	0.95	1.09	1.05	1.17	1.17	1.14	1.17
Differanse (1) - (2)	6.00	-0.20	5.00	0.20	0.14	0.20	0.01	0.09
Differanse (%)	35 %	-6 %	9 %	4 %	14 %	14 %	13 %	15 %



Figur 6: Søylediagram som antyder relativ mobilitet av hovedelementer ved CO₂-leaching basert på kombinasjon av data fra tabell 2 og 3. Silikatmineraler (forurensninger i magnetittkonsentratet) synes gjennomgående å være lettere løselig enn oksidmineraler. Apatitt (fosfat) er også løselig. Magnetitt (titanholdig i dette tilfellet) og ilmenitt (inneslutninger i magnetitt) er lite løselig ved de betingelser eksperimentene ble kjørt under.

4. Vurdering av resultatene

På tross av uheldige omstendigheter ved eksperimentene, ved at prøvematerialet ble ujevnt og ufullstendig eksponert for den CO₂-holdige vandige løsningen, så kan en trekke en rekke slutninger

Hovedpunkter i vurderingen av resultatene:

- Det største verdiskapningspotensialet kan relateres til at silikatmineraler løses lettere ved CO₂-leaching enn oksidmineraler. Dette betyr at ved en eventuell gruvedrift først produserer urene mineralkonsentrater av ilmenitt og magnetitt med tradisjonell teknologi, for eksempel ved kombinasjon av gravimetrisk og magnetisk separasjon. Ved at en på dette trinnet tillater høyt innhold av silikatmineraler vil en kunne oppnå høy utvinningsgrad av oksidene. I neste omgang kan en ved CO₂-leaching renses disse urene mineralkonsentrater ved at silikatmineralene (og eventuelle rester av apatitt, se nedenfor) fjernes. En vil dermed bli i stand til å produsere oksid mineralkonsentrater av høy renhet samtidig som en kan oppnå høyere utvinningsgrad.
- Titan er i praksis ikke mobilt ved CO₂-leaching. Dette betyr at CO₂-leaching kan være velegnet for oppredning av titanmineraler ved at andre (uønskede) komponenter, i første rekke Ca, Mg, P, Si, Na, K) kan fjernes selektivt. Her ligger et betydelig verdiskapningspotensial.
- Apatitt (det er små mengder i magnetittkonsentratet) synes å være CO₂-løselig. Dette betyr at CO₂-leaching neppe er egnet for mineralprosessering av apatitt. Ved

eneventuell gruvedrift må derfor apatitt sannsynligvis utvinnes på tradisjonell måte ved flotasjon.

Med basis i verdimineralene ilmenitt, apatitt og vanadiumrik magnetitt kan en tenke seg flere industrielle muligheter:

- Apatitt kan utvinnes på tradisjonell måte ved flotasjon. Gehalten (i størrelsesorden 10%) anses imidlertid å være for lav til at dette kan gi grunnlag for gruvedrift alene.
- På tilsvarende måte er innholdet av ilmenitt (10-15%) for lavt. Til sammenlikning er ilmenittinnholdet i Tellnes-forekomsten (Titania A/S) 28% i gjennomsnitt. Tellnes-ilmenitten videreføres til titanslagg og titanpigment. Det tilsvarende kan være mulig for ilmenitt fra Bjerkreim-Sokndal intrusjonen.
- I en global sammenheng er det markedsmessig grunnlag for produksjon av både ilmenitt og apatitt, forutsatt en kan produsere tilstrekkelig rene mineralprodukter til en konkurransedyktig pris.
- Det store usikkerhetsmomentet er vanadiumrik magnetitt som ikke er standard handelsvare. Vanadiumrik magnetitt benyttes som råvare i produksjon av ferrovanadium for bruk i stålindustri. Ferrovanadium er handelsvare, men de som produserer dette baserer seg på egne råstoffer. En eventuell produksjon av vanadiumrik magnetitt må derfor være sikret avsetning til en produsent av ferrovanadium for å være interessant.
- Alt i alt synes det derfor som om utvikling av ny gruvedrift basert på Bjerkreim-Sokndal intrusjonen blir for kompleks for dagens mineralbedrifter. For å kunne oppnå videre progresjon vil det være nødvendig med nye momenter. Et slikt moment kan være kombinasjon med bruk av naturgass.
- Ilmenitt kan i prinsippet videreføres til syntetisk rutil (flere patenterte prosesser foreligger). Dette gjøres i dag kun fra visse varianter av naturlig leached ilmenitt fra sandforekomster.
- Vanadiumrik magnetitt kan videreføres til ferrovanadium og jern. Dette gjøres i dag flere steder i verden.
- Det nye momentet vedr. Bjerkreim-Sokndal intrusjonen er kombinasjonsmuligheter med bruk av naturgass. En kan for eksempel tenke seg at en produserer elektrisk strøm fra et gasskraftverk. Dette gir i tillegg til elektrisitet overskuddsvarme og CO₂ som begge kan nyttes i en industriell prosess for prosessering av ilmenitt og vanadiumrik magnetitt. I praksis vil dette kreve en industriell aktør som må gjennomføre en betydelig FoU for å videreføre konseptet, og som også må ha styrke til å gjennomføre en industriutbyggingen.
- På tilsvarende måte som dagens konstellasjon Titania – Tinfos Iron & Titanium (ilmenittsmelteverket i Tyssedal) - Kronos Titan (titanpigmentprodusent i Fredrikstad) som til sammen har en årlig verdiskapning på ca 1MRD kr, så kan en tenke seg en betydelig industriproduksjon med utgangspunkt i Bjerkreim-Sokndal intrusjonen kombinert med bruk av naturgass/CO₂.

5. Videre undersøkelser

Følgende videre aktiviteter er på gang eller under planlegging:

- Neste steg i FoU vedr. CO₂-leaching av Bjerkreim-Sokndal intrusjonen-materiale vil bli ivaretatt av forskningsprosjektet "From waste to value: New industrial process for

mineral dressing by use of CO₂", med IFE som operatør og NGU, NTNU og universitetet i Toulouse (Frankrike) som samarbeidspartnere. Prosjektet bli igangsatt våren 2004 og vil vare i 4 år.

- Det er visse muligheter i EU-systemet for forskningsprosjekter relatert til bruk av CO₂. En søknad ble avslått i 2003. En ny søknad er under utarbeidelse.
- Kjerneboring av 4 borehull á 30-40 m planlegges utført høsten 2004. Dette vil gi kontinuerlige snitt i prioriterte deler av forekomsten og er viktig for å oppnå eksakte gjennomsnittsgehalter. Dette blir en forbedring i forhold til den overflateprøvetaking som hittil er gjort. Kjerneprøvene gir også et ypperlig materiale for detaljerte studier av kjemiske og mineralogiske mineraler.
- Det er samtidig viktig å få gjort industrielle og politiske miljøer oppmerksom på de muligheter som ligger i kombinasjonen Bjerkreim-Sokndal intrusjonen - gass/CO₂. En vellykket "lobbyvirksomhet" vil få stor betydning for at resultatet til syvende og sist blir vellykket.

6. Referanseliste

- Korneliussen, A. Furuhaug, L. Gautneb, H McEnroe, S. Nilsson, L.P. Sørđal, T. 2001: Forekomster med ilmenitt, vanadiumholdig magnetitt og apatitt i norittiske bergarter i Egersundfeltet, Rogaland. NGU rapport nr. 2001.014, 29 s.
- Meyer, G. B., Schiellerup, H. & Tegner, C. 2002: Chemical characterisation of ilmenite, magnetite and apatite in the Bjerkreim-Sokndal Layered Intrusion, Rogaland, South Norway. NGU report 2002.042, 25 p.
- Robins, B. 2001: The Bjerkreim-Sokndal layered intrusion. In Duchesne, J.C. (ed.) *The Rogaland intrusive massifs – an excursion guide*. NGU report 2001.029, p. 35-50.
- Schiellerup, H., Meyer, G. B., Tegner, C., Robins, B. & Korneliussen, A. 2001: Resources of apatite, ilmenite and magnetite in the Bjerkreim Sokndal Layered Intrusion, Rogaland, South Norway. NGU report 2001.092, 33 p.