

# **GEOLOGI FOR SAMFUNNET**


SIDEN 1858



**NORGES  
GEOLOGISKE  
UNDERSØKELSE**

· NGU ·



<b>Rapport nr.:</b> 2018.009	<b>ISSN: 0800-3416 (trykt)</b> <b>ISSN: 2387-3515 (online)</b>	<b>Gradering:</b> Åpen	
<b>Tittel:</b> Oppredningsforsøk på rågods fra Misværdal apatittforekomst, Bodø kommune, Nordland			
<b>Forfatter:</b> Nils Egil Johannessen og Peter M. Ihlen		<b>Oppdragsgiver:</b> Nordland fylkeskommune/NGU	
<b>Fylke:</b> Nordland		<b>Kommune:</b> Bodø	
<b>Kartblad (M=1:250.000)</b> Bodø		<b>Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000)</b> 2029-2 Misvær	
<b>Forekomstens navn og koordinater:</b> Misværdal, 33N-498907 7441288		<b>Sidetall:</b> 34	<b>Pris:</b> 100,-
<b>Feltarbeid utført:</b> August 2016		<b>Rapportdato:</b> 27.07.2018	<b>Prosjektnr.:</b> 370700
		<b>Ansvarlig:</b> 	
<b>Sammendrag:</b> <p>Rapporten beskriver resultatene av oppredningsforsøk på apatitt-rik biotitt-pyrokse-nitt for å teste ulike oppredningsmetoder i lab skala, for om mulig å produsere et rene-st mulig apatitt konsentrat. Ikke uventet ga den pyrokse-nittiske bergarten prosessmineralogiske utfordringer både med tanke på frimaling og selektiv mineral-separasjon. Det ble i denne omgang valgt å forsøke og utvikle et prosess-teknisk flytskjema basert på våt nedmaling i stavmølle og flotasjon som første separasjonstrinn. Videre tørking, tørr høyintensitets magnetbehandling og påfølgende syrebehandling. Knusing og nedmaling indikerte at bergarten hadde en meget lav bruddstyrke.</p> <p>Stavmølle-maling ble valgt fremfor kule-mølle, hvor spesielt biotitten lot seg selektivt oppkonsentrere i grov-fraksjonen og en større andel kunne siktes i fra som avgang før flotasjonen. Derimot lot de Ca-holdige mineralene (pyrokse-n, amfibol, kalkspat, epidot, titanitt) i flotasjonspulpen seg i en stor grad aktivere og flotere i sammen med apatitten, til tross for at det ble benyttet en spesialutviklet patentert samlereagens for selektiv flotasjon av apatitt. Anbefalt kaustisk behandlet stivelse ble testet ut som trykker for pyrokse-n, (omfatter også amfibol i det etterfølgende) og kalkspat, men med redusert effekt.</p> <p>Det viste seg at spesielt sterke magnetgradienter måtte til for å trekke ut den mer Mg-rike pyrokse-n i apatittkonsentratet. Den høye andelen av partikler &lt; 75 mikron medvirket til at det ikke var mulig å magnetbehandle med konvensjonelle sterke REE- legerte tørr magneter. Magnetbehandlingen ble derfor utført på en spesiell belte-gående "disc" magnet» som kan behandle finere partikler. Det ble også gjennomført forsøk med å skille pyrokse-n og apatitt med elektrostatisk separasjon, uten at det gav resultater av interesse.</p> <p>Syrebehandlingen med HCL løste meget hurtig opp kalkspaten, men samtidig ble også mer enn 20 % av apatitten løst opp. Årsaken kan her være at det sannsynligvis ble benyttet en atskillig sterkere syrekonsentrasjon enn hva som var nødvendig for å løse kalkspaten.</p> <p>Det ble oppnådd å lage et flytskjema for produksjon av et kilo konsentrat med 82 % apatitt, med en utvinning på ca 50 %. Apatitten i konsentratet synes å omfatte i stor grad frimalte og lite smittede korn. Det høye apatitt-tapet i prosessen referer i stor grad til svinn under syrebehandlingen.</p> <p>Erfaringene og resultatene fra disse innledende forsøkene kan være et godt utgangspunkt for et eventuelt fremtidig prosjekt med tanke på å utvikle og optimalisere et flytskjema for å øke både apatitt-gehalten i konsentratet og utvinningsprosenten.</p>			
<b>Emneord:</b> Fagrapport	Oppredning	Apatitt	
Pyrokse-n	Biotitt	Amfibol	

# INNHold

FORORD.....	6
1. INNLEDNING.....	14
2. PRØVEMATERIALET.....	17
3. OPPREDNINGSTRINNENE.....	20
3.1 Nedmaling i stavmølle.....	20
3.2 Flotasjon.....	22
3.3 Magnet- og syre-behandling.....	24
3.4 Flytskjema med prosess resultater.....	26
4. KJEMISKE ANALYSER.....	30
5. OPPSUMMERING OG EVALUERING.....	31
6. UTFORDRINGER OG MULIGHETER.....	33
7. REFERANSER.....	34

## FIGURER

- Figur 1.** Geologisk kart som viser beliggenheten av Misværdal pyroksenittmassiv og apatittforekomst i Bodø kommune. Bergarter angitt med røde farger = granittiske intrusjoner, brunlige = gabbroiske og diorittiske intrusjoner, lilla = ultramafiske bergarter, grønne = glimmerskifre og gneisser, gule = kvartsitter, blågrønne = kalkglimmerskifre, blåe = karbonatbergarter og orange farger = palaeoproterozoiske bunngneiser. Kartet er hentet fra Ihlen (2008). ..... 7
- Figur 2.** Forenklet geologisk kart som viser beliggenheten av den apatitt-rike Skaråsli-sonen innenfor den lavgehaltige Misværdal apatittforekomst. De svarte feltene i den vestlige pyroksenittkroppen angir utstrekningen på de enkelte blotninger og blotningsfelter (ikke vist i den østlige kroppen). Kartet er hentet fra Ihlen og Furuhaug (2013). ..... 8
- Figur 3.** Kart over Skaråsli blotningsområde som viser innholdet av  $P_2O_5$  i de enkelte borkakshull (svarte tall og punkter) og i knakkprøve (svart firkant), samt gjennomsnittet for  $P_2O_5$  i de enkelte blotninger (røde) og i alle blotningene i området (blått). Dessuten gjennomsnittet for blotningene i de to feltene langs elven og høyspentlinjen (små blå). Utsprengt rågods for oppredningsforsøkene som ga borkaks med 5,3 %  $P_2O_5$  er angitt med gult punkt og gul skrift ved Øvre Lakstrapp. Lilla sone = grovkornet apatitt-rik biotitt-alkalifeltspat-pyroksenitt, Lys blågrønn = finkornet pyroksenitt med grovkornete apatitt-alkalifeltspat-rike segregasjoner, Lys grønn = finkornet biotitt-pyrkosenitt med moderate mengder apatitt, Mørk grønn = finkornet apatitt-rik biotitt-pyroksenitt. Kartet er hentet fra Ihlen og Furuhaug (1911). ..... 10
- Figur 4.** Skårete flater av utsprengt materiale av pyroksenitter brukt i oppredningsforsøkene. **A)** Foto av en mørk grønn masse av grovkornete pyroksen-krystaller sammenvokst med svarte aggregater av biotitt og hvite flekker av alkalifeltspat og mange tynne grå lister av apatitt. Lengste side av utsnittet er 9,5 cm. **B)** Foto av samme type bergart, men med grå nåleformete krystaller av apatitt. Lengste side av utsnittet er 7 cm. .... 15
- Figur 5.** Skårete flater av utsprengt materiale av pyroksenitter brukt i oppredningsforsøkene. **A)** Fotoet som skiller seg fra de i Fig. 4 ved at de grove pyroksen-krystallene er sammenvokst med grovkornete aggregater av hvit alkalifeltspat og grå apatitt og i liten grad med biotitt.

Lengste side av bilde A er 8 cm. <b>B)</b> Bildet viser grovkornet apatitt-førende pyroksenitt tilsvarende den i Figur 4B, men gjennomsett av hårtynne kalkspatårer som er ledsaget av omvandling av pyroksen langs årene til finkornet tremolittisk/aktinolittisk amfibol. Lengste side er 10 cm .....	16
<b>Figur 6.</b> Mikroskop bilde av finkornet granulært aggregat av apatitt (Ap) som opptrer i grovkornet pyroksenitt bestående av pyroksen (Cpx), biotitt (Bio) og aktinolittisk amfibol (Act). Sistnevnte dannes ved omvandling av av pyroksen.....	17
<b>Figur 7.</b> Mikroskop bilde av grovkornet pyroksen (cpx) og perthittisk alkalifeltspat (Pl) med inneslutninger av og sammenvokst med apatitt (Ap), biotitt (Bi), kalkspat (Cc), actinolittisk amfibol (Act) og allanitt (Al). .....	18
<b>Figur 8.</b> Mikroskop bilde av fin- til middelskornet pyroksenitt med listeformete aggregater av apatitt. Pyroksen-krystallene er omvandlet til grønlig aktinolitt langs sprekker og korngrenser mens sprekker i nærområdet til apatitten er fylt med brun allanitt. Forkortelsene er som i Figur 7. ....	19
<b>Figur 9.</b> Bildet viser den 35 liter store stavmøllen i rustfritt stål som ble brukt i den våte nedmalingen av minus 8 mm fraksjonen.....	20
<b>Figur 10.</b> Bildet viser en standardstandard Denver lab flotasjonsmaskin som ble anvendt i flotasjonsforsøkene,.....	23
<b>Figur 11.</b> Bildet viser en såkalt belte-disc magnet produsert av Master Magnets Ltd som ble anvendt i forsøkene med tørr magnetbehandling av flotasjonskonsentratene.....	25

## TABELLER

<b>Tabell 1.</b> Mikrosonde analyser av klor-fattig fluor-apatitt fra flere forskjellige bergarter og lokaliteter i Miværdal pyroksenitt-massiv (T. Vrålstad, personlig meddelelse, 2012). .....	11
<b>Tabell 2.</b> Laser ablasjon ICP-MS analyser av de enkelte elementer i gruppen av sjeldne jordarter (REE), samt thorium og uran i apatitt (Ihlen et al., 2014). Verdiene er gitt i ppm eller gram/tonn og representerer gjennomsnittet av det oppgitte antall analysepunkter som er utført på polerte tykk slip. ....	11
<b>Tabell 3.</b> Mikrosonde analyser kalsium-rik augittisk klinopyrksen fra forskjellige bergarter og lokaliteter i Miværdal pyroksenitt massiv (T. Vrålstad, personlig meddelelse, 2012). .....	12
<b>Tabell 4.</b> Mikrosonde analyser av kalsium-rik aktinolittisk og tremolittisk amfibol fra forskjellige bergarter og lokaliteter i Miværdal pyroksenitt massiv (T. Vrålstad, personlig meddelelse, 2012). .....	12
<b>Tabell 5.</b> Mikrosonde analyser av biotitt fra forskjellige bergarter og lokaliteter i Miværdal pyroksenitt massiv. (T. Vrålstad, personlig meddelelse, 2012). Legg merke til variasjonene i FeO og MgO innhold. ....	13
<b>Tabell 6.</b> Mikrosonde analyser av allanitt og epidot fra forskjellige bergarter og lokaliteter i Miværdal pyroksenitt massiv. (T. Vrålstad, personlig meddelelse, 2012). Analyseverdier for epidot er gitt med uthevet skrift. N,D. = Not Determined. ....	13
<b>Tabell 7.</b> Oversikt som viser fordelingen av apatitt i de enkelte siktefraksjoner av mølleproduktet. Vekt % apatitt = Vekt % $P_2O_5$ x 2,37 som er hentet fra XRF analyser. Feed 20-600 mikron er fraksjonen som ble brukt i flotasjonsforsøkene.....	21
<b>Tabell 8.</b> Oversikt over vektfordelingen av de forskjellige partikkelstørrelsene og av $P_2O_5$ , samt beregnet apatitt mengde (% $P_2O_5$ x 2,37) i Feed fraksjonen (20-600 mikron) benyttet i de videre oppredningsforsøkene. ....	22
<b>Tabell 9.</b> Tabellarisk oversikt som viser gjennomsnittlig material balanse i de ulike leddene i oppredningsprosessen .....	28
<b>Tabell 10.</b> Oversikt som viser fordelingen av apatitt i de forskjellige prosess-trinnene. Tallverdiene er beregnet fra XRF-analyseverdier av $P_2O_5$ . ....	29



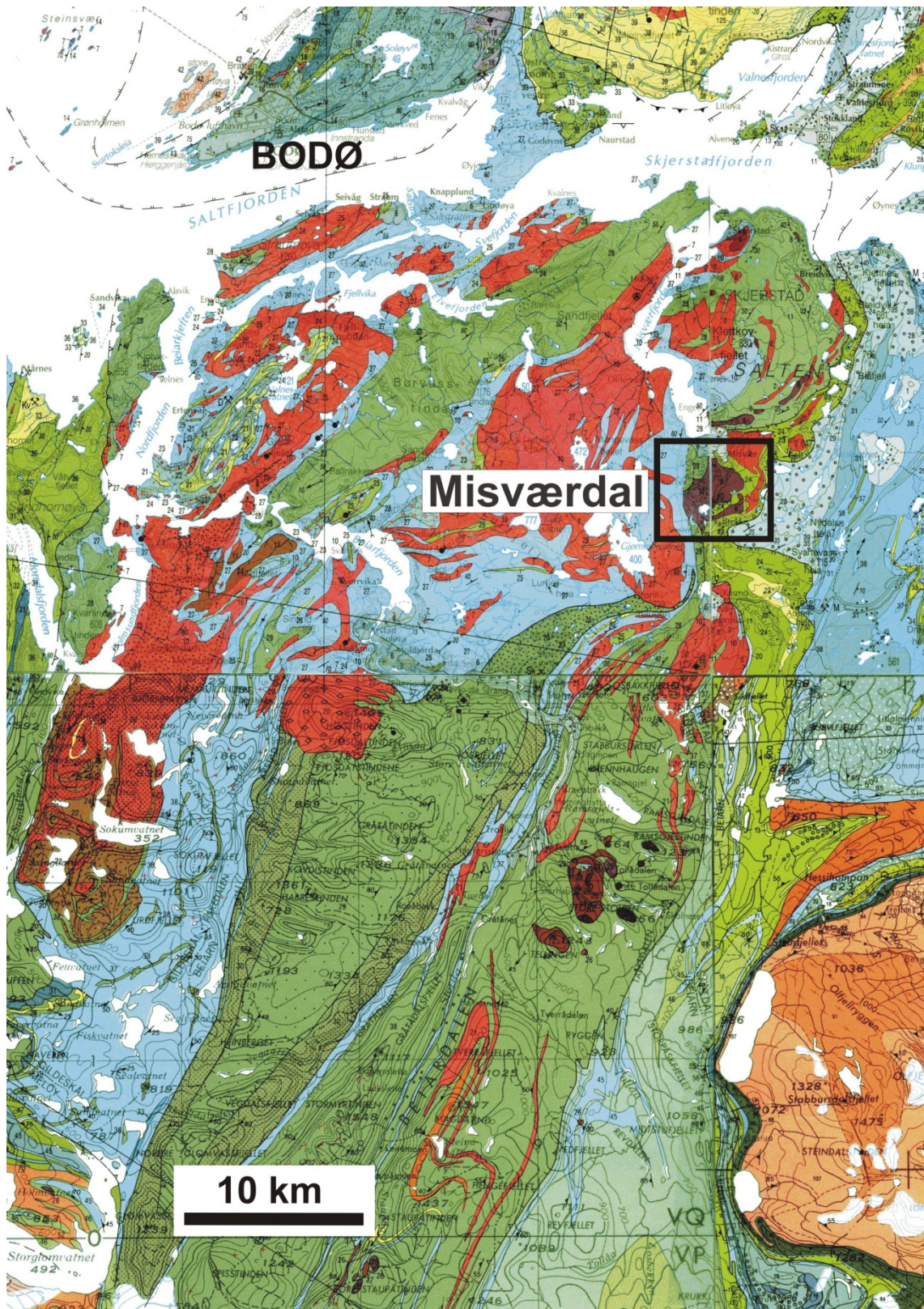
## FORORD

Oppredningsforsøkene er utført av Nils Egil Johannessen som også har utformet rapporten. Han har lang erfaring med separering av ulike typer industrimineraler gjennom sitt virke som mangeårig driftssjef for North Cape Minerals (1994-2008) og senere Sibelco Nordic (2009-2011) sitt pegmatitt-brudd og flotasjonsanlegg på Glamsland (kalifeltspat, natronfeltspat og kvarts), samt formalingsanlegg og utskipningshavn på Fossbekk, alle beliggende ved Lillesand.

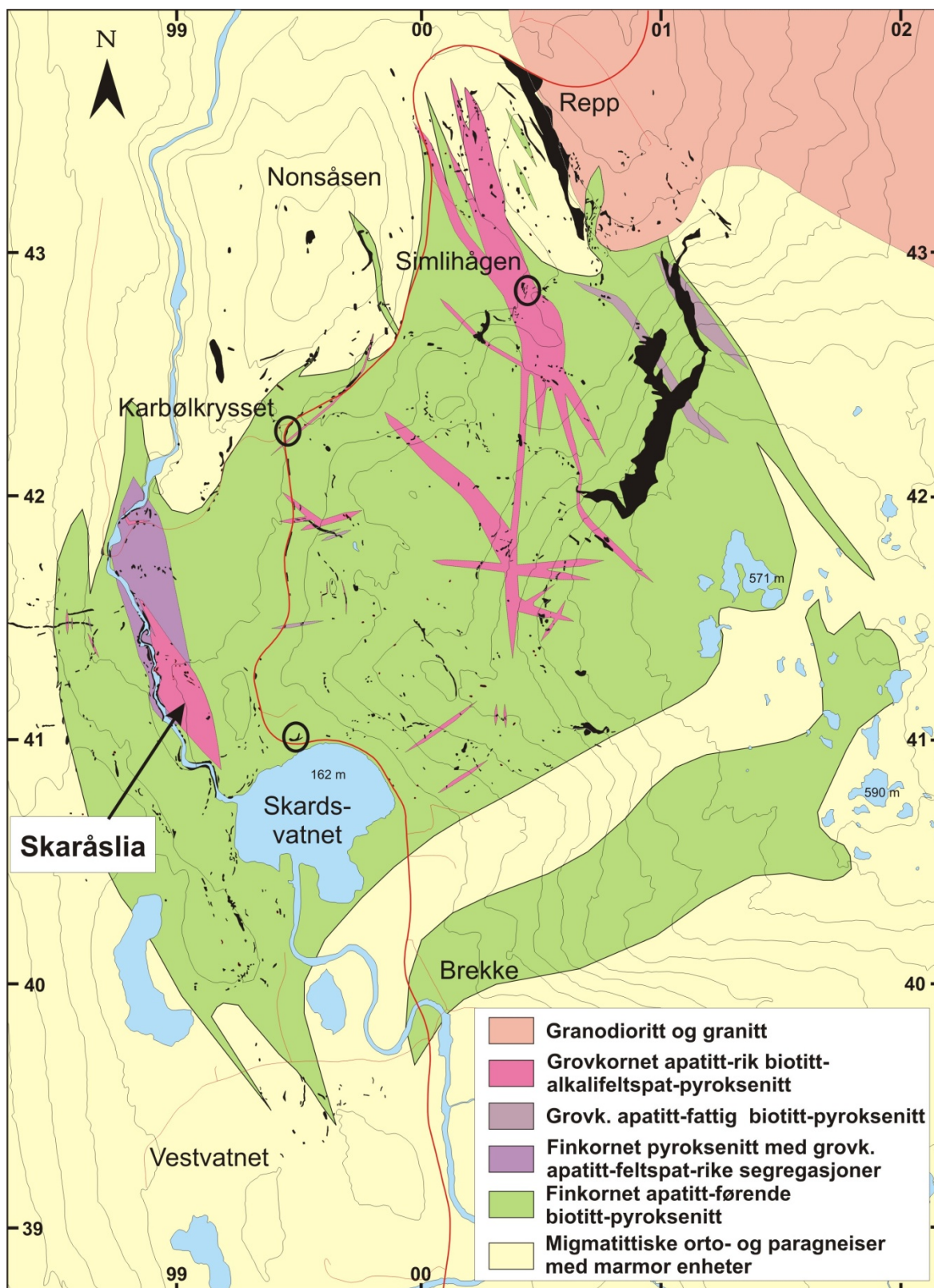
Dette forordet som er skrevet av forsker Peter M. Ihlen ved NGU, gir bakgrunnen for oppredningsforsøkene og hovedtrekkene ved Misværdal apatittforekomst som ble påvist i 2006 av Nordland Mineral, en idegruppe nedsatt av Nordland fylkeskommune for å fremme industrialisering av mineralforekomster i fylket (Lindahl og Ihlen, 2015). Forekomsten er beskrevet i Ihlen (2008) og Ihlen og Furuhaug (2011, 2013).

Oppredningsforsøkene gjøres innenfor prosjektet: "Undersøkelse av apatittforekomster i Nordland" som i perioden 2016-2017 hadde en total kostnadsramme på NOK 1 132 000,-. Prosjektet ble støttet med et tilskudd til utviklingstiltak (40032200-4033001) på NOK 550 000,- fra Nordland fylkeskommune (Nfk) og et noe større beløp fra NGU som samlet medgikk til undersøkelse av potensielle magmatiske apatittforekomster i Nordland. Disse omfatter pyroksenittganger i Velfjord, monzodioritter i Hamarøy-Lofoten, en pyroksenittplugg på Nesøya innenfor Træna og et pyroksenittmassiv i Misværdalen i Bodø kommune. Berggrunnskartlegging, prøvetaking og kjemiske analyser viser at det så langt bare er forekomsten i Misværdal som er av økonomisk interesse. På sistnevnte sted ble det i juli 2016 sprengt ut rågods for oppredningsforsøk i en av de rike sonene i Misværdal apatittforekomst.

Misværdal apatittforekomst ligger i bunnen av Misværfjorden, ca. 34 km sørøst for Bodø (Figur 1). Den omfatter to kropper av apatitt-rike ultramafiske bergarter som består hovedsakelig av pyroksen og biotitt, samt varierende mengder apatitt, alkalifeltspat, plagioklas, amfibol, kalkspat, titanitt, epidot og allanitt (et Th + REE-rikt epidotmineral). Den største av kroppene har en utstrekning på 6 km<sup>2</sup>, mens den minste halvmåne-formete kroppen måler 2 km<sup>2</sup> (Figur 2).



**Figur 1.** Geologisk kart som viser beliggenheten av Misværdal pyroksenittmassiv og apatittforekomst i Bodø kommune. Bergarter angitt med røde farger = granittiske intrusjoner, brunlige = gabbroiske og diorittiske intrusjoner, lilla = ultramafiske bergarter, grønnlige = glimmerskifre og gneisser, gule = kvartsitter, blågrønne = kalkglimmerskifre, blåe = karbonatbergarter og orange farger = palaeoproterozoiske bunngneiser. Kartet er hentet fra Ihlen (2008).



**Figur 2.** Forenklet geologisk kart som viser beliggenheten av den apatitt-rike Skaråsli-sonen innenfor den lavgehaltige Misværdal apatittforekomst. De svarte feltene i den vestlige pyroksenittkroppen angir utstrekningen på de enkelte blotninger og blotningsfelter (ikke vist i den østlige kroppen). Kartet er hentet fra Ihlen og Furuhaug (2013).



Kroppene består hovedsakelig av fin- til middelskornete og massive apatitt-førende biotitt-pyroksenitter som gjennomsettes av grovkornete apatitt-rike biotitt-alkalifeltspat-pyroksenitt soner som er karakterisert ved høyt innhold av svarte biotitt-aggregater og lys grå nåleformete alkalifeltspat-apatitt sammenvoksninger (se Figur 4). Dessuten opptrer det også underordnede ganger av apatitt-fattige grovkornete biotitt-rike pyroksenitter (Figur 2), monzonitter, syenitt pegmatitter og karbonatitter (Ihlen og Furuhaug, 2011). Som det fremgår av Figur 2 er blotningsgraden lav og det må antas at det i massivet finnes apatitt-rike soner som ennå ikke er påvist.

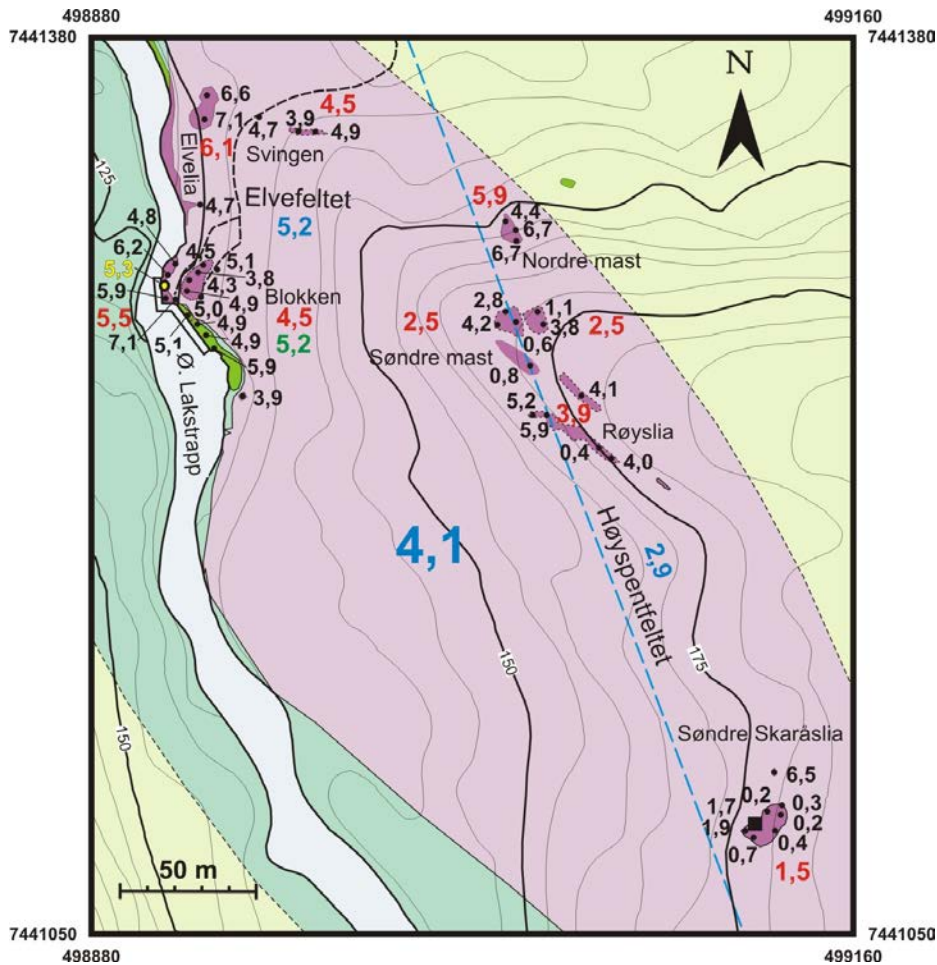
Knakkprøvetaking ble utført i 2008 i samarbeid med Yara International ASA og borkaksprøvetaking i 2011 og 2012 med støtte fra Nfk (Ihlen og Furuhaug, 2011, 2013). Dessuten ble det foretatt knakkprøvetaking langs Lakselva i 2016 og ellers spredt i massivet i forbindelse med den geologiske kartleggingen som ble foretatt i 2010 med støtte fra Nfk.

Det er totalt analysert 419 pyroksenittprøver hvorav 190 representerer borkaksprøver mens de resterende er knakkprøver. Det aritmetiske gjennomsnittsinholdet for alle typer ultramafiske bergarter innenfor de to kroppene med en total utstrekning på 8 km<sup>2</sup> er 2,27 vekt % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> eller 5,38 vekt % apatitt. Fordelingen av apatitt i de pyroksenittiske bergartene er svært ujevn og kan ofte variere med flere vekt % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> på meterskala. Det er vanligvis de grovkornete biotitt- og alkalifeltspat-rike pyroksenittiske bergartssonene som har høyest apatitt-innhold slik som i Skaråsli-sonen ned mot Lakselva som gir et aritmetisk gjennomsnitt på 4.1 vekt % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> eller 9,6 vekt % apatitt (Figur 3). Selv om grovt beregnet tonnasje bare er ca 30 Mtonn så tilsvarer apatitt-gehalten det som utvinnes fra Yara International sin Siilinjärvi forekomst i Finland.

Siden Skaråsli-sonen fører et gjennomsnittlig apatitt-innhold som ligger nær økonomisk drivverdige gehalter var det ønskelig å teste apatittmalmens oppredningsegenskaper og muligheten for å fremstille et brukbart apatitt-konsentrat. Det ble derfor sprengt ut rågods fra kaksborhull M 179 ved Øvre Lakstrapp (Figur 3). Borkakset inneholdt 5,30 vekt % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i henhold til Ihlen og Furuhaug (2011).

Tidligere utførte mikrosonde (EMP)- og laser analyser av apatitt i pyroksenittprøver fra Karbølkrysset og Skardsvatnet ved Fylkesvei 812 (Misvær-Rognan), samt fra Simlihågen (Figur 2) har vist at apatitten har relativt lavt innhold av klor (< 0,1 wt. %) og radioaktive elementer (Th, U) (Tabell 1 og 2), noe som muliggjør bruken av

fremstilte apatitt-konsentrater fra forekomsten i produksjon av fosfatgjødning. Innholdet av sjeldne jordartselementer som kan ekstraheres som biprodukt når mengden er stor nok, opptrer kun i moderate mengder (Tabell 2). Mikrosonde-analyser av de viktigste gangmineralene (pyroksen, amfibol og biotitt) er gitt i Tabellene 3, 4 og 5.



**Figur 3.** Kart over Skaråslia blotningsområde som viser innholdet av  $P_2O_5$  i de enkelte borkakshull (svarte tall og punkter) og i knakkprøve (svart firkant), samt gjennomsnittet for  $P_2O_5$  i de enkelte blotninger (røde) og i alle blotningene i området (blått). Dessuten gjennomsnittet for blotningene i de to feltene langs elven og høyspentlinjen (små blå). Grønt tall ved Lakstrappen angir gjennomsnittlig  $P_2O_5$  innhold i finkornet apatitt-rik biotitt pyroksenitt. Utsprengt rågods for oppredningsforsøkene som ga borkaks med 5,3 %  $P_2O_5$  er angitt med gult punkt og gul skrift ved Øvre Lakstrapp. Lilla sone = grovkornet apatitt-rik biotitt-alkalifeltspat-pyroksenitt, Lys blågrønn = finkornet pyroksenitt med grovkornete apatitt-alkalifeltspat-rike segregasjoner, Lys grønn = finkornet biotitt-pyrkosenitt med moderate mengder apatitt, Mørk grønn = finkornet apatitt-rik biotitt-pyroksenitt. Kartet er hentet fra Ihlen og Furuhaug (1911).

**Tabell 1.** Mikrosonde-analyser av klor-fattig fluor-apatitt fra flere forskjellige bergarter og lokaliteter i Miværdal pyroksenitt-massiv (T. Vrålstad, personlig meddelelse, 2012).

Prøve nr.	47656	47659	47660	47667	49908
Lokalitet	Karbølkrysset			Skardsvatnet	Simlihågen
Antall analyserte korn	6	4	4	4	4
Bergart	Grovkornet pyroksenitt	Grovkornet omvandlet pyroksenitt	Karbonatitt	Finkornet biotitt pyroksenitt	Grovkornet apatitt-rik pyroksenitt
SiO <sub>2</sub>	0,65	0,53	0,70	0,61	0,24
FeO	0,06	0,03	0,06	0,13	0,01
MnO	0,03	0,00	0,05	0,04	0,03
MgO	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00
CaO	54,73	54,30	53,36	54,89	55,22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40,79	40,95	40,56	41,03	42,05
F	2,67	2,46	2,73	3,07	2,58
Cl	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	0,24	0,26	0,14	0,09
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,44	0,46	0,80	0,41	0,28
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,10	0,18	0,13	0,06
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26	0,28	0,39	0,22	0,17
Total	99,78	99,26	99,01	100,63	100,60

**Tabell 2.** Laser-ablasjon ICP-MS analyser av de enkelte elementer i gruppen av sjeldne jordarter (REE), samt thorium og uran i apatitt (Ihlen et al., 2014). Verdiene er gitt i ppm eller gram/tonn og representerer gjennomsnittet av det oppgitte antall analysepunkter som er utført på polerte tykk slip.

Vertsbergart	Antall	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Th	U
Grovkornet pyroksenitt	9	530,4	1910,1	237,5	933,4	213,8	50,4	152,9	16,0	65,1	9,3	18,3	1,9	10,0	1,2	4150,5	70,5	23
Grovkornet pyroksenitt	11	737,3	2654,2	357,3	1394,0	309,5	73,7	215,4	23,4	94,3	13,8	26,2	2,7	14,3	1,7	5917,7	99,9	20
Grovkornet pyroksenitt	10	989,4	2978,8	353,2	1340,5	283,3	65,5	194,8	20,4	80,2	11,4	21,2	2,2	11,3	1,3	6353,2	95,4	15
Grovkornet pyroksenitt	14	745,1	2551,4	331,4	1294,2	271,5	62,5	182,3	19,1	76,2	11,2	21,0	2,2	11,9	1,5	5581,3	60,5	11

**Tabell 3.** Mikrosonde-analyser av kalsium-rik augittisk klinopyrksen fra forskjellige bergarter og lokaliteter i Miværdal pyroksenitt massiv (T. Vrålstad, personlig meddelelse, 2012).

Prøve nr.	47656		47659		47660				49908	
Lokalitet	Karbølkrysset		Karbølkrysset		Karbølkrysset				Simlihågen	
Bergart	Grovkornet biotitt-pyroksenitt		Grovkornet talk-omvandlet pyroksenitt		Karbonatitt				Grovkornet apatitt-rik biotitt-pyroksenitt	
SiO <sub>2</sub>	52,25	50,93	53,61	53,65	50,78	51,04	50,86	51,17	52,80	54,04
TiO <sub>2</sub>	0,17	0,45	0,24	0,19	0,27	0,25	0,26	0,23	0,26	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,47	2,45	0,84	1,03	1,55	1,52	1,51	1,21	1,53	0,50
<b>FeO</b>	<b>8,93</b>	<b>9,66</b>	<b>4,80</b>	<b>4,45</b>	<b>12,81</b>	<b>12,70</b>	<b>12,93</b>	<b>14,10</b>	<b>6,36</b>	<b>7,52</b>
MnO	0,19	0,19	0,10	0,08	0,24	0,24	0,20	0,23	0,15	0,21
<b>MgO</b>	<b>12,58</b>	<b>11,87</b>	<b>15,42</b>	<b>15,43</b>	<b>10,07</b>	<b>10,08</b>	<b>10,05</b>	<b>9,39</b>	<b>14,41</b>	<b>13,67</b>
CaO	23,53	23,65	24,66	24,73	22,46	22,37	22,37	21,83	23,92	23,74
Na <sub>2</sub> O	0,91	0,92	0,41	0,56	1,32	1,35	1,47	1,43	0,43	0,94
K <sub>2</sub> O	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Total	100,04	100,14	100,10	100,12	99,49	99,55	99,65	99,60	99,88	100,64

**Tabell 4.** Mikrosonde-analyser av kalsium-rik aktinolitisk og tremolitisk amfibol fra forskjellige bergarter og lokaliteter i Miværdal pyroksenitt massiv (T. Vrålstad, personlig meddelelse, 2012).

Prøve nr.	47659		47667		49908	
Lokalitet	Karbølkrysset		Skardvatnet		Simlihågen	
Bergart	Grovkornet talk-omvandlet pyroksenitt		Finkornet biotitt-pyroksenitt		Grovkornet apatitt-rik pyroksenitt	
SiO <sub>2</sub>	56,45	56,68	40,17	39,96	52,81	54,64
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,08	2,03	2,04	0,08	0,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,88	0,93	11,84	11,56	3,48	1,73
<b>FeO</b>	<b>5,54</b>	<b>6,10</b>	<b>19,76</b>	<b>19,14</b>	<b>11,34</b>	<b>10,86</b>
MnO	0,10	0,10	0,36	0,35	0,17	0,17
<b>MgO</b>	<b>20,94</b>	<b>20,26</b>	<b>8,31</b>	<b>8,27</b>	<b>16,35</b>	<b>17,03</b>
CaO	13,01	13,21	10,97	11,08	12,46	12,42
Na <sub>2</sub> O	0,57	0,45	2,17	2,16	0,94	0,65
K <sub>2</sub> O	0,15	0,09	2,16	2,12	0,42	0,19
F	0,27	0,10	0,23	0,19	0,31	0,14
Cl	0,03	0,00	0,04	0,05	0,00	0,01
Total	97,94	97,98	98,05	96,91	98,35	97,87

**Tabell 5.** Mikrosonde-analyser av biotitt fra forskjellige bergarter og lokaliteter i Miværdal pyroksenitt massiv. (T. Vrålstad, personlig meddelelse, 2012). Legg merke til variasjonene i FeO og MgO innhold.

Prøve nr.	47656			47659				47667		49908	
Lokalitet	Karbølkrysset			Karbølkrysset				Skardvatnet		Simlihågen	
Bergart	Grovkornet biotitt-pyroksenitt			Grovkornet talk-omvandlet pyroksenitt				Finkornet biotitt-pyroksenitt		Grovkornet apatitt-rik pyroksenitt	
SiO <sub>2</sub>	36,42	36,45	36,17	38,39	38,75	38,82	39,05	37,21	37,01	37,27	37,40
TiO <sub>2</sub>	1,38	1,47	1,31	1,55	1,47	1,59	0,85	1,14	1,09	1,02	1,27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,20	13,94	13,53	14,56	14,57	14,59	14,20	12,94	13,23	14,41	14,50
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00
FeO	<b>18,41</b>	<b>18,56</b>	<b>19,43</b>	<b>9,92</b>	<b>9,67</b>	<b>9,76</b>	<b>9,09</b>	<b>21,31</b>	<b>20,94</b>	<b>15,89</b>	<b>16,10</b>
MnO	0,19	0,19	0,12	0,09	0,05	0,09	0,08	0,33	0,28	0,14	0,14
MgO	<b>12,80</b>	<b>13,09</b>	<b>12,84</b>	<b>19,52</b>	<b>19,51</b>	<b>19,69</b>	<b>20,26</b>	<b>11,88</b>	<b>11,87</b>	<b>14,90</b>	<b>14,54</b>
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00
Na <sub>2</sub> O	0,08	0,08	0,10	0,12	0,11	0,10	0,09	0,05	0,03	0,06	0,10
K <sub>2</sub> O	9,71	9,66	9,84	10,18	10,31	10,33	10,26	10,03	10,10	10,10	9,99
F	0,21	0,38	0,21	0,47	0,59	0,56	0,76	0,50	0,37	0,44	0,34
Cl	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,04
Total	93,44	93,84	93,56	94,80	95,05	95,54	94,69	95,39	94,95	94,26	94,42

**Tabell 6.** Mikrosonde-analyser av allanitt og epidot fra forskjellige bergarter og lokaliteter i Miværdal pyroksenitt massiv. (T. Vrålstad, personlig meddelelse, 2012). Analyseverdier for epidot er gitt med uthevet skrift. N.D. = Not Determined.

Prøve nr.	47659	47660				47667		49908	
Lokalitet	Karbølkrysset				Skardvatnet		Simlihågen		
Bergart	Grovkornet talk-omvandlet pyroksenitt	Kalkspat karbonatitt (søvitt)				Finkornet biotitt-pyroksenitt		Grovkornet apatitt-rik pyroksenitt	
SiO <sub>2</sub>	31,31	31,44	28,81	<b>35,77</b>	<b>36,35</b>	<b>37,39</b>	31,78	31,84	31,57
TiO <sub>2</sub>	0,64	0,57	1,38	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,07</b>	0,85	0,70	0,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,35	12,87	7,73	<b>19,65</b>	<b>19,62</b>	<b>21,48</b>	14,84	16,13	15,11
FeO	11,41	17,78	20,99	<b>14,47</b>	<b>14,90</b>	<b>13,97</b>	13,51	12,53	12,54
MnO	0,14	0,08	0,11	<b>0,10</b>	<b>0,07</b>	<b>0,13</b>	0,23	0,14	0,15
MgO	1,94	0,35	0,72	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	1,16	1,29	1,57
CaO	11,28	12,38	9,71	<b>18,91</b>	<b>17,05</b>	<b>21,18</b>	12,40	12,26	11,99
F	0,17	0,14	0,15	<b>0,07</b>	<b>0,00</b>	<b>0,03</b>	0,06	0,11	0,24
Cl	N.D.	N.D.	N.D.	<b>N.D.</b>	<b>N.D.</b>	<b>N.D.</b>	N.D.	N.D.	N.D.
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	N.D.	N.D.	N.D.	<b>N.D.</b>	<b>N.D.</b>	<b>N.D.</b>	N.D.	N.D.	N.D.
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,26	4,70	7,90	<b>0,64</b>	<b>0,07</b>	<b>0,04</b>	7,25	5,91	7,37
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,28	9,32	12,75	<b>1,55</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	10,62	10,17	10,89
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,67	0,81	1,06	<b>0,23</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,75	1,15	0,79
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,35	3,99	3,78	<b>0,89</b>	<b>0,09</b>	<b>0,00</b>	2,17	3,03	2,64
Total	95,75	94,40	95,07	<b>92,30</b>	<b>87,81</b>	<b>94,15</b>	95,58	95,24	95,66

## 1. INNLEDNING

Befolkningsvekst og generell velstandsutvikling gir grunnlag for et stadig økende behov for et stort spekter av mineraler som råstoff til ulike industrielle prosesser og produkter. Samfunnsmessig er det generelt lav forståelse og kunnskap om hvor avhengig vi er av mineraler og eventuelt deres innhold av metaller for å utvikle det samfunnet som vi er en del av.

Ettersom bergarter og mineraler utgjør ikke-fornybare ressurser, er det avgjørende at disse blir dokumentert og vurdert med tanke på utvinning og anvendelse innenfor akseptable miljømessige og økonomiske rammer og begrensninger.

- Apatitt er et viktig råstoff for å produsere fosforsyre som igjen er en viktig komponent i kunstgjødsel. Forventet befolkningsvekst og behov for økt matproduksjon gjør at behovet for gjødning vil øke betydelig i tiden fremover. Apatitt har derfor de siste årene fått et stadig sterkere fokus som et høyst strategisk mineral. I EU oppfattes fosfor som et ressursmessig kritisk element.

Yara International ASA indikerer at selskapet er interessert i all dokumentasjon og utvikling av nye potensielle apatitt-forekomster i både inn- og utland.

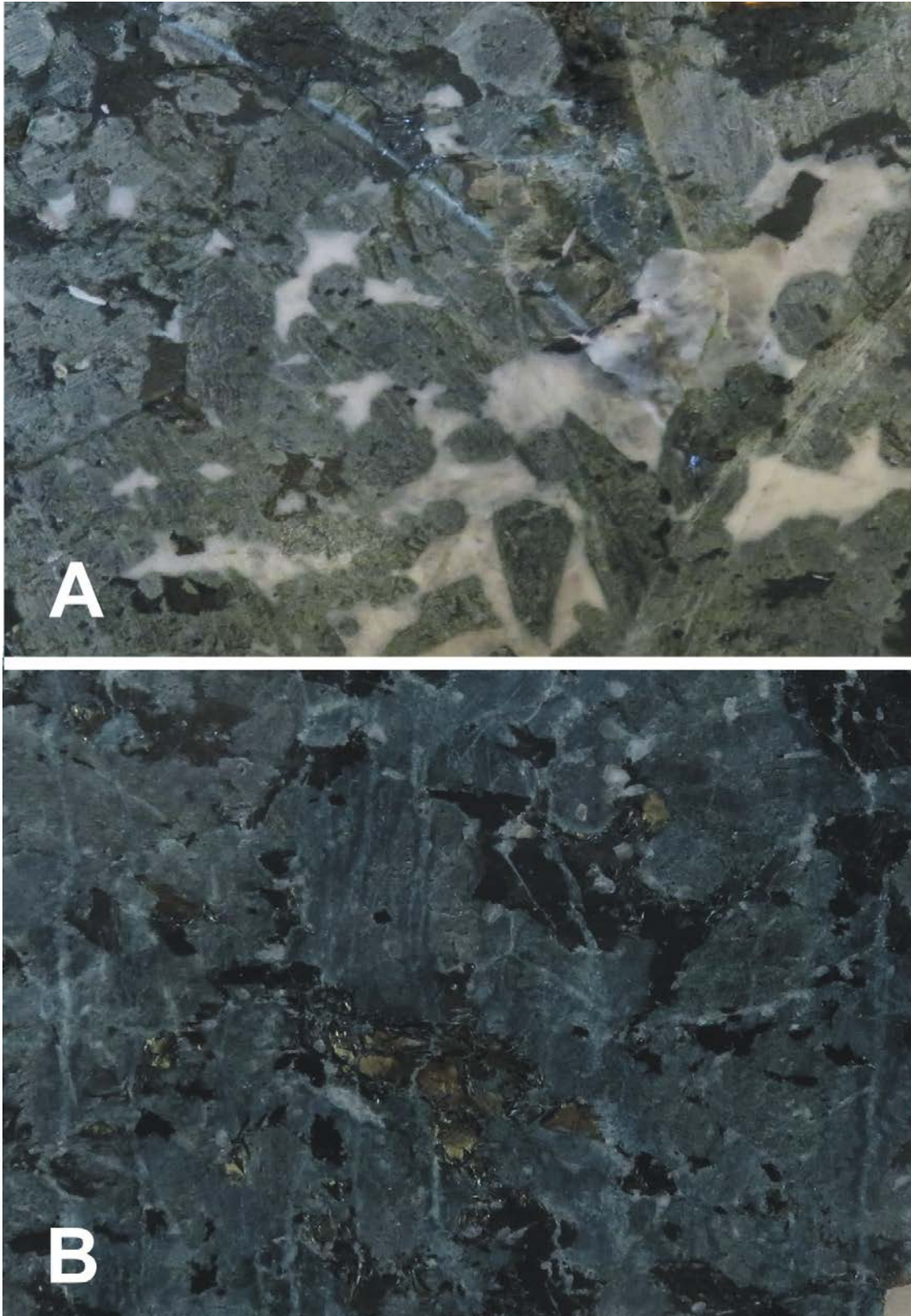
Tidligere uttak av apatitt som biprodukt under driften på niob i Søve gruve har gjort at det har blitt fornyet interesse for apatitten i kalkspat-karbonatittbergarten (søvitt) i Fensfeltet som en mulig ressurs for norsk apatitt produksjon. Men evalueringer av denne bergarten indikerer at ressursgrunlaget her ligger langt under hva som fordres for kunne starte industriell produksjon.

NGU har i samarbeid med Nordland fylkeskommune påvist en apatitt-rik bergart i Misværdalen i Bodø kommune. Av denne potensielt utnyttbare pyroksenittiske bergarten ble det ved Øvre Lakstrapp i Lakselva (Skaråslia) sprengt ut prøver på til sammen ca. 30 kg til bruk i planlagte oppredningsforsøk. Prøvene ble ansett å representere en forvitringmessig, relativt upåvirket bergart som vist i Figurene 4 og 5.

Forespørselen fra NGU var om det var mulig å utvikle i lab-skala en oppredningsmetodikk som kunne benyttes til å produsere minimum 1 kg av reneest mulig apatitt konsentrat og uten at utvinningsprosenten var av stor betydning.



**Figur 4.** Skårete flater av utsprengt materiale av pyroksenitter brukt i oppredningsforsøkene. **A)** Foto av en mørk grønn masse av grovkornete pyroksenkrystaller sammenvokst med svarte aggregater av biotitt og hvite flekker av alkalifeltspat og mange tynne grå lister av apatitt. Lengste side av utsnittet er 9,5 cm. **B)** Foto av samme type bergart, men med grå nåleformete krystaller av apatitt. Lengste side av utsnittet er 7 cm.



**Figur 5.** Skårete flater av utsprengt materiale av pyroksenitter brukt i oppredningsforsøkene. **A)** Fotoet som skiller seg fra de i Fig. 4 ved at de grove pyroksen-krystallene er sammenvokst med grovkornete aggregater av hvit alkalifeltspat og grå apatitt og i liten grad med biotitt. Lengste side av bilde A er 8 cm. **B)** Bildet viser grovkornet apatitt-førende pyroksenitt tilsvarende den i Figur 4B, men gjennomsett av hårtynne kalkspatårer som er ledsaget av omvandling av pyroksen langs årene til finkornet tremolittisk/aktinolittisk amfibol. Lengste side er 10 cm

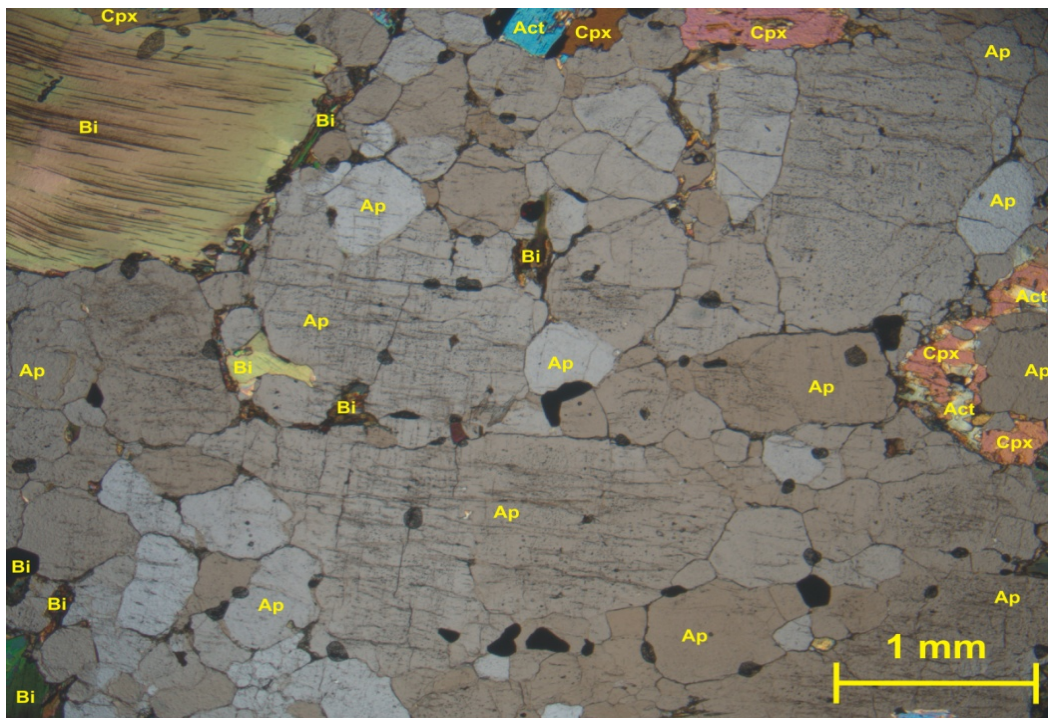


Hovedformålet for NGU var å få produsert et apatittkonsentrat for videre analysering av konsentratets totale radioaktivitet i becquerel. Et lavt innhold her vil være av avgjørende betydning for om det vil være aktuelt å gå videre med ytterlig geologisk evaluering, eventuell kjerneboring og et mer omfattende prosesseringsforsøk. Det er tidligere ikke gjennomført noen form for oppredningsforsøk av denne noe spesielle apatitt-førende bergart.

## 2. PRØVEMATERIALET

Prøvematerialet i form av håndstykker (Figurene 4 og 5) ble mottatt i tre omganger med mellomliggende serier med oppredningsforsøk.

I forkant ble det mottatt noen mikroskopbilder av tynnslip (Figurene 6 og 7) som allerede da indikerte en spesielt utfordrende bergart med hensyn til kornstørrelse og sammenvoksningsteksturer for videre oppkonsentrering av apatitt i et eget konsentrat.

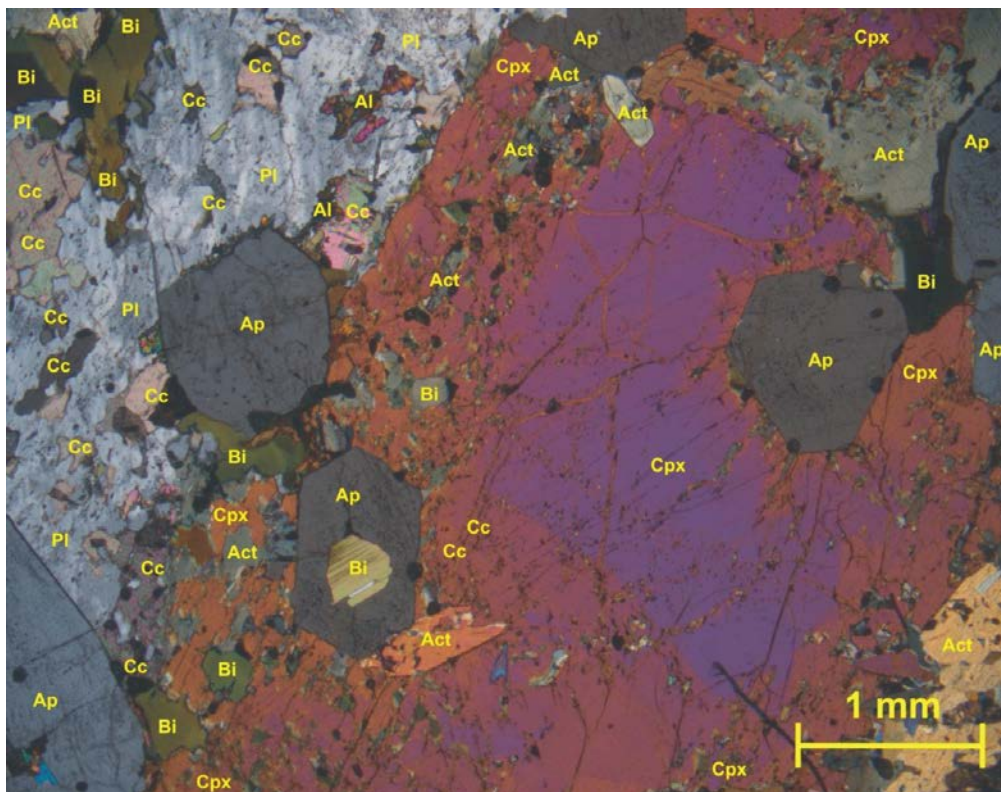


**Figur 6.** Mikroskopbilde av finkornet granulært aggregat av apatitt (Ap) som opptrer i grovkornet pyroksenitt bestående av pyroksen (Cpx), biotitt (Bio) og aktinolitisk amfibol (Act). Sistnevnte dannes ved omvandling av av pyroksen.

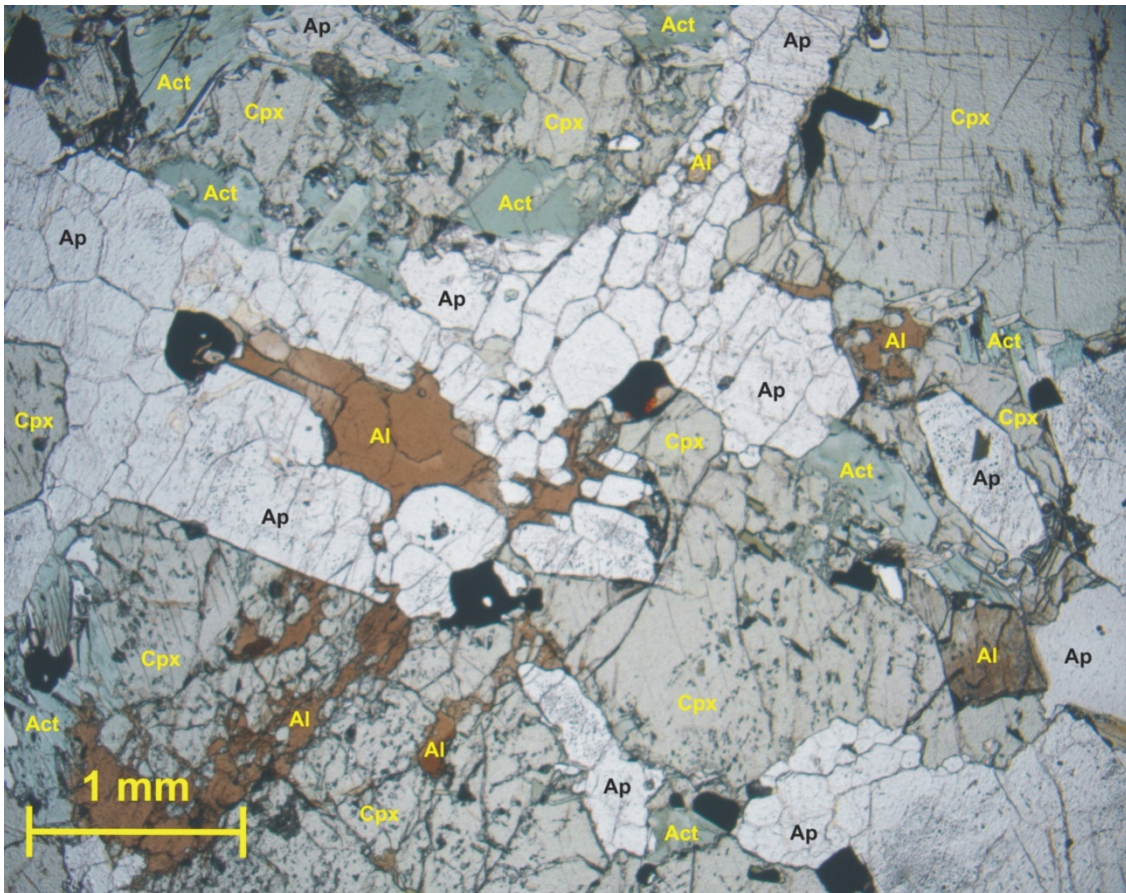
Mottatte prøvestuffer oppfattes i en stor grad å avvike fra tynnslipene med tanke på mengdeforholdene innbyrdes mellom de ulike mineralene og spesielt størrelse og form på apatitt-krystallene (Ap).

Frisk biotitt (Bi) og grønnaktig pyroksen (Cpx) viste klart å være de dominerende mineralene i de mottatte prøvene. Pyroksen er i varierende grad omvandlet langs spalteplan, mikrosprekker og korngrenser til aktinolitisk amfibol (Act), ofte sammenvokst med kalkspat (Cc) (Figurene 7 og 8). Når pyroksen nevnes i det etterfølgende inkluderer begrepet også en viss mengde amfibol.

En del av apatitt-aggregatene er dessuten omgitt av sprekkebundete korn og aggregater av alanitt (Al) (Figur 8). I tillegg er apatitten noen steder sammenvokst med aggregater av perthittisk alkalifeltspat (pl) (Figur 7). XRD analyse av et prøvekonsentrat av apatitt viste også at bergarten måtte inneha et mindre innhold av titanitt og kvarts.



**Figur 7.** Mikroskopbilde av grovkornet pyroksen (cpx) og perthittisk alkalifeltspat (Pl) med inneslutninger av og sammenvokst med apatitt (Ap), biotitt (Bi), kalkspat (Cc), actinolitisk amfibol (Act) og allanitt (Al).



**Figur 8.** Mikroskopbilde av fin- til middelskornet pyroksenitt med listeformete aggregater av apatitt. Pyroksen-krySTALLene er omvandlet til grønnlig aktinolitt langs sprekker og korngrenser mens sprekker i nærområdet til apatitten er fylt med brun allanitt. Forkortelsene er som i Figur 7.

Målsetningen med forsøkene var å utvinne og oppkonsentrere apatitten til et reneest mulig konsentrat selv om bergarten i utgangspunktet ble ansett som oppredningsmessig sterkt utfordrende. I dette ligger det at apatitten delvis opptrer som tynne linser, liggende uregelmessig mellom de andre mineralene, hvor frimaling var forventet å bli en vanskelig utfordring.

Pyroksenitten inneholdt utover varierende mengder av Ca-mineralene aktinolitt og allanitt (Th-REE-rikt mineral), følgende tre hovedmineraler med mye Ca i gitteret:

- Apatitt
- Kalkspat
- Pyroksen – diopsid

Det er en kjent sak at det normalt vil være en utfordring å flotere apatitt selektivt dersom det er andre Ca-holdige mineraler tilstede i mineral-pulpen, spesielt kalkspat.

Kjente anion-samlere for apatitt vil også ha en tendens til også å gjøre andre Ca-holdige mineraler hydrofobe.

### 3. OPPREDNINGSTRINNENE

#### 3.1 Nedmaling i stavmølle

Etter en viss manuell deformering og homogenisering av prøvestuffene, ble disse knust i tre trinn i kjeftetygger og siktet til minus 8 mm. Stoffene hadde en noe uventet svak bruddstyrke og lot seg enkelt deformeres og knuses.

Videre ble frimalingen foretatt vått i en ca 35 liters stavmølle (Figur 9) med møllestaver av rustfritt stål. Nedmalingen ble foretatt med pulptykkelse på ca 40 % fast stoff. Innvekt 2 kg nedknust og maletid ca 7 minutter. Fordelt på 3 kampanjer ble det foretatt 19 nedmalingsforsøk med påfølgende 30 flotasjons- og oppredningstester. I det påfølgende vil det i hovedsak bli tatt utgangspunkt i oppredningstestene nr.: 21 – 3117.



**Figur 9.** Bildet viser den 35 liter store stavmøllen i rustfritt stål som ble brukt i den våte nedmalingen av minus 8 mm fraksjonen.

Mølleproduktet ble siktet på 600 mikron og avslammet på ca 20 mikron. Gjennom nedmalingen i stavmølla ble biotitten selektivt sterkt anrikt i fraksjonen > 600 mikron

og kunne siktes i fra eget produkt uten større tap av apatitt (Tabell 7). Beregnet apatitt-innhold i nedknust rågods før frasikting og avslamming er **13,15 %**.

**Tabell 7.** Oversikt som viser fordelingen av apatitt i de enkelte siktefraksjoner av mølleproduktet. Vekt % apatitt = Vekt %  $P_2O_5$  x 2,37 som er hentet fra XRF analyser. Feed 20-600 mikron er fraksjonen som ble brukt i flotasjonsforsøkene

FRAKSJON	VEKT-FORDELING, %	VEKT % $P_2O_5$	VEKT % APATITT	VEKTFORDELING AV APATITT I %
Biotitt > 600 mikron	15,1	1,43	3,39	3,9
Feed 20-600 mikron	81,1	6,32	14,97	92,3
Slam < 20 mikron	3,8	5,54	13,13	3,8
Sum	100			100

Avslammingen < 20 mikron er nødvendig før oppstart av flotasjon, mens avsiktingen av hovedsaklig grov biotitt gir en viss oppkonsentrering av apatitt i pågangen før videre oppredning. Dette gir et samlet tap av apatitt på **7,7 %**.

Det var forventet at apatitten på grunn av redusert malemotstand, ville få en viss anrikning i slamfraksjonen < 20 mikron. Ettersom apatitt-innholdet her er lavere enn i hoved pågangs-fraksjonen 20-600 mikron, indikerer dette at apatitten noe uventet har en høyere malemotstand enn kalkspat og pyroksen i bergarten.

Tabell 8 viser at også mellomfraksjonen i feed fraksjonen har et høyere apatitt-innhold enn finfraksjonen (< 63 mikron). Ut fra visuell observasjon av selve råstoffene, kan en stille spørsmål om apatitten ikke er frimalt tilstrekkelig og foreligger fortsatt som smittede og halvkorn som oppkonsentreres i mellomfraksjonen. I praksis vil videre ML (Mineral Liberation ) analyser på disse fraksjonene kunne gi viktig avklaring og informasjon.

**Tabell 8.** Oversikt over vektfordelingen av de forskjellige partikkelstørrelsene og av  $P_2O_5$ , samt beregnet apatitt mengde ( $\% P_2O_5 \times 2,37$ ) i Feed fraksjonen (20-600 mikron) benyttet i de videre oppredningsforsøkene.

FRAKSJON	VEKT-FORDELING, %	VEKT % P2O5	VEKT % APATITT	VEKTFORDELING AV APATITT I %
150-600 mikron	45,1	5,72	13,16	37,9
63-150 mikron	29,7	8,42	19,96	37,8
< 63 mikron	25,2	6,39	15,14	24,3
Sum	100			100

### 3.2 Flotasjon

I den apatitt-førende pyroksenitten fantes det ikke mineraler som hadde avvikende spesifikk vekt som kunne gi grunnlag for mineralseparasjoner basert på gravimetrisk separasjon. Enkle forsøk med magnetbehandling ga heller ikke indikasjoner på at denne metoden var aktuell å arbeide videre med som et tidlig trinn i oppredningsforsøkene.

En kom derfor raskt til at flotasjon av 20-600 mikron fraksjonen var den mest aktuelle separasjonsmetoden å arbeide videre med og eventuelt i kombinasjon med ulike magnetbehandlingsmetoder, spesielt dersom apatitten ville vise seg å være paramagnetisk. Syrebehandling med HCl for å redusere eventuelt innholdet av kalkspat i apatittkonsentratet, kunne også tenkes å bli aktuelt som en sluttbehandling.

Det er en kjent sak at det er vanskelig å flotere apatitt selektivt fra en mineralblanding som også inneholder kalkspat/dolomitt og eventuelt andre mineraler som har en høy andel Ca i gitteret. Det ble derfor tatt kontakt med den største produsenten av anion samlere for apatittflotasjon.

- Denne kjemikalieprodusenten har tatt patent på apatittsamlere og er meget forsiktig med å utlevere prøver uten at de skal benyttes i større prosjekter hvor de deltar i selve prosessutviklingen. Etter en lengre diskusjonsfase og kontraktutforming fikk vi utlevert to kvaliteter under forutsetning av at firma og

komponent-innholdet i databladet ikke ble nevnt i noen rapport. De var også i utgangspunktet usikker på i hvilken grad disse kjemikaliene ville fungere som selektiv apatitt samler i denne spesielle mineralblandingen.

- Kjemikalieleverandøren hadde en viss erfaring med at kaustisk-behandlet maisstivelse kunne ha en viss trykkende effekt på kalkspat ved forsøk på selektiv flotasjon av apatitt, noe som ble forsøkt i dette forsøksprogrammet uten noen synlig effekt.



**Figur 10.** Bildet viser en standard Denver lab flotasjonsmaskin som ble anvendt i flotasjonsforsøkene,

Selve flotasjonsforsøkene ble kjørt i en standard Denver lab flotasjonsmaskin (Figur 10) med innvekt på ca 400 g i hver flotasjonstest. I kampanje nr 3 som bestod av forsøksnummer 21 – 3117, ble det kjørt 4 flotasjonstester hvor (basert på en nedmaling) konsentrat og avganger ble slått sammen og benevnt som ett forsøksnummer.

Det ble i de to første testkampanjene ervervet nyttige erfaringer angående hvilke utfordringer som denne spesielle apatitt-bergarten ga for å oppnå et selektivt anriket apatittkonsentrat.

Følgende kjemikalier ble benyttet under flotasjonsforsøkene:

- Anion samler MD 20722 for apatitt (pålagt å ikke oppgi produsent) – 1 % løsning
- Natronlut for pH regulering – 15 % løsning
- Dowfroth 400 E Poly glycol ether - skummer
- Parafin – skum modifisering
- Kaustisk-behandlet stivelse – kalkspattrykker

Alle forsøkene ble kjørt med pH ca 10,5. Det ble også gjennomført innledende forsøk på «omvendt» flotasjon ved å forsøke å flotere opp pyroksen, biotitt mv i surt miljø med samlere for Fe – silikat mineraler. Dette forsøket var uten positive resultater. Den store utfordringen er at kalkspat løses når pH blir lav og nøytraliserer tilsatt svovelsyre slik at denne doseringen må økes vesentlig.

Prosessgangen for flotasjonsforsøkene basert på feed-fraksjonen 20 – 600 mikron» ble da som følger:

- Kondisjonering 5 minutter med aktuelle kjemikalier (45 % fast stoff)
- Apatitt grovflotasjon (hovedavgang)
- To trinns renseflotasjon av apatitt grovkonsentratet (avgang refluering)
- Tørking av apatittkonsentrat før videre bearbeiding

Anbefalte forsøk ved å forsøke å trykke kalkspat ved å benytte kaustisk-behandlet stivelse ble testet ut ved kondisjonering før tilsatt anion samler og sammen med denne, uten nevneverdig påviselig effekt. Denne tilsatsen ble allikevel benyttet i alle forsøkene i kampanje nr 3.

Allerede ved gjennomføringen av den første innledende forsøkskampanjen ble det klart at både kalkspat og pyroksen floterte uønsket effektivt sammen med apatitten og at andre separasjons teknikker måtte vurderes for å forsøke å oppkonsentrere det floterte apatittkonsentratet videre.

### **3.3 Magnet- og syre-behandling**

Mikrosonde-analysene av pyroksen, amfibol, biotitt og epidot (Tabellene 3-6) viser relativt store variasjoner i innholdet av FeO og FeO/MgO-forholdet i mineralene. Dette betyr at også de paramagnetiske egenskapene ville variere innenfor de



enkelte mineralgruppene i pågangen og at det sannsynligvis ville bli vanskelig å fjerne de MgO-rike variantene.

Enkle tester indikerte at det ved sterkfelts magnetbehandling var mulig å redusere pyroksen-innholdet betraktelig, men usikkert om noe av apatitten også ville la seg påvirke av spesielt sterke magnetiske gradienter selv om mikrosonde analysene viste for det meste meget lave FeO verdier (hovedsakelig <0.06 wt.% FeO; Tabell 1).



**Figur 11.** Bildet viser en såkalt belte-disc magnet produsert av Master Magnets Ltd som ble anvendt i forsøkene med tørr magnetbehandling av flotasjonskonsentratene.

Det er kjent sak at det er umulig å høyintensites-magnetbehandle effektivt minerablandinger som inneholder mer enn 10 % partikler < 75 mikron på konvensjonelle REE legerte rull-magneter. Blir pågangen så fin må det benyttes våt høyintensites-magnetbehandling på f eks Metso HGMS eller Slon, noe som ikke var mulig å få testet ut i denne sammenheng.

Eneste alternativ var tørr magnetbehandling som ble gjennomført i et test forsøk på en såkalt belte – disc-magnet produsert av Master Magnets Ltd (Figur 11). Det er

kun en slik magnet installert i Norge og den er i daglig bruk i laboratoriet ved en norsk bergverks virksomhet. Den ble benyttet for behandling av flotasjonskonsentratene både i kampanje nr 2 og 3. Det er på denne magneten mulighet til å foreta magnetbehandlingen i flere trinn og med stadig sterkere feltstyrke (maks 1 Tesla). Prinsippet med denne magneten er at mineralblandingen mates kontrollert på et relativt sakte-gående belte (Figur 11). Over og under beltet er det plassert henholdsvis N og S magnet poler hvor avstanden mellom disse kan reguleres. Det dannes da en gradient mot polen over beltet slik at de magnetiske partiklene blir løftet opp, mens de umagnetiske blir liggende i ro. En roterende skive som ligger under gradienten fører de magnetiske partiklene bort fra denne til de er ute av magnetfeltet og faller ned som eget magnetisk produkt. Magnetten har totalt 4 trinns behandling i en operasjon.

Målsetningen med behandlingen var i hovedsak å fjerne/reducere innholdet av pyroksen og aktinolittisk amfibol i apatitt-konsentratet. I praksis viste det seg at pyroksen kun lot seg fjerne i de to trinnene med maksimal feltstyrke. I dette ligger det at pyroksen/amfibol var betydelig svakere paramagnetisk enn for eksempel biotitt. Forsøkene indikerte at en del apatitt som generelt har meget lavt innhold av FeO (Tabell 1) også ble trukket ut som magnetisk, noe som indikere manglende frimaling og opptreden av smittede korn. Det ble også gjort forsøk med elektrisk separering ved Oppredningslaboratoriet på NTNU. Visuelt ga forsøkene ingen indikasjoner på at metoden var egnet til å skille lysegrønn pyroksen+amfibol og gråhvit apatitt.

Neste trinn i prosesseringen var høyst aktuelt, syre behandling (HCl) av det magnetbehandlede apatitt-konsentratet.

Denne behandlingen hadde to formål:

1. Oppløsning av kalkspat i konsentratet
2. Få indikasjoner på at apatitten var upåvirket av HCl

Det ble testet ulike syre konsentrasjoner uten at det indikerte å være spesielt avgjørende. I kampanje nr. 3 ble det benyttet ca 25 % HCl (fortynnet fra innkjøpt 37 % HCl).

### **3.4 Flytskjema med prosess resultater**

Det ble i hovedsak benyttet samme flytskjema for prosesseringen i kampanje 2 og 3. Kampanje nr 3 var basert på siste forsendelse av prøvemateriale fra NGU og det var

sluttkonsentratene fra forsøkene her, benevnt forsøk nr.: 21 – 3117, som ble samlet opp til 1 kg og videre sendt til NGU for analyse av total radioaktivitet.

Flytskjema for prosesseringen kombinert med apatittutviklingen gjennom forsøks-trinnene kan sammenfattes som vist i Tabellene 9 og 10.

Ut fra beregnet vekttap ved syrebehandling (HCl) indikeres det at ca 30 % av apatitten også lot seg løse ved behandlingen. Sannsynligvis kunne en her benyttet en svakere syrekonsentrasjon for om mulig kun å løse ut kalkspaten.

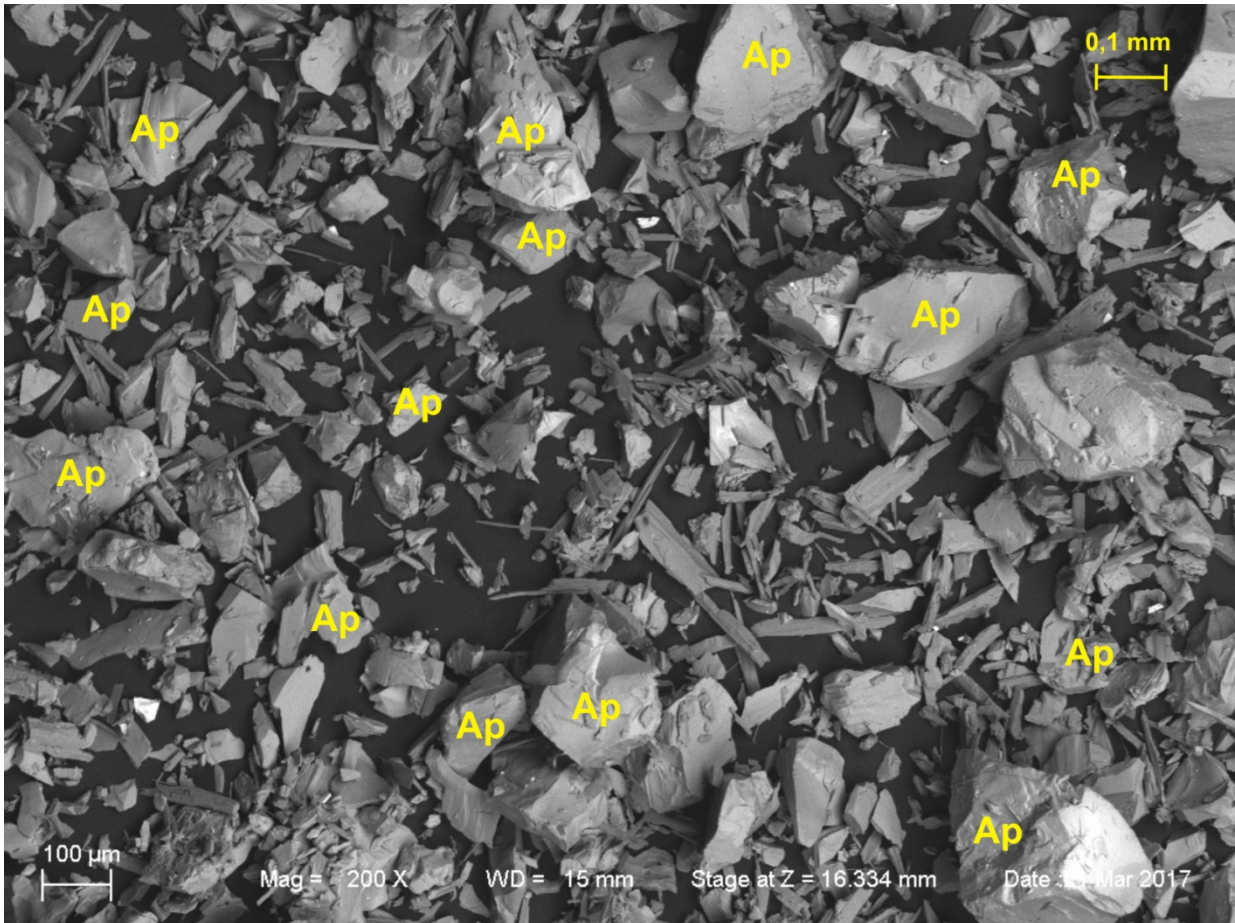
NGU har også hatt en annen prøve fra forsøkene nr. 21 – 3117 til analyse som viste 34,1 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> som tilsvarer 80,8 % apatitt. Dette ble undersøkt med SEM (Scanning Electron Microscopy) ved NGU hvor det ble vist at det ved siden av apatitt består av jern-fattig Mg-rik pyroksen (diopsid) og amfibol (aktinolitt-tremolitt) (Figur 12), samt noen korn av titanitt (Ca-Ti-silikat) og et par korn av strontium-rik barytt. Radioaktiv allanitt som er påviste tidligere ved mikroanalyser av mineraler i råmalmen ble ikke påvist under SEM-undersøkelsene av apatittkonsentratet. Karbonatmineraler, slik som kalkspat ble heller ikke påvist med SEM i de syrebehandlede konsentratene.

**Tabell 9.** Tabellarisk oversikt som viser gjennomsnittlig material balanse i de ulike leddene i oppredningsprosessen .

<b>Råmalm nedmalt i stavmølle:</b>	<b>Vekt %</b>	<b>Vekt % avganger</b>
Frasiktet > 600 mikron. Hovedsakelig biotittflak	12,7	12,7
Slam <ca 20 mikron	3,2	3,2
<b>Pågang flotasjon 20 – 600 mikron</b>	<b>84,1</b>	
Pågang stavmølle	100,0	
<b>Oppredning:</b>		
Avgang flotasjon		67,5
Avgang rensflotasjon		2,5
Flotasjonskonsentrat	14,1	
Magnetbehandlet flotasjonskonsentrat		3,0
Syrevasket flotasjonskonsentrat - tap		2,9
<b>Apatitt konsentrat etter oppredning</b>	<b>8,2</b>	<b>91,8</b>

**Tabell 10.** Oversikt som viser fordelingen av apatitt i de forskjellige prosess-trinnene. Tallverdiene er beregnet fra XRF-analyseverdier av P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

<b>Prosess-trinn</b>	<b>Utvinning vekt % i prosess</b>	<b>Avgang vekt %</b>	<b>Apatitt % etter hvert prosess-trinn</b>	<b>Apatitt % i avganger</b>	<b>Andel apatitt % i avgang</b>
<b>Bergartsprøver</b>	100,00		13,15		
Knusing < 8 mm	100,00		13,15		
Stavmølle - våt	100,00		13,15		
Sikting 600 mikron	87,30	12,70		3,39	6,60
Avslamming < 20 mikron	84,10	3,20	14,97	13,13	6,50
Flotasjon	16,60	67,50		6,09	62,80
Reflotering 2 trinn	14,10	2,50	58,07	20,04	7,80
Tørking	14,10		58,07		
Magnetbehandling	11,10	3,00	71,57	13,39	6,10
Syrehandling, HCl	8,20	2,90	77,70	23,00	10,20
Tørking	8,20				
<b>Konsentrat - avgang</b>	<b>8,20</b>	<b>91,80</b>	<b>77,70</b>	<b>7,10</b>	100,00



**Figur 12.** SEM elektron backscatterer bilde tatt på NGU av konsentrat med 82 vekt % apatitt.. Alle lange nåleformete og listeformete korn er henholdsvis amfibol og pyroksen. Mangelkantete korn er apatitt. Bildet indikerer at apatitten er frimalt.

#### 4. KJEMISKE ANALYSER

NGU har fulgt opp med hoved- og sporelement-analyser på rågods, produkt og avgangsprøver fra alle forsøks-kampanjene i prosjektet. Disse er analysert med XRF ved eget laboratorium.  $P_2O_5$  analyseverdiene er benyttet til omregning direkte til vekt % apatitt med omregningsfaktor 2,37. Tabell 11 under viser hovedelementene i prosesstrinnene fra rågods til syrevasket produkt i kampanje nr 3.

Det ble analysert en ytterligere prøve med XRF på syrevasket apatittkonsentrat fra kampanje nr 3 som viste 34,1 %  $P_2O_5$ , tilsvarende 80,8 % apatitt. Samme prøve ble XRD analysert og ga følgende mineral sammensetning:

<b>Mineraler</b>	<b>Vekt %</b>
Fluorapatitt	82
Pyroksen (diopsid)	9
Amfibol (tremolitt)	4
Titanitt	4
Quartz	1
Biotitt	Spor

De tre siste mineralene ble ikke påvist i konsentratet som ble undersøkt med elektronmikroskop (SEM).

## **5. OPPSUMMERING OG EVALUERING**

Oppredningsmessig viste denne noe spesielle pyroksenittiske bergarten seg som forventet å gi flere oppredningsmessige utfordringer. Det ble i denne omgang valgt å forsøke å utvikle et prosess flytskjema med våtoppredning basert på stavmølle nedmaling og flotasjon. Videre tørking, tørr høyintensitets magnetbehandling og påfølgende syrebehandling.

Knuse og nedmalingen indikerte at bergarten hadde en meget lav bruddstyrke. Stavmølle maling synes å være et riktig valg fremfor kulemølle, hvor spesielt biotitten lot seg selektivt oppkonsentrere i grov fraksjonen. Ved sikting på 600 mikron var det mulig å sikte ifra som avgang en større andel av relativt ren biotitt.

Biotitten ga ellers ikke utfordringer i flotasjonen, ettersom den ikke lot seg aktivere for flotasjon med samler-reagensen for apatitten. Derimot lot de Ca-holdige mineralene i flotasjonspulpen seg i en stor grad aktivere og flotere sammen med apatitten. Anbefalt spesialbehandlet stivelse ble testet ut som trykker for disse mineralene, men med liten effekt.

**Tabell 11.** Oversikt over hovedelementfordelingen i de ulike prosess-trinnene i Kampanje 3 forsøk 21-3117. Verdier er oppgitt i vekt %

Prøvetype	SiO <sub>2</sub> *	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	TiO <sub>2</sub> *	MgO*	CaO*	Na <sub>2</sub> O*	K <sub>2</sub> O*	MnO*	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	Glødetap*
<b>Nedmalt rågods:</b>											
-- Rågods, < 600 mikron (pågang flotasjon)	39,10	4,69	7,51	0,84	12,50	21,20	0,27	2,55	0,10	6,32	2,75
-- Rågods fraksjon 150 – 300 mikron	40,60	5,00	7,94	0,54	13,20	19,90	0,28	2,81	0,11	5,72	1,66
-- Rågods fraksjon 63 – 150 mikron	37,50	3,89	6,50	0,79	11,50	24,30	0,25	1,91	0,10	8,42	2,92
-- Rågods fraksjon < 63 mikron	37,40	3,16	6,25	1,37	11,20	24,40	0,36	1,37	0,11	6,39	5,60
Frasiktet biotittflak > 600 mikron	39,50	11,50	12,90	1,28	16,00	5,83	0,15	7,75	0,12	1,43	1,14
Slam < 20 mikron	35,90	4,15	7,00	0,79	11,30	23,10	0,40	1,97	0,13	5,54	7,43
<b>Flotasjon:</b>											
-- Flotasjons konsentrat (grov og renseflotert)	15,90	0,57	2,31	0,91	4,71	43,20	<0.1	0,09	0,06	24,50	4,05
-- Hovedavgang flotasjon	43,70	5,38	8,42	0,79	14,00	16,90	0,55	2,94	0,12	2,57	2,67
-- Renseavgang flotasjon	35,80	3,36	6,12	1,01	10,90	25,50	0,37	1,45	0,10	8,61	4,50
<b>Flotasjonskonsentrat magnetbehandlet:</b>											
-- Magnetavfall trinn nr 1	46,30	1,29	6,82	0,69	14,50	21,80	0,34	0,19	0,12	3,49	2,73
-- Magnetavfall trinn nr 2	36,40	1,07	5,29	1,18	11,30	28,50	<0.1	0,18	0,10	9,27	4,44
<b>Apatittkonsentrat syrevasket</b>											
	8,54	0,32	1,08	1,28	2,28	48,00	<0.1	0,03	0,02	32,80	0,94



Magnetbehandlingen ble derfor foretatt på en spesiell beltegående «Disc magnet» som kan behandle finere partikler. Det viste seg at pyroksenene var betydelig mindre paramagnetisk enn for eksempel biotitt. Med så sterk felt-gradientstyrke som pyroksenene fordret, ble det også en noe uventet høy andel apatitt til magnetisk avgang som fulgte pyroksenene. Noe av apatitt tapet kan delvis ha sin årsak i at polgapet måtte reduseres til et minimum for å få sterke nok gradienter til å løfte opp pyroksenene fra beltet.

Syrebehandlingen med HCL løste meget hurtig opp kalkspaten, men samtidig ble også mer enn 20 % av apatitten løst opp. Årsaken kan her være at det sannsynligvis ble benyttet en atskillig sterkere syrekonsentrasjon enn hva som var nødvendig for å løse kalkspaten.

Målsetningen var å finne frem til et flytskjema hvor det lot seg gjøre å produsere 1 kg reneest mulig apatittkonsentrat som skulle benyttes til målinger på radioaktivitet mv. Det ble oppnådd å lage et konsentrat på nær 80 % apatitt, med en utvinning på ca 50 %.

Mer enn 60 % av den ikke utvunne apatitten fulgte hovedavgangen fra første flotasjonstrinn. Hvorvidt dette delvis har sin årsak til redusert frimaling er usikkert. I selve apatitt konsentratet indikeres det god frimaling og lite smittede korn (Figur 12). Det nest høyeste apatitt-tapet referer til svinn under syrebehandlingen.

Det produserte apatitt-konsentrat er oversendt Yara International ASA sitt laboratorium ved Yara Teknologisenter på Herøya, Porsgrunn. Selskapet har sagt seg villig til å vurdere konsentratets egnethet som råstoff for produksjon av fosfatgjødsel som bl.a. produseres ved Yaras anlegg i Glomfjord, Nordland.

## **6. UTFORDRINGER OG MULIGHETER**

Erfaringene og resultatene fra disse forsøkene kan være et utgangspunkt for et eventuelt fremtidig prosjekt med tanke på å utvikle et flytskjema for økt apatitt-gehalt i konsentratet og økt utvinning. I utgangspunktet oppfattes det som om en bergart har interesse med et apatitt-innhold på dette nivået.

Det vil da være av avgjørende betydning å gjøre nytte av nyere prosess-mineralogiske hjelpemidler. Her tenkes det spesielt på blant annet MLA (Mineral Liberation Analyse) teknikker. Disse teknikkene er etter hvert blitt et avgjørende

hjelpemiddel i oppgradering av eksisterende opprednings-prosesser og i utvikling av nye. Software og utstyr som benyttes ved MLA er under kontinuerlig utvikling og har nå blitt et viktig verktøy for å bestemme og optimalisere frimulingsgrenser for mineraler ved nedmaling av bergarter.

Spesielt for flotasjon sitter produsentene av samler-reagenser for flotasjon av apatitt med mye kunnskap som de er villige til å gi i fra seg dersom de får delta i selve prosess-utviklingen.

Uansett vil det er bli nødvendig å foreta mineralseparasjonen i kornstørrelse-områder som ikke kan behandles tørt på konvensjonelle høyintensitetsmagneter. Her er det et alternativ å magnetbehandle vått på spesielle høyintensitetsmagneter som kan behandle ned mot 20 – 30 mikron.

## **7. REFERANSER**

Ihlen, P.M. 2008: Lithochemical investigations of potential apatite resources in the Misværdal and Hopsfjellet ultramafic massifs, northern Norway. Geol. Surv. Norway report 2008.074, 57.

Ihlen, P.M., Schiellerup, H., Gautneb, H. and Skår, Ø. 2014: Characterization of apatite resources in Norway and their REE potential-A review. Ore Geology Reviews 58, 126-147.

Ihlen, P.M. og Furuhaug, L. 2011: Borkaksprøvetaking av apatitt-førende bergarter i Misværdal pyroksenittmassiv, Bodø kommune, Nordland. Nor. geol. unders. rapport 2011.069, 95.

Ihlen, P.M. og Furuhaug, L. 2013: Kvalitetstest av metode for borkaksprøvetaking av apatitt-pyroksenitter i Misværdalen, Nordland. Nor. geol. unders. rapport 2012.001, 19.

Lindahl, I. og Ihlen, P.M., 2015: Sammenstilling av resultatene fra Nordland Mineral (NM) -2003-2010, Nor. geol. unders. rapport 2015.054, 150.



NORGES  
GEOLOGISKE  
UNDERSØKELSE  
- NGU -

Norges geologiske undersøkelse  
Postboks 6315, Sluppen  
7491 Trondheim, Norge

Besøksadresse  
Leiv Eirikssons vei 39  
7040 Trondheim

Telefon 73 90 40 00  
E-post [ngu@ngu.no](mailto:ngu@ngu.no)  
Nettside [www.ngu.no](http://www.ngu.no)