



# **GEOLOGI FOR SAMFUNNET**

SIDEN 1858



**NORGES  
GEOLOGISKE  
UNDERSØKELSE**  
· NGU ·

## **NGU RAPPORT**

**2021.016**

---

Geologiske og geofysiske  
undersøkelser av  
Brattbakken Ni-Cu-Co  
forekomst i Skjækerdalen,  
Verdal kommune,  
Trøndelag



<b>Rapport nr.:</b> 2021.016	<b>ISSN:</b> 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)	<b>Gradering:</b> Åpen	
<b>Tittel:</b> Geologiske og geofysiske undersøkelser av Brattbakken Ni-Cu-Co forekomst i Skjækerdalen, Verdal kommune, Trøndelag			
<b>Forfatter:</b> Lars Petter Nilsson, Hanne-Kristin Paulsen, Jan Sverre Sandstad, Jomar Gellein og Frida Mathayo Mrope		<b>Oppdragsgiver:</b> NGU og Trøndelag Fylkeskommune	
<b>Fylke:</b> Trøndelag	<b>Kommune:</b> Verdal		
<b>Kartblad (M=1:250.000)</b> Østersund	<b>Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000)</b> Vera 1822-4		
<b>Forekomstens navn og koordinater:</b> Brattbakken, UTM 33N 369580 7092895	<b>Sidetall:</b> 61 <b>Å Kartbilag:</b>	<b>Pris:</b> 240 NOK	
<b>Feltarbeid utført:</b> 09.09.-14.09.2020	<b>Rapportdato:</b> 4 juni 2021	<b>Prosjektnr.:</b> 386900	<b>Ansvarlig:</b> 
<b>Sammendrag:</b> <p>Berggrunnsgeologisk kartlegging og prøvetaking samt geofysiske bakkemålinger ble utført ved Brattbakken Ni-Cu-Co forekomst i september 2020. Bearbeiding av innsamlet materiale og data er gjort på NGU i løpet av vinteren og våren 2021. Bergartene i det undersøkte området tilhører Gulakomplekset som består av omdannede vulkanske og sedimentære overflatebergarter og dypbergarter av antatt ordovicisk til tidlig-silurisk alder. Ni-Cu-Co forekomsten ligger i en bimodal ultramafisk-mafisk linseformet intrusjon som er ca. 1,2 km lang og 0,4 km bred og består av omdannet pyroksenitt og gabbro. Geofysisk modellering antyder at den er opptil 270 m dyp (Mrope m.fl. 2021). Intrusjonen opptrer konformt med strøket til sidebergartene som er en heterogen lagpakke med glimmergneis, amfibolitt, gabbro og tynne bånd av sulfidførende jernformasjon. Den kjemiske sammensetningen av de magmatiske, mafiske og ultramafiske bergartene fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene viser at de trolig er dannet fra ulike magmatisk smelte.</p> <p>Ni-Cu-Co mineraliseringen ligger omsluttet av en olivinfri og ortopyroksenfattig del av pyroksenitten i den sørvestlige delen av intrusjonen. Mineraliseringen opptrer som impregnasjonsmalm og semi-massiv årenett-tekstur malm med jevnt over 40 – 60 % sulfider i et nettverk dominert av magnetkis og mindre mengder pentlanditt og kobberkis. Gangarten består av varierende omvandlet kumulus-olivin og underordnet interkumulus-pyroksen. Intrusjonen består i tillegg av olivinførende pyroksenitt og leukokratisk gabbro. Malmen i Brattbakken-intrusjonen tolkes å være dannet ved assimilering av sulfidførende sidebergarter (jernformasjon, amfibolitt og gabbro) som har vært gunstig og nødvendig for at magmaet skulle bli mettet på svovel og sulfidene kunne dannes, for deretter å synke i magmakammeret og samle seg i en malmineralisering.</p> <p>Ni-Cu-Co forekomsten danner på overflaten øst-vest orienterte linser med et areal omkring 870 m<sup>2</sup>. Den inneholder i gjennomsnitt 1,2 % Ni, 0,38 % Cu og 0,086 % Co, og hvis det antas at den har et dyp på 100 m blir anslått mengde malm omkring 300.000 tonn. Forekomsten er i så fall sammenlignbar i gehalt og sannsynligvis også i størrelse med den godt undersøkte Vakkerlien Ni-Cu-Co forekomsten på Kvikne som også ligger i den samme geologiske hovedenheten Gulakomplekset. Det vil imidlertid være nødvendig med detaljerte geofysiske målinger (CP, SP og/eller IP) for bedre å bestemme Brattbakken malmens utstrekning under overflaten.</p>			
<b>Emneord:</b>	Malmgeologi	Gulakomplekset	
Pyroksenitt	Magnetkis	Pentlanditt	
Geofysikk	Fagrapport		

## INNHold

1	Innledning.....	7
1.1	Feltarbeid september 2020.....	7
1.2	Tidligere befaringer.....	8
2	Geologisk innramming.....	10
3	Bergartsbeskrivelser.....	14
3.1	Feltbeskrivelser.....	14
3.2	Petrografi og mineralogi.....	17
3.2.1	Pyroksenitt.....	17
3.2.2	Gabbro.....	20
3.2.3	Toglimmergneis.....	21
3.2.4	Amfibolitt.....	22
3.2.5	Båndet jernformasjon.....	23
3.3	Geokjemi av bergartene i Gulakomplekset.....	24
3.3.1	Metode.....	25
3.3.2	Resultater.....	25
4	Ni-Cu-Co mineralisering.....	32
4.1	Feltbeskrivelse.....	32
4.2	Mineralogi.....	33
4.3	Malmkjemi.....	39
4.3.1	Metode.....	39
4.3.2	Resultater.....	40
5	Geofysiske målinger – data.....	44
5.1	Helikoptermålinger.....	44
5.2	Gravimetrisk målinger.....	44
5.3	Magnetiske bakkemålinger.....	45
5.4	Petrofysisk analyse av bergartsprøver.....	46
6	Geofysisk modellering og tolkning.....	48
7	Diskusjon.....	50
8	Konklusjon.....	52
9	Anbefalinger.....	53
	Referanser.....	54
	Vedlegg.....	55

Figur 1 Oversiktskart som viser Brattbakken, kommunegrenser og tektoniske enheter (geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil/)	10
Figur 2 Geologisk kart over området. Lite kart nederst i høyre hjørne viser geologisk inndeling i dekkenserier. Brattbakken-intrusjonen ligger glimmergneis innenfor Guladekket (Roberts, 2013)	11
Figur 3 Regionale geofysiske målinger fra helikopter (Ofstad m.fl. 2021). Dataene er foreløpige da de ikke er ferdig prosesserte og fargeskalaene er relative. A) Total magnetisk verdi. B) Kaliumkonsentrasjonen i berggrunnen viser spesielt godt glimmerholdige bergarter. C) Elektromagnetiske resistivitetmålinger som ikke er ferdigprosesserte, og stripene som stryker ØNØ er en effekt av flylinjene og representerer ikke reelle anomalier. Kart øverst til høyre viser samme kartutsnitt med tektoniske grenser mellom dekkene	13
Figur 4 Geologisk kart over Brattbakkenområdet. Kartutsnitt for <b>Figur 16</b> er vist med svart rektangel. Stereoplottet har storsirkel og pol til foliasjonsmålinger tatt i kartbildet og viser at foliasjonen generelt stryker NØ-SV og faller mot SØ. Stereonettet er arealtro og er projisert i nedre halvkule	15
Figur 5 Oversiktsbilder som viser bergartsgrenser. Topografien lokalt er sterkt påvirket av de forskjellige bergartenes hardhet og motstand mot forvitring og erosjon	16
Figur 6 Bilder av pyroksenitt. a) Typisk feltopptreden av pyroksenitt. b) Typisk vitringsfenomen der pyroksenitt oppløses langs korn grenser til grus og sand. c) «Ribbepyroksenitt» fra vestsiden av intrusjonen – prøve SKJ 20 - 62. Stripene er dannet ved omvandling langs sprekker. d) Saget håndprøve av pyroksenitt. e & f) Plan- og krysspolariserte mikroskopibilder av olivinførende pyroksenitt. Prøve SKJ 12 - 29. g & h) Plan- og krysspolariserte mikroskopibilder av sterkt omvandlet olivinfri pyroksenitt (prøve SKJ 20 – 31) med et mineralselskap som nå hovedsakelig består av amfibol og kloritt. px=pyroksen; ol=olivin; am=amfibol; klor=kloritt	18
Figur 7 Bilder av relativt frisk gabbro (SKJ 04 - 7). a) Saget flate av håndprøve. b) Bilde av tynnslip som viser forholdet mellom lys plagioklas og grønn amfibol. c) Mikroskopibilde tatt under planpolarisert lys som viser tydelig magmatisk tekstur i frisk gabbro. d) Mikroskopibilde tatt under krysspolarisert lys av samme utsnitt som c). am=amfibol; bt=biotitt; plag=plagioklasfeltspat	21
Figur 8 Bilder av toglimmergneis. a) Feltopptreden av toglimmergneis som danner ikke-vegeterte rygger i terrenget. b) bilde av saget prøve BR 529 som viser sterk foliasjon definert av orienterte glimmerkorn. c) Tynnslipbilde som viser kvarts- og feltspatlinser som danner flasertekstur. d) Mikroskopibilde tatt under planpolarisert lys som viser poikiloblastiske granater, lys muskovittglimmer, brun biotittglimmer, kvarts og feltspat. e) Samme utsnitt som d) tatt i under krysspolarisert lys. bt=biotitt; kv=kvarts; mu=muskovitt; fsp=feltspat; grt=granat	22
Figur 9 Bilder av amfibolitt. a) Saget håndstykke av prøve BR 547 som viser god foliasjon og granat. b) Mikroskopibilde tatt i pålys. Magnetkis er ofte omvandlet til jernhydroksid. Ilmenitt vises som små, lysegrå korn spredt i bergarten c) Mikroskopibilde tatt i planpolarisert lys som viser amfibol, poikiloblastiske granat, og fargeløs feltspat ± kvarts. d) Bilde tatt under krysspolarisert lys som viser samme utsnitt som b og c. am=amfibol; grt= granat; po=magnetkis	23
Figur 10 Bilder av båndet jernmalm. a) Feltopptreden av båndet jernmalm med jernhydroksidomvandling. b) Løs blokk av jernmalm. c) Mikroskopibilde av prøve JS-B2002 tatt i gjennomfallende lys som viser finkornet granat (grt) og amfibol (am) med interstitial magnetkis (po). d) Mikroskopibilde tatt i pålys som viser delvis omvandlet magnetkis	24
Figur 11 Magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene plottet i et klassifiseringsdiagram for gjennomsettende/magmatiske bergarter (Le Maitre 1989)	25
Figur 12 Magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene plottet i a) SiO <sub>2</sub> -MgO og b) SiO <sub>2</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> diagram. c, d, e, f) MgO i magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene plottet mot utvalgte hovedelementer	26

Figur 13 a) Magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene plottet i a) Zr-TiO <sub>2</sub> diagram. b) Zr-Y diagram. c) Zr-Th diagram. d) Zr-La <sub>n</sub> /Lu <sub>n</sub> og e) Zr-La <sub>n</sub> /Sm <sub>n</sub> diagram. Normaliseringsverdier fra Sun & McDonough (1989).....	28
Figur 14 Spredningsdiagram hvor innholdet av sjeldne jordartselementer (REE) i forhold til sammensetningen til kondritt er plottet for a) Olivinførende pyroksenitt og gabbro i Brattbakken-intrusjonen b) Olivinfri pyroksenitt og gabbro og c) Gabbro og amfibolitt i sidebergartene. Spredningsdiagram hvor analyseverdier i forhold til sammensetningen til N-MORB er plottet for d) Olivinførende pyroksenitt og gabbro i Brattbakken-intrusjonen og e) Gabbro og amfibolitt i sidebergartene. f) Olivinførende pyroksenitt og gabbro g) Olivinførende og olivinfri pyroksenitt. h) Gabbro i Brattbakken-intrusjonen og i sidebergartene. Normaliseringsverdier fra Sun & McDonough (1989). .....	29
Figur 15 Magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og Gulagruppen plottet i a) Ti-Zr-Y klassifiseringsdiagram (Pearce & Cann, 1973) og b) Nb-Zr-Y klassifiseringsdiagram (Meschede, 1986). c) Magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene plottet i Nb/Yb – Th/Yb diagram (Pearce, 2008). .....	31
Figur 16 Ni-Cu-Co malmsone med prøvenummer (over) og innhold av nikkell (under). Gangarten i malmen er olivinrik mens pyroksenitt som umiddelbart omgir malmsonen er olivinfri. Videre mot nord kommer dominerer olivinførende pyroksenitt.....	33
Figur 17 a) «Cragen» er en spiss, fast klippe av olivinfri pyroksenitt helt på kanten av jernhatt-platået mot nord; Cragen er brukt som et nyttig referansepunkt under prøvetakingen. b) Detalj fra jernhatt-platået med små og store biter av sterkt sulfidutlutet malm liggende i overflaten; kamerafutteral som referanse. c) In situ ren sulfidlinse uten silikatgangart på lok. SKJ 20 – 42, akkurat på kontakten mot sideberg av amfibolitt (lok. SKJ 20 – 41). d) Frisk malmblokk av semi-massiv Ni-malm SKJ 12 – 23 i nordskråningen under jernhatt-platået; malmen har bare en mm-tynn rustskorpe .....	34
<b>Figur 18</b> CaO-MgO diagram viser at malmførende olivinfri pyroksenitt har høyere innhold av kalsium (Ca) enn olivinførende pyroksenitt, og dette kan skyldes assimilering fra sidebergarten.....	36
Figur 19 Mikroskopibilder av malm. a) Bilde av prøve SKJ 04-4 tatt under reflektert lys viser bravoittisert pentlanditt med krympesprekker, delvis omvandlet magnetkis og litt kobberkis (gul farge). b) Bilde av prøve SKJ 20 - 54 tatt under reflektert lys viser karakteristisk flamme-pentlanditt i magnetkis. Sekundær omvandling av magnetkis til limonitt langs korn grensene. c & d) Samme utsnitt tatt av prøve SKJ 20 - 38 viser kumuluss-olivintekstur som gangart i malmen. Olivin har en omvandlingsrand av serpentin og magnetitt. cpy=kobberkis; pt=pentlanditt; po=magnetkis; lim=limonitt; ser=serpentin; mt=magnetitt; ol= olivin.....	39
Figur 20 Nikkel-kobolt diagram som viser god samvariasjon mellom metallene i malmen. Pilene indikerer trender ved økende mineralisering og senere utluting av ulike sulfidmineraler. For nærmere forklaring, se teksten. Forkortede prøvenumre er angitt for å gi bedre lesbarhet av figuren. Grensen for Ni-Cu-Co mineralisering og Ni-Cu-Co malm er satt ved 2000 ppm Ni (0,2 % Ni). .....	41
Figur 21 Svovel-selen diagram som viser S- og Se innhold i mantel (gult felt) og trender for ekstern tilførsel av svovel og senere utluting svovel. For nærmere forklaring, se teksten. Forkortede prøvenumre er angitt for å gi bedre lesbarhet av figuren. Grensen mellom Ni-Cu-Co mineralisering og Ni-Cu-Co malm er satt ved 2000 ppm Ni (0,2 % Ni). .....	42
Figur 22 Plott av Ni mot utvalgte elementer. Grensen mellom Ni-Cu-Co mineralisering og Ni-Cu-Co malm er satt ved 2000 ppm Ni (0,2 % Ni). .....	43
Figur 23 Kart over Brattbakken-området som viser geofysiske målepunkter. Røde kryss viser gravimetrisk målepunkt langs to NNW-SSE orienterte profiler. De magnetiske målepunktene er fargekodet etter susceptibilitet og ligger så tett at de ser ut som sammenhengende linjer. Stiplet linje viser hvor modellering og tolkning vist i Figur 25. Stiplet rektangel viser areal for Figur 26.....	45

Figur 24 Petrofysiske resultater fra innsamlede prøver gruppert etter bergartstype. Øverste diagram viser tetthet ( $\text{g/cm}^3$ ). Nederste diagram viser magnetisk susceptibilitet ( $10^{-3}$ SI) på log-skala. n= antall prøver analysert. ....	47
Figur 25 2D profil over Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene langs profillinjen vest i intrusjonen. Triangler på overflaten av modellen viser lokaliteter for gravimetrisk målestasjoner (svart) og magnetiske målinger (grå). De gravimetrisk og magnetisk profiler i midten viser beregnede data (heltrukne linjer) som passer til de observerte data (punkter). Det horisontale overflate-bilde er et snitt ved 750 m over havnivå. Merk at lengden på vertikal akse er 1,26x i forhold til horisontal akse. ....	48
Figur 26 2D profil over malmsonen i Brattbakken langs profil LS. De gravimetrisk og magnetisk profiler i midten viser beregnede data (heltrukne linjer) som passer til de observerte data (punkter). Det horisontale overflate-bilde er et snitt ved 805 m over havnivå. Malmsonen er vist med ulike gråtoner og antas å være 125 m bred langs dette profilet i NV-SØ retning. Merk at lengden på vertikal akse er 0,5x i forhold til horisontal akse. For detaljer om modelleringen se Mrope m.fl. (2021). Til høyre er plasseringen av LS vist på kartet over magnetisk data. Jernhatt-plataet ligger ved punkt E. ....	49

## 1 INNLEDNING

Denne rapporten inngår som en del av et større program for kartlegging av geologiske ressurser i Trøndelag som NGU har i samarbeid med Trøndelag Fylkeskommune i perioden 2018-2021.

Den etter hvert så kjente og i lokalpressen mye omtalte nikkelforekomsten ved Brattbakken i Skjækerfjella i Verdal har nå vært mer allment kjent blant geologer i knappe 17 år. Ved Norges geologiske undersøkelse (NGU) i Trondheim fikk vi først kjennskap til forekomsten sommeren 2004. Dette var rett før den formelle opprettelsen av Blåfjella-Skjækerfjella nasjonalpark som er Norges 4. største nasjonalpark og ligger i skog- og fjellområdene øst i Trøndelag; inn til svenskegrensen. Parken ble opprettet 17. desember 2004 for å beskytte et karakteristisk fjellandskap med innslag av urskog, og dekker et område på 1 932 km<sup>2</sup>.

Nikkelforekomster finnes i flere geologiske enheter i Norge som for eksempel Råna i Ballangen, Ertelien på Ringerike og Espedalen. I Gulakomplekset, hvor Brattbakken ligger, er det kjent noen få forekomster slik som i den ca. 1,5 x 6 km store Dyrhaugen-intrusjonen 15 km lengre sør i Skjækerdalen samt de tre forekomstene Vakkerlien, Olkar og Kaltberget sør for Kvikne. Det er av stor interesse å få mer kunnskap om mineraliseringen i Brattbakken, og de geologiske prosessene som har resultert i at forekomsten har blitt dannet. Siden forekomsten ligger i dagen, representerer den en relativt lett tilgjengelig typeforekomst. Ved å forstå denne bedre er det derfor lettere å lete etter flere og muligens større utenfor nasjonalparkgrensene.

Med fagterminologi er det er snakk om en helt klassisk nikkel (Ni)-kobber (Cu)-kobolt (Co) -førende magmatisk sulfidforekomst som i tillegg inneholder meget små mengder finfordelt gull (Au), platina (Pt) og palladium (Pd). Forekomsten opptrer som en avlang, uregelmessig inneslutning i SV-flanken av en ca. 0,4 x 1,2 km stor ultramafisk-mafisk linseformet intrusjon.

### 1.1 Feltarbeid september 2020

Norges geologiske undersøkelse (NGU) fikk dispensasjon av nasjonalparkforvalter for Blåfjella/Skjækerfjella-Lierne nasjonalparkstyre, datert 11.08.2020 med tillegg 14.08.2020, til å gjennomføre geologiske og geofysiske undersøkelser ved Brattbakken øverst i Skjækerdalen, Verdal kommune. Undersøkelsene ble gjennomført i perioden 09.09-14.09.2020. Deltakere fra NGU var geologene Lars Petter Nilsson, Hanne-Kristin Paulsen og Jan Sverre Sandstad og geofysiker Jomar Gellein. Midtnorsk Helikopterservice utførte helikoptertransport av personell og utstyr til en telteir som ble etablert øverst i Vakkerdalen vest for Brattbakken. Vakkerdalen ligger på ca. 800 moh og feltarbeidet ble utført under til dels krevende værforhold med striregn og kuling deler av tiden. I tillegg var deler av malm-blotningene dekket av rester av fjorårets snø, noe som vanskeliggjorde undersøkelser av kontaktforhold.

Feltundersøkelsene i 2020 innebar berggrunnskartlegging og prøvetaking av Ni-Cu-Co mineraliseringen samt verts- og sidebergartene. Gravimetrisk og magnetiske geofysiske bakkemålinger ble også utført.

**Berggrunnskartlegging:** Kartleggingen ble gjort innenfor et område på ca 1 km<sup>2</sup>. Fokuset var på to linser med Ni-Cu mineraliseringer liggende langs den sørvestre kanten til den 0,4 x 1,2 km store Brattbakken-intrusjonen. I tillegg ble relasjonen til de ulike sidebergartene nærmest intrusjonen undersøkt.

**Prøvetaking:** Det ble innsamlet 53 bergartsprøver á 1-3 kg hver. Prøvene består av friske til sterkt sulfid-utlutede sulfidmalmprøver, videre prøver av metapyroksenitt og metagabbro fra selve



intrusjonen samt sidebergartene nærmest utenfor intrusjonen; glimmerskifer/-gneis, grafittholdig skifer, amfibolitt, båndete sulfidførende jernformasjoner og pegmatitt.

**Gravimetrisk bakkemålinger:** Disse målingene registrerer små variasjoner i jordens tyngdefelt og ble gjort i to parallelle profiler fra NV mot SØ, ca. 2 km lange og med ca. 600 m avstand mellom profilene, tvers gjennom Brattbakken-intrusjonen og godt inn i sidebergartene på begge sider. Jomar Gellein gjorde målingene i felt og prosesserte data før Frida Mathayo Mrope gjennomførte modellering og tolkning av disse (Mrope m.fl. 2021).

**Magnetiske bakkemålinger:** Disse «fintfølende» målingene registrerer selv små variasjoner i bergartenes magnetiske styrke. Frisk, uforvitret sulfidmalm er meget sterkt magnetisk slik at instrumentet registrerer selv små konsentrasjoner av malm under dagoverflaten. Imidlertid er deler av sideberget utenfor Brattbakken-intrusjonen også sterkt magnetisk. Dette forstyrrer derfor i en viss grad målingene og gjør tolkningsarbeidet tilsvarende mer komplisert.

## 1.2 Tidligere befaringer

Ni-Cu-Co mineraliseringene og den ultramafisk-mafiske intrusjonen som malmen sitter i var ikke kjent for NGUs geologer før sommeren 2004. Da kom en ung student til NGU og viste frem bilder av noen uvanlige bergarter og fenomener fra Brattbakken. Bildene viste tydelig at det sannsynligvis var utgående av en malmbforekomst. Den helt spesielle ansamlingen av til dels sterkt rustbrune og forvitrede bergarter var imidlertid allerede godt kjent blant lokalkjente jegere, fiskere, tur- og hyttefolk, og stedet gikk lokalt under navnet *Gruvan*.

### **Befaring i 2004**

Den første befaringen var en dagstur ved bruk av helikopter den 18.10. 2004. Fra NGU stilte geologene Morten Often og Lars Petter Nilsson og fra Nord-Trøndelag fylkesgeolog Ole Sivert Hembre. Det ble tatt noen prøver av malmen og sidebergartene som viste pene gehalter i rik malm med opptil 0,96 % Ni, 0,66 % Cu og 0,07 % Co (analysert hos ACME i Canada).

Samme geolog-gruppe gjorde nok en dagstur inn til Brattbakken med helikopter 04.11. 2004, men sammenhengende snødekke gjorde feltobservasjoner vanskelig. Det ble målt to geofysiske profiler med magnetometer. Et 500 m langt profil VNV-ØSØ ble målt sentralt gjennom intrusjonen, på tvers av dennes lengderetning og litt inn i sideberget på begge sider. Videre ble et 700 m langt profil målt fra NØ mot SV som gikk på skrå gjennom intrusjonen og videre tvers over malmen og inn i sidebergartene i S-SV. Målingene viste at pyroksenitt og gabbro er helt umagnetiske (paramagnetiske) mens selve malmen ga en svak, men markert og veldefinert liten positiv magnetisk anomali med en tilsvarende komplementær negativ anomali på nordsiden som betyr at malmen faller mot S-SSØ. Sidebergartene til intrusjonen på begge sider ga kraftige positive magnetiske anomalier som i sør nær overskygger det magnetiske utslaget fra selve malmen. Selv om disse målingene bare var av orienterende karakter, har de innledningsvis vært av verdi for å tolke intrusjonen og malmen. I tillegg fikk vi måleverdier for myrområdene som for størstedelen ikke var «gangbare» for bakkemålinger høsten 2020.

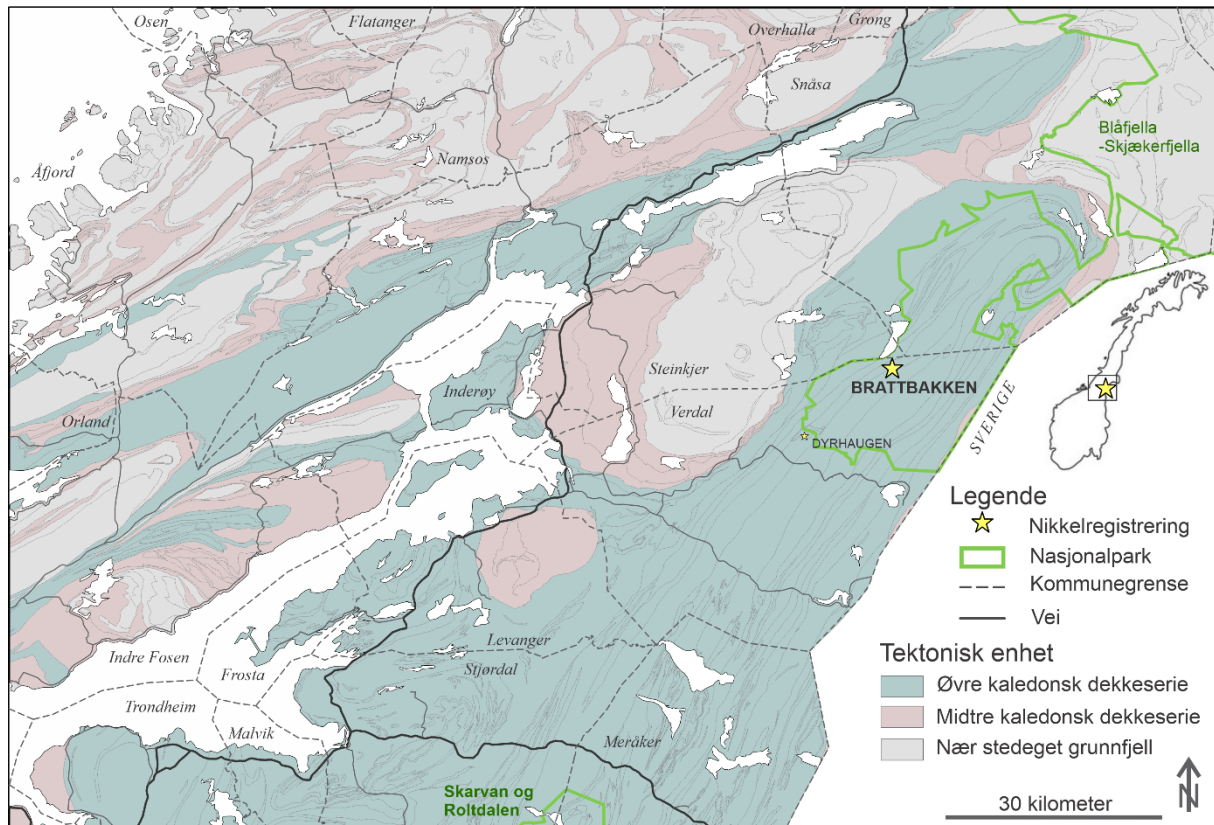
### **Befaring i 2012**

Sommeren 2012 fikk fylkesgeolog Hembre tillatelse til en ny befaringsstur til Brattbakken med helikopter. Denne ble foretatt 29.08.2012 og værforholdene denne sommerdagen var gode. Foruten Hembre og Nilsson deltok nå geolog Tom Heldal fra NGU. Berggrunnen i området ble kartlagt i større

detalj og prøver ble tatt av både malm, vertsbergarter samt sideberg til intrusjonen. Disse prøvene ble analysert sammen med prøvene fra 2020.

## 2 GEOLOGISK INNRAMMING

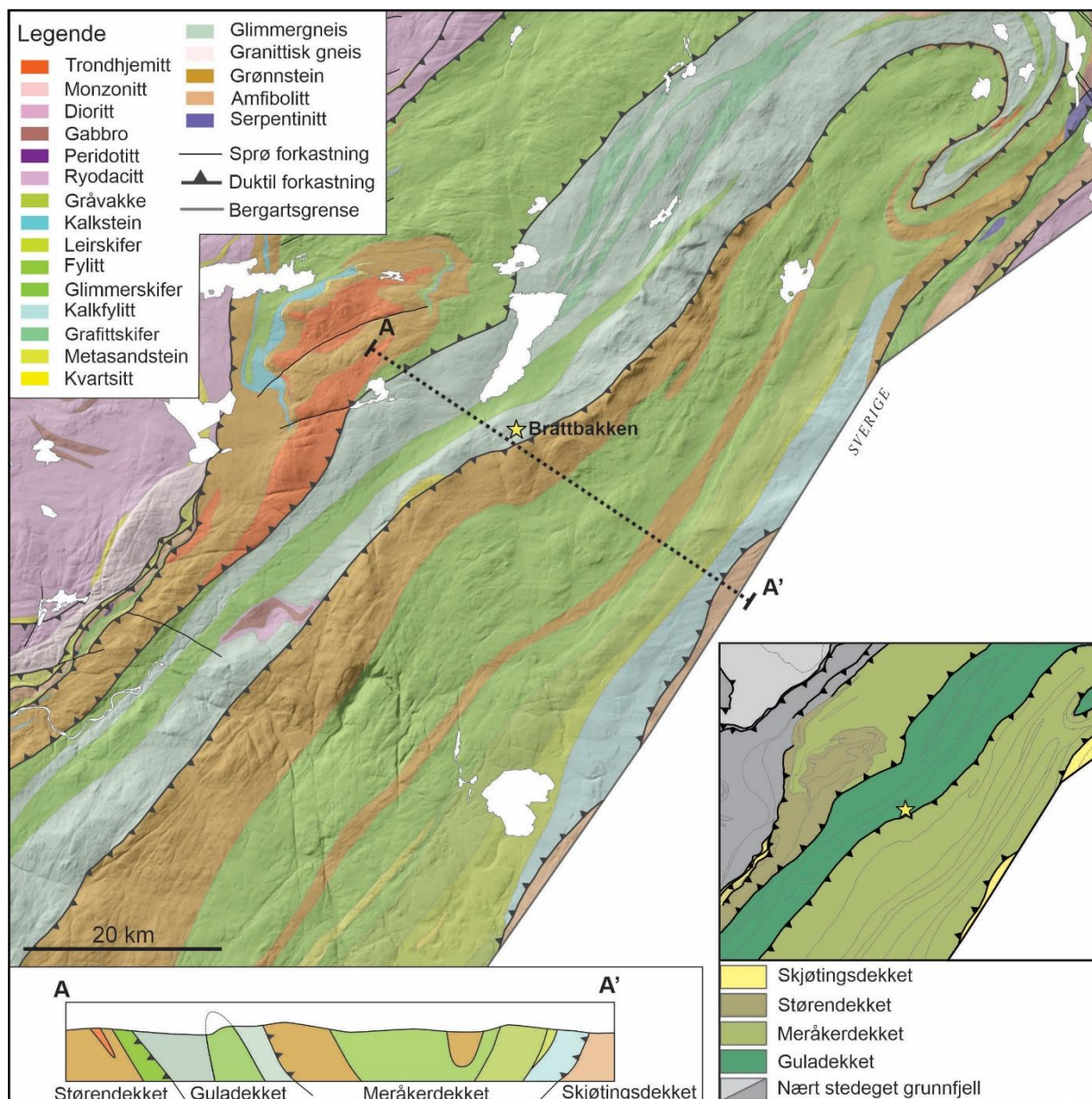
Det undersøkte området med Brattbakken-intrusjonen ligger innenfor Guladекket som er en del av Trondheimsdekkekomplekset i Øvre kaledonske dekkeserie som dominerer berggrunnen i indre deler av Trøndelag (Figur 1). Trondheimsdekkekomplekset består av omdannede sedimentære og vulkanske overflatebergarter og dypbergarter fra antatt senproterozisk til ordovicisk og tidligsilurisk tid (Nilsen & Wolff 1989).



Figur 1 Oversiktskart som viser Brattbakken, kommunegrenser og tektoniske enheter ([geo.ngu.no/kart/berggrunn\\_mobil/](http://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil/)).

Berggrunnen i feltområdet er tidligere ikke kartlagt i detalj og dekkes ikke av berggrunnskart i målestokk 1:50 000, men det ligger innenfor kartblad Østersund i målestokk 1:250 000 (Wolff, 1977). SV-hjørnet av kartblad Jævsjø i målestokk 1:100 000, som ble kartlagt av Foslie på 1930-tallet, ligger 6 km rett øst for området (Foslie 1959). Dette kartet inngår i underlaget for berggrunnskart Snåsa i målestokk 1:50 000 (Roberts 2013) som finnes 8 km NNØ for feltet.

Guladекket strekker seg innenfor kartblad Østersund som et 5-7 km bredt, NNØ orientert belte på begge sider av Skjækerdalen (Figur 2). Det er overskjøvet av Meråkerdekket i øst og Størendekket i vest. Disse to dekkene består av omdannede vulkanske og sedimentære overflatebergarter og dypbergarter av ordovicisk til tidlig-silurisk alder. Guladекket fortsetter nordover til Grønningen og langt sørover over Selbu og Kvikne hvor det er langt bredere (Nilsen & Wolff, 1989).



Figur 2 Geologisk kart over området. Lite kart nederst i høyre hjørne viser geologisk inndeling i dekkeserier. Brattbakken-intrusjonen ligger glimmergneis innenfor Guladekket (Roberts, 2013).

Gulagruppen (Wolff, 1976, 1977) og Gulakomplekset (Engvik m.fl. 2014) er begge blitt brukt som betegnelser for Guladekkets bergarter. Det er korrekt å benytte Gulakomplekset da Guladekket består av både overflate- og dypbergarter. Gulakomplekset består i hovedsak av omdannede sedimentære overflatebergarter, og i tillegg utgjør vulkanske overflate- og dypbergarter en mindre andel. Det er flest omfattende beskrivelser fra den sørlige delen av Guladekket, og observasjoner av berggrunnen der er også til nytte for bedre å forstå den geologiske utviklingen i Brattbakken-området. I Kvikne-området domineres Gulakomplekset av ulike metasedimenter; glimmerskifer, fyllitt og kvartsitt. Disse bergartene opptrer i veksling med en rekke 1-50 m tykke lag og linser av mafiske metavulkanitter/amfibolitter (Nilsen, 1974). Gjennomsettende mafiske og ultramafiske dypbergarter, som også kan inneholde nikkel-kobber-kobolt mineraliseringer, opptrer enten i nær tilknytning til disse amfibolittene eller finnes separat fra disse i enkelte områder (Nilsen, 1974). I tillegg er massive kobber-sink sulfidforekomster og jernformasjoner dannet i tilknytning til

amfibolittene (Nilsen, 1978). Alderen på Gulakompleksets overflatebergarter er ikke kjent, men har tradisjonelt antatt i hovedsak å være kambriske og mulig også senproterozoiske (Nilsen & Wolff 1989). Senere undersøkelser indikerer imidlertid at de er tidlig-ordoviciske, det vil si yngre enn 485 millioner år (T. Grenne, pers. meddelelse). Bergartene er omdannet i varierende grad fra lav-middels til middels-høy metamorfose grad i de østligste områdene i Kvikne-området (Nilsen, 1978). Høy-grad metamorf skifer i Selbu har vært grunnlaget for den omfattende kvernsteinsdriften der, da den inneholder små krystaller av staurolitt og granat som «slipemidler» i en litt løsere grunnmasse (Grenne m.fl., 2008; Grenne & Sveian, 2019). Brattbakken-intrusjonen, som består av omdannet pyroksenitt og gabbro, ligger som en omtrent 0,4 bred og 1,2 km lang linse innenfor en slik høy-grad metamorf gneisenhet i den østlige delen av Gulakomplekset (Figur 2). Gneisen strekker seg som et NNØ orientert, 1 - 3 km bredt belte oppover langs østsiden av Skjækerdalen opp mot toppen av Skjækerfjella (Wolff 1977). Den består to-glimmergneis med stedvis opptreden av granat, kyanitt, sillimanitt og/eller staurolitt som indikatormineraler (Wolff 1977). Ved Brattbakken bøyer gneisen mere mot NØ og fortsetter nordover igjen med retning mot NNØ, og enheten er her ca. 1,3 km bred på det smaleste. Intrusjonen ligger konkordant med strøket i den østlige delen av gneisen. Glimmergneisen fortsetter nordover over Litjskjækerhatten og Skjækerhatten og inn på kartblad Snåsa, hvor smale soner av grafittglimmerskifer med sulfidimpregnering som dels er tilknyttet smale soner med amfibolitt er kartlagt innenfor gneisen (Roberts, 2013).

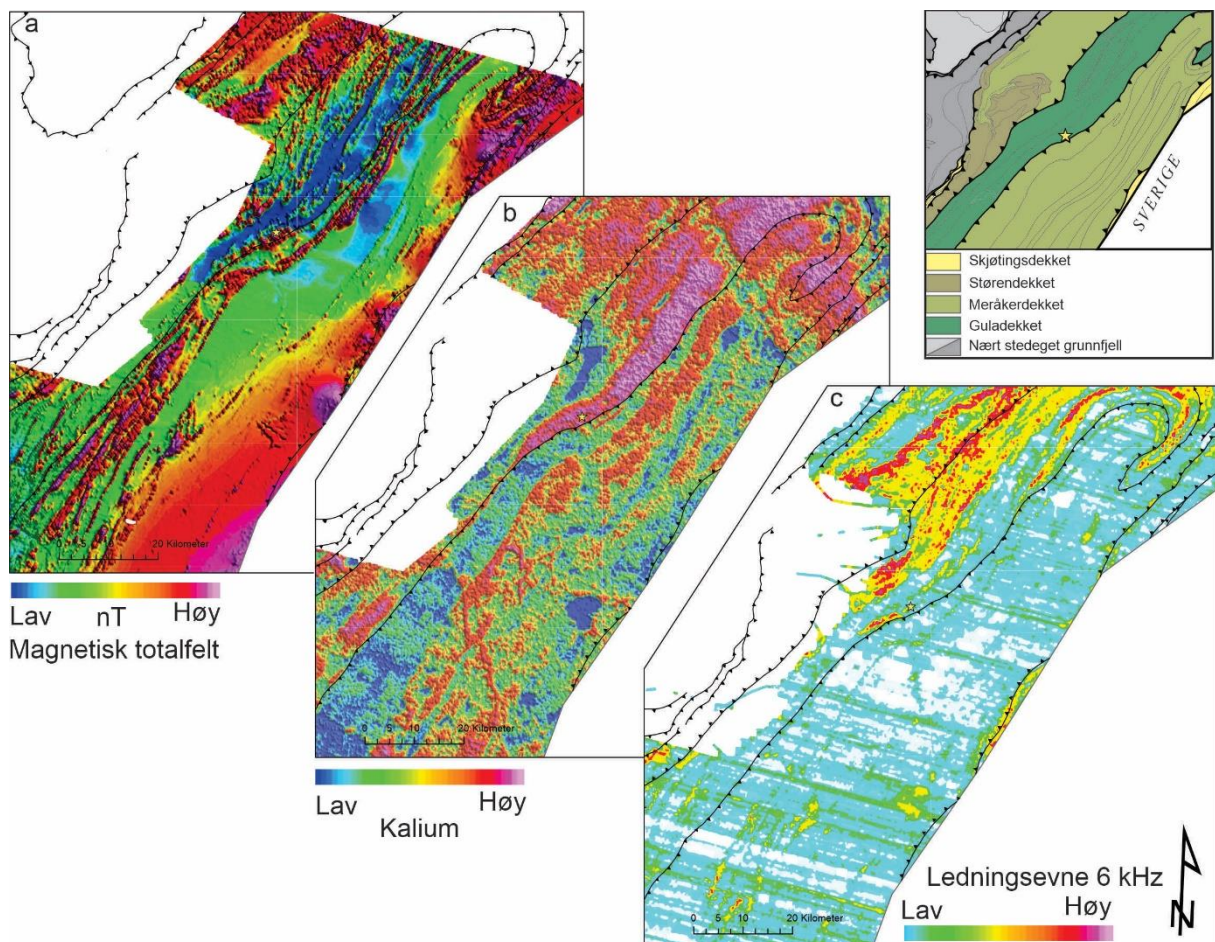
En relativt grovkornet toglimmergneis som fører granat er dominerende sidebergart i feltområdet omkring Brattbakken-intrusjonen. I tillegg finnes konkordante, smale soner og linser med amfibolitt i veksling med finkornet granatglimmerskifer og linser med gabbro nær intrusjonen. Disse sonene inneholder i tillegg lag med båndet jernformasjon som er sulfid- og grafittførende.

Videre vestover i Gulakomplekset, i lia ned mot Skjækervatnet og i Skjækerdalen, dominerer lav-middels grad metamorfe bergarter, biotittskifer og grå og svarte glimmerskifer og fyllitter, til dels med biotitt eller hornblende (Wolff, 1977). Mot sørøst grenser glimmergneisen mot Funnsjøgruppens omdannede felsiske og mafiske metavulkanske bergarter; metarhyodacitt og grønnstein. De har fall mot sørøst og tilhører Meråkerdekket som er overskjøvet Guladekket.

De geologiske hovedenhetene kommer tydelig fram i resultatene fra de regionale, geofysiske målingene fra helikopter (Figur 3; Ofstad m.fl. 2021). Glimmergneis som er den dominerende sidebergart til Brattbakken-intrusjonen, ligger i et belte med lave magnetiske verdier, men enkelte områder innenfor dette har høyere magnetiske verdier inkludert området rundt intrusjonen som selv danner en negativ magnetisk anomali (Figur 3a). Metasedimentene vest for denne glimmergneisen er også lavmagnetiske. Funnsjøgruppens metavulkanitter har sterkt varierende magnetiske egenskaper, hvor det er trolig at grønnstein gir positive og metarhyodacitt negative magnetiske anomalier. Videre østover i Funnsjøgruppen dominerer lavmagnetiske metasedimenter.

Radiometriske data viser at toglimmergneis gir kraftige utslag i kalium(K)-kanalen som skyldes høyt innhold av K-rike glimmermineraler i gneisen (Figur 3b). Dette er svært tydelig i Brattbakken-området og videre nordover over Skjækerhatten og fjellområdene med liten overdekning av løsmasser. Tilsynelatende avtar denne anomalien sørover i beltet, men det kan også skyldes at målingene der er gjort over myr- og vannområder som vil skjerme for K-stråling fra berggrunnen. Metasedimentene videre vestover gir også forhøyde radiometriske verdier, men skjermingen av stråling over Skjækervatnet kommer svært tydelig fram. Funnsjøgruppens metavulkanitter har generelt lavere K-stråling, men denne øker igjen metasedimentene videre østover.

Mørk, grafittførende fyllitt, som finnes i et belte nord og sør for Skjækervatnet gir de kraftigste elektromagnetiske (EM) anomaliene innenfor Guladekkets bergarter (Figur 3c). Det vil si at de er de bergartene med best elektrisk ledningsevne. Det er interessant å legge merke til at mindre EM-anomalier også forekommer innenfor toglimmergneis, og de mest markerte utslag er rett sør for Brattbakken-intrusjonen og skyldes grafitt- og sulfidførende jernformasjoner. Grafittglimmerskifer med sulfidimpregnering innenfor gneis lengre nord innenfor kartblad Snåsa vises også tydelig i EM data.



Figur 3 Regionale geofysiske målinger fra helikopter (Ofstad m.fl. 2021). Dataene er foreløpige da de ikke er ferdig prosesserte og fargeskalaene er relative. A) Total magnetisk verdi. B) Kaliumkonsentrasjonen i berggrunnen viser spesielt godt glimmerholdige bergarter. C) Elektromagnetiske resistivetsmålinger som ikke er ferdigprosesserte, og stripene som stryker ØNØ er en effekt av flylinjene og representerer ikke reelle anomalier. Kart øverst til høyre viser samme kartutsnitt med tektoniske grenser mellom dekkene.

### 3 BERGARTSBESKRIVELSER

#### 3.1 Feltbeskrivelser

Bergartene i området rundt Brattbakken er hovedsakelig tilknyttet Gulakomplekset (Figur 2). Alle bergartene i Gulakomplekset er omdannede, men for å forenkle teksten er og pyroksenitt og gabbro benyttet som navn for de aktuelle dypbergartene i området selv om metapyroksenitt og metagabbro er de korrekte geologiske betegnelsene.

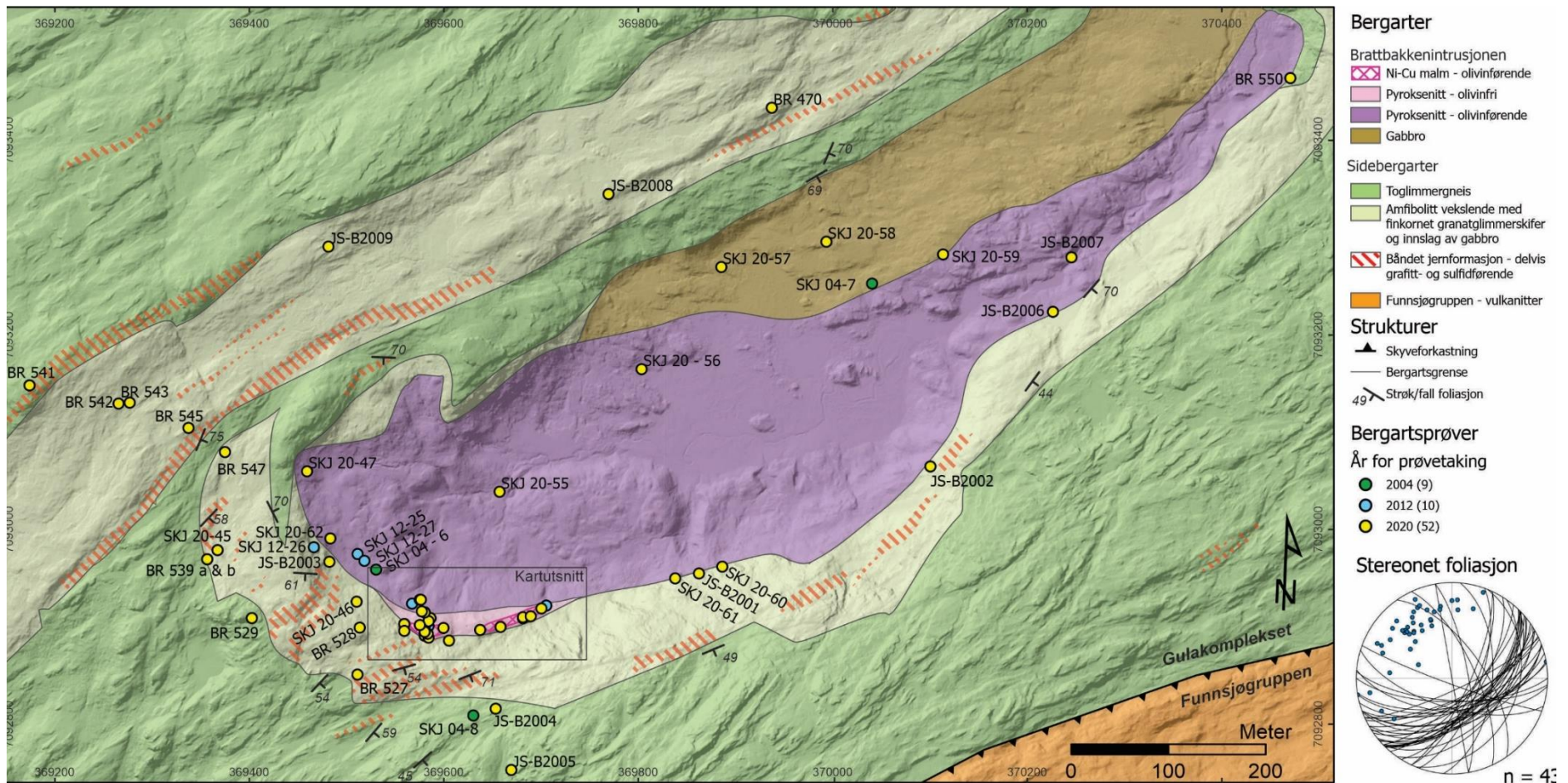
Lokalt kan bergartene deles inn i Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene. Brattbakken-intrusjonen er en distinkt bimodal ultramafisk-mafisk intrusjon der den gabbroide delen utgjør ca. 30 – 35 % av utgående til intrusjonen. Gabbrodelen er 800 m lang og 150 m bred på det meste hvilket tilsvarer ca. 100 000 m<sup>2</sup>. Dårlig blotningsgrad gjør at feltrelasjonene mellom den gabbroide og den ultramafiske delen av intrusjonen er uklare. Det er ikke observert apofyser, xenolitter eller andre feltrelasjoner som kan være med å bestemme interne aldersforhold. Den ultramafiske delen av intrusjonen er en pyroksenitt med varierende olivininnhold og er vertsbergarten til Ni-Cu mineraliseringene som ligger lengst sørvest i denne. Sidebergartene er en heterogen lagpakke som består av glimmergneis, amfibolitt, gabbro og en del tynne bånd av grafitt- og sulfidførende jernformasjoner (Figur 4).

Topografien i og rundt Brattbakken-intrusjonen er sterkt påvirket av bergartenes hardhet og motstand mot forvitring og isbreskuring (Figur 5). Pyroksenitt er relativt dårlig blottet i felt, da den har en sterk tendens til å dekomponere langs korn grensene og desintegrerer lett til grus og sand in situ (Figur 6b). Da ingen av nabobergartene oppfører seg tilsvarende, har isen selektivt høvlet ned pyroksenitt og avsatt den i løsmassene i myrområdene i bunnen av, men i hovedsak utenfor, Vakkerdalen. I myrområdene stikker det kun opp små pyramideformede hauger som er erosjonsrester av pyroksenitten (Figur 5). Det er også meget mulig at det har foregått en betydelig post-glacial erosjon og avsetning innenfor Brattbakken gropa i tilknytning til forvitringen av pyroksenitten.

På N-NØ siden av pyroksenitten opptrer et relativt stort felt med tilsynelatende ensartet homogen, normal gabbro i noen lave knauser. Denne gabbroen er uforvitret og opptrer slik sett med stor kontrast til pyroksenitt i myrområdene.

Sidebergartene er betydelig mer motstandsdyktige mot forvitring og danner bratte skrenter og fjellrygger. Toglimmergneis danner lokalt de høyeste bergknausene og er relativt fri for vegetasjon, mens linser og lag av amfibolitt med innslag av gabbro og grafitt- og sulfidførende jernformasjoner kan tydelig ses i terrenget som mer vegeterte områder og dels i mindre forsøkninger.

Brattbakken-intrusjonen har lite til ingen foliasjon mens sidebergartene har en tydelig foliasjon som hovedsakelig stryker NØ-SV og faller moderat til steilt mot SØ og bøyer rundt intrusjonen, spesielt i SV (Figur 4). Foliasjonen er generelt definert av parallelorienterte korn av glimmer og amfibolmineraler. Folding er observert som småskala løsrevne foldehengsler.



Figur 4 Geologisk kart over Brattbakkenområdet. Kartutsnitt for Figur 16 er vist med svart rektangel. Stereoplottet har storsirkel og pol til foliasjonsmålinger tatt i kartbildet og viser at foliasjonen generelt stryker NØ-SV og faller mot SØ. Stereonet er arealtro og er projisert i nedre halvkule.





Figur 5 Oversiktsbilder som viser bergartsgrenser. Topografien lokalt er sterkt påvirket av de forskjellige bergartenes hardhet og motstand mot forvitring og erosjon.

## 3.2 Petrografi og mineralogi

Petrografen tar først for seg beskrivelsen av de to hovedbergartene i Brattbakken-intrusjonen (pyroksenitt og gabbro) før sidebergartene utenfor selve intrusjonen beskrives (toglimmergneis, amfibolitt og båndet jernformasjon). Malmen vil bli beskrevet under avsnitt 4. Beskrivelsene er basert på visuelle observasjoner i felt og av håndstykker samt mikroskopering av polerte tynnslip.

### 3.2.1 Pyroksenitt

Den ultramafiske delen av intrusjonen er en pyroksenitt med varierende olivininnhold og kan deles i to typer. Olivinførende pyroksenitt dominerer nesten fullstendig, mens en olivinfri og ortopyroksenfattig pyroksenitt omgir selve malmsonen (Figur 4). Olivin finnes igjen i den semi-massive Ni-Cu-Co malmsonen, som er den rikeste delen av mineraliseringen, og kumulus-olivin utgjør det meste av malmens gangart.

#### 3.2.1.1 Olivinførende pyroksenitt

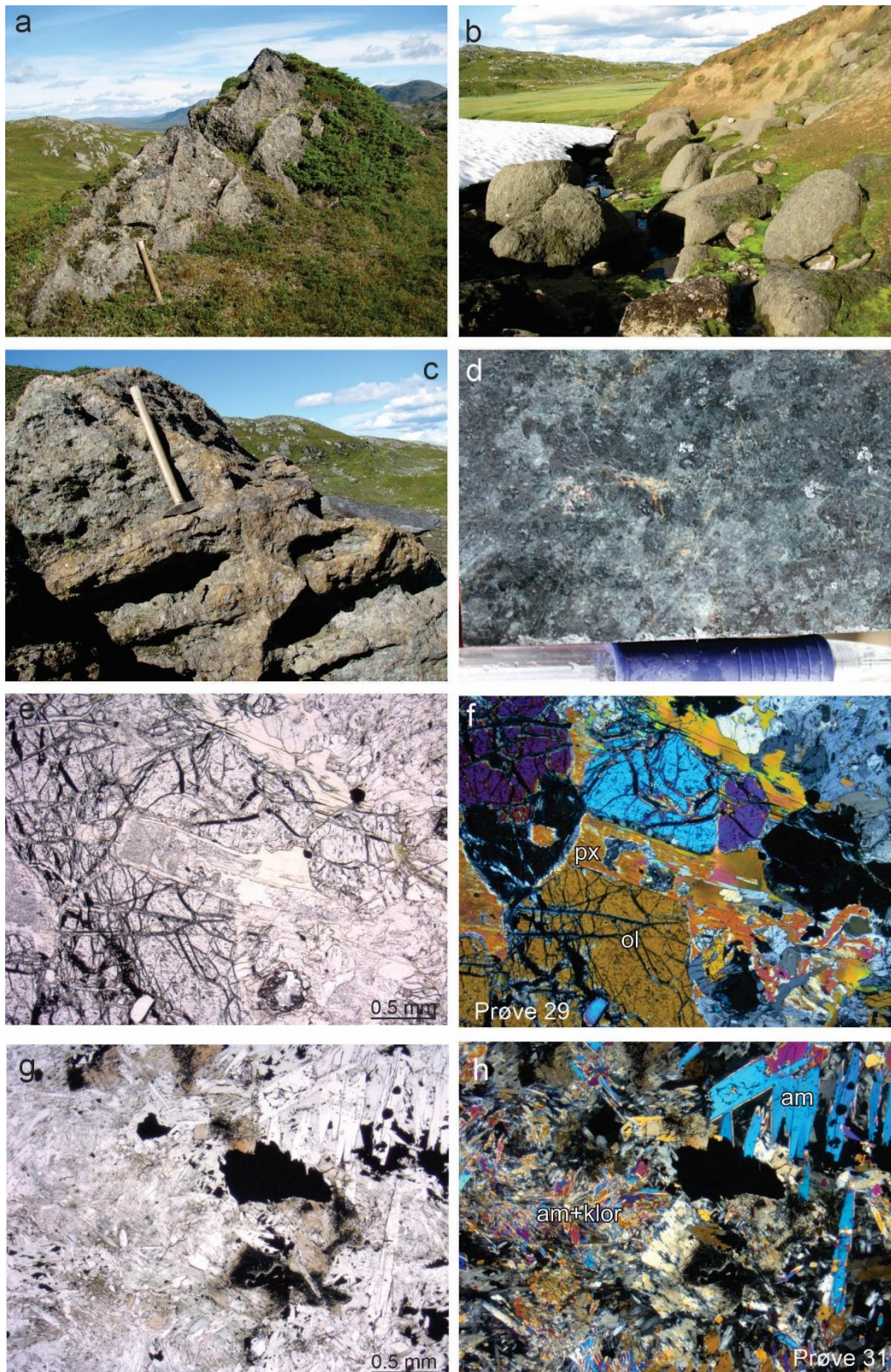
Olivinførende pyroksenitt er massiv, alltid udeformert og fargen varierer fra sjøgrønn via grågrønn til sjeldnere mørk grå til koksgrå (Figur 6d). Kornstørrelsen varierer fra finkornet (1 - 2 mm) til middelskornet (2 - 4 mm) og grovkornet (opptil 10 mm). De middels- til grovkornete variantene er vanligere enn de finkornete og skyldes blant annet store oikokrystaller av ortopyroksen og klinopyroksen som opptrer som vertsfase for mer finkornet olivin. Bergarten vitrer med en mm-tynn kanelbrun til grålig eller gråbrun til rødlig hinne (Figur 6a), men ofte er den praktisk talt uten vittringshud. Graden og typen av sekundær omvandling (hydrering) er vanskelig å avgjøre i felt.

I noen ytterst få lokaliteter skiller bergarten seg visuelt ut fra det vanlige og monotone. En særlig grov-kornet tremolitt er utviklet langs sprekker i pyroksenitt (SKJ 20 - 62) lengst i vest, og denne tremolitten er selektivt blitt sterkt vitret frem og står ut som parallelle utstående ribber i den ellers monotone bergarten (Figur 6c). Like ved er også utviklet asbestiform amfibol (tremolitt?) helt i intrusjonens vestlige grenseområde.

Olivinførende pyroksenitt har opprinnelig bestått av hovedmineralene olivin, ortopyroksen og klinopyroksen i til dels meget varierende mengdeforhold (Figur 6 e-f). Disse er i varierende grad omvandlet til sekundærmineraler ved hydrering. Hydreringen har påvirket de ulike primærmineralene ganske ulikt fra sted til sted innenfor intrusjonen, men det er sjelden at det ikke fins relikter av primærmineralene.

**Olivin** omvandles alltid til serpentin pluss varierende mengder sekundær magnetitt. På et tidlig stadium i omvandlingen av litt større olivinkorn ( $\pm 2$  mm) opptrer serpentin gjerne som et fint årenett som gradvis erstatter mer og mer av olivinkornene. Årenettet er som regel begrenset til olivinkorn, men kan også gå gjennom de øvrige mineralene. Serpentin kan imidlertid også omdanne olivin selektivt fra korn grensen og innover. Dette skjer vesentlig ved serpentinisering av små euhedrale kumulus-olivinkorn (0,2 – 1,2 mm) i semimassiv Ni-Cu-Co malm. (Kumulus-olivin er olivin-korn som er krystallisert fra et magma og deretter akkumulert gravitativt og er ikke blitt modifisert ved senere krystallisasjon).

**Ortopyroksen** omvandles primært til talk, men ofte også direkte til kloritt og i mer sjeldne tilfeller til serpentin. Omvandling skjer fra korn grensen og innover eller langs lameller. Den skjer typisk in situ der for eksempel store oikokrystaller av ortopyroksen på opptil 1 cm kan erstattes fullstendig av en sekundær finkornet fase. Mindre korn, for eksempel typiske interkumulus-korn av ortopyroksen i Ni-Cu-Co malm, kan også omvandles in situ på samme måten. Når talkifiseringen av ortopyroksen er fremtredende dannes det av og til et finkornet aggregat av karbonat sammen med talk.



Figur 6 Bilder av pyroksenitt. a) Typisk feltopptreden av pyroksenitt. b) Typisk vitringsfenomen der pyroksenitt oppløses langs korngrenser til grus og sand. c) «Ribbepyroksenitt» fra vestsiden av intrusjonen – prøve SKJ 20 - 62. Stripene er dannet ved omvandling langs sprekker. d) Saget håndprøve av pyroksenitt. e & f) Plan- og krysspolariserte mikroskopibilder av olivinførende pyroksenitt. Prøve SKJ 12 - 29. g & h) Plan- og krysspolariserte mikroskopibilder av sterkt omvandlet olivinfri pyroksenitt (prøve SKJ 20 – 31) med et mineralselskap som nå hovedsakelig består av amfibol og kloritt. px=pyroksen; ol=olivin; am=amfibol; klor=kloritt

**Klinopyroksen** omvandles alltid direkte til kalsium-amfibol og da ofte i pseudomorfose etter store klinopyroksenkorn ( $\pm 1$  cm). Flere generasjoner av amfibol er observert, for eksempel ved overvekst av eksisterende korn og da med litt ulike optiske egenskaper. Dette sees ved distinkte variasjoner av i både egenfarge, pleokroisme og interferensfarger. Amfibol omdannes lett videre til kloritt med tilsvarende tydelige optiske variasjoner som for amfibol. De optiske variasjonene reflekterer forskjeller i kjemisk sammensetning både for amfibol og for kloritt. Ofte er det sist dannede mineralet en randomisert nålformet amfibol som en overvekst over alle de andre mineraler i slipene.

**Kvarts** opptre ikke som primærmineral i pyroksenitt, men kan opptre sekundært som finkornete aggregater under klorittisering av amfibol som skaper et  $\text{SiO}_2$  overskudd.

**Ilmenitt** opptre hyppig som uomvandlede, retningsorienterte, men spredt og meget finkornete euhedrale til subhedrale små prismer som krystallografisk avblanding både i friske og omvandlede silikater (særlig i kloritt). Videre opptre anhedrale til subhedrale korn av ilmenitt som litt større og mer ujevnt disseminerte korn. Ilmenitt er som regel omvandlet via rutil til titanitt eller direkte fra ilmenitt til titanitt og da på grunn av lett tilgjengelig på kalsium.

**Kromitt** sees generelt ganske sjelden, men som forventet opptre mineralet i de mest Mg-rike prøvene som f.eks. i prøve SKJ 04 - 6. Kromitt opptre i ørsmå subhedrale til anhedrale spredte korn og identifiseres lettest ved en karakteristisk konsentrisk sonering med et friskt mørkt kjerneparti og en lysere ytre randzone av ferrikromitt i pålys. Selv om hoveddelen av pyroksenitt holder 1500 – 2000 ppm Cr er det relativt lite kromitt å se i prøvene. Dette beror på at det er uvanlig mye kloritt i bergarten som er i stand til å ta opp Cr i gitterstrukturen.

**Magnetitt** opptre kun som meget finkornede, anhedrale sekundære korn i forbindelse med serpentinisering av olivin. Det er forbausende lite sekundær magnetitt å se i slipene tatt i betraktning det høye Fe-innholdet i bergarten. Mengdene av magnetitt i slipene korrelerer meget godt med de målte verdiene for magnetisk susceptibilitet. Når innholdet av magnetitt blir anomalt høyt, slik som i prøve BR 550, opptre magnetitt som karakteriske strenger eller tog (trails) av ørsmå enkeltkorn på rekke og rad etter hverandre. Også her skyldes det gjennomgående lave magnetitt-innholdet det høye innholdet av kloritt som er i stand til å ta opp mye jern i gitteret i motsetning til for eksempel serpentin. Når det er mye serpentinisert olivin og lite kloritt i slipene slik som i flere av prøvene av den semi-massive Ni-Cu-Co malmen kan det dannes relativt meget store mengder masseformet sekundær magnetitt som opphopninger på grensen mellom serpentin og sulfidfasen (som er dominert av magnetkis). Det er magnetitt fra denne omvandlingen som gir de meget høye verdiene som vi får for magnetisk susceptibilitet og ikke den rene sulfidfasen (magnetkis) alene.

### *3.2.1.2 Olivinfri pyroksenitt*

Olivinfri pyroksenitt utgjør arealmessig en meget liten del av intrusjonen. Den opptre kun i den sørvestlige delen av intrusjonen og omslutter malmsonen. Olivinfri pyroksenitt er alltid sterkere omvandlet enn olivin-førende pyroksenitt og er i tillegg ofte fri for relikte ortopyroksen og klinopyroksen. Protolitten er antatt å være en klinopyroksen-rik bergart, og omvandlingsmineralene er finkornete og sammenvokste korn av amfibol og kloritt. Flere generasjoner med amfibol er observert, og amfibol går ofte over i kloritt langs kløvflater (Figur 6g-h).

Olivinfri pyroksenitt skiller seg ut mineralogisk og kjemisk fra olivinførende pyroksenitt, blant annet ved et gjennomgående mye høyere CaO-innhold og et mye lavere Cr-innhold. I tillegg til å være helt olivinfri, har den også gjennomgående svært lavt innhold av ortopyroksen som gjerne omvandles direkte til kloritt uten spor av assosiert talk. Det er imidlertid klinopyroksen som dominerer i bergarten og denne er i meget sterk grad omvandlet til amfibol og deretter kloritt. Det er flere

generasjoner både av amfibol og kloritt til stede, og karakteristisk for disse er at mineralene suksessivt har erstattet hverandre og dessuten vokst sterkt inn i hverandre med skarpe korngrenser (Figur 6g-h).

Det er ikke observert kromitt eller sekundær magnetitt, men frisk ilmenitt opptrer som krystallografiske avblandinger av spredte, parallellorienterte, ørsmå prismeformede korn både i amfibol og kloritt tilsvarende som i olivinførende pyroksenitt. Det er mulig at også magnetitt kan opptre på denne måten (SKJ 20 - 31), men de ørsmå kornene er ikke bestemt med sikkerhet ennå. Mer grovkrystallinsk anhedral ilmenitt med kornstørrelse opptil 700  $\mu\text{m}$  fins også spredt i bergarten og denne er bare unntaksvis videre omdannet til rutil og titanitt. Rutil har da en karakteristisk ravgul til honninggul egenfarge.

I motsetning til den olivinførende varianten fører den olivinfri varianten alltid et visst innhold av sulfider som gradvis øker inntil bergarten går over i en typisk impregnasjonsmalm med 10-20 % disseminert sulfid, hovedsakelig magnetkis. Olivinfri pyroksenitt har derfor som regel en mer kanelbrun til rustbrun overflatehud enn den olivinførende. Ved et enda høyere sulfidinnhold, rundt 10-15 % svovel som svarer til omtrent 25-38 % magnetkis endrer malmen brått karakter og det dannes semi-massiv malm i et sammenhengende sulfidnett, men nå med adskilte kumulus olivin-krystaller imellom og ikke som kumulus amfibol eller -kloritt. Amfibol opptrer ikke i den semi-massive malmen, men når kloritt opptrer i malmen opptrer den isteden i typisk interkumulus-posisjon både til sulfidfasen og til kumulus olivinen. Se mer om dette i avsnittet om malmen.

### 3.2.2 Gabbro

Den gabbroide delen av intrusjonen ser monotont utviklet ut i felt og er uten synlige teksturelle variasjoner i kornstørrelse, fargetone, foliasjon, mineralbånding, osv. Prøvetakingen antas derfor å ha vært representativ selv med bare tre prøver (SKJ 4 - 7, 20 - 57 og -58, Figur 4). Disse tre prøvene utfyller imidlertid hverandre meget godt i petrografisk hensende.

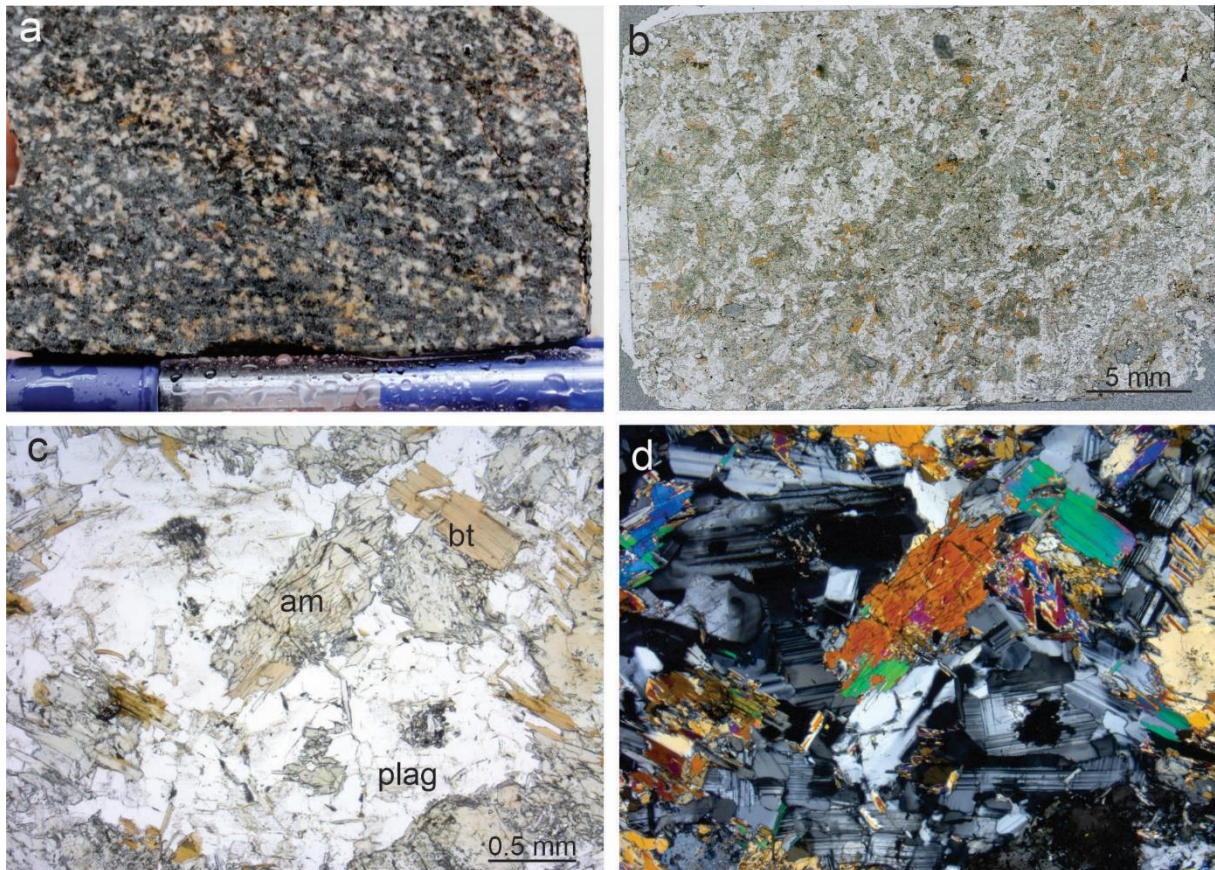
Alle de tre prøvene er av middelskornet (2 - 4 mm), massiv grønnliggrå gabbro (Figur 7a). De ser ved første øyekast temmelig like ut, men under lupelampe ser man at de er markert forskjellige: SKJ 04 - 7 er relativt frisk med mørk grønngrå farge og magmatisk tekstur. Det er litt mer felsiske enn mafiske mineraler til stede. SKJ 20 - 58 er moderat omvandlet og medium grønngrå. Den representerer tydelig et mellomstadium mellom SKJ 4 - 7 og 20 - 57. SKJ 20 - 57 er sterkt omvandlet og lys grønngrå.

Gabbroen har magmatisk tekstur og er oppbygd av subofittisk listeformet plagioklas og anhedral amfibol omvandlet fra klinopyroksen som de to primære hovedmineralene (Figur 7b-d). Klinopyroksen er omvandlet til amfibol. I tillegg opptrer små mengder finkornet, jevnt fordelt ilmenitt som primært magmatisk mineral. Omvandling av gabbro ses hovedsakelig som serisittisering av plagioklas og sterk klorittisering av amfibol. I alle tre slip er omvandlingen ilmenitt  $\rightarrow$  rutil  $\rightarrow$  titanitt og med relativt mye mer rutil og titanitt til stede enn gjenværende ilmenitt. Det er rikelige mengder både med rutil og titanitt i slipene, og reaksjonen rutil  $\rightarrow$  titanitt ser ikke ut til å løpe helt ut til titanitt alene, selv om det har vært rikelig kalsium (Ca) til stede i bergartene.

De kjemiske analysene viser at det verken er tilført eller bortført betydelige mengder av noe element som derved kunne ha bidratt til omvandlingen. Kun glødetapet (LOI) er doblet fra SKJ 04 - 7 med 1,38 % til SKJ 20 - 57 med 2,92 % pga. vanntilførsel ved omvandlingen.

De til dels betydelige variasjonene som kan observeres i egenfarge, interferensfarge og pleokroisme for amfibol og kloritt indikerer et visst spenn i kjemisk sammensetning både for amfibol og kloritt som mineralgrupper. Dette gjelder til en viss grad i gabbro, men i mye sterkere grad gjelder det i

pyroksenitt, både den olivinførende og den olivinfrie varianten. Dette faller godt sammen med variasjoner i de kjemiske sammensetningene da det er liten variasjon i gabbroens innhold av de ulike elementene, men stor variasjon i pyroksenittene (Kapittel 3.3). Mye av den sterke spredningen av elementene i kjemiske plott kan tilbakeføres til i elementinnholdet i amfibol og kloritt som mineralgrupper. Dette er kvantitativt like viktige bidrag som det varierende modale innholdet av de enkelte mineralene.

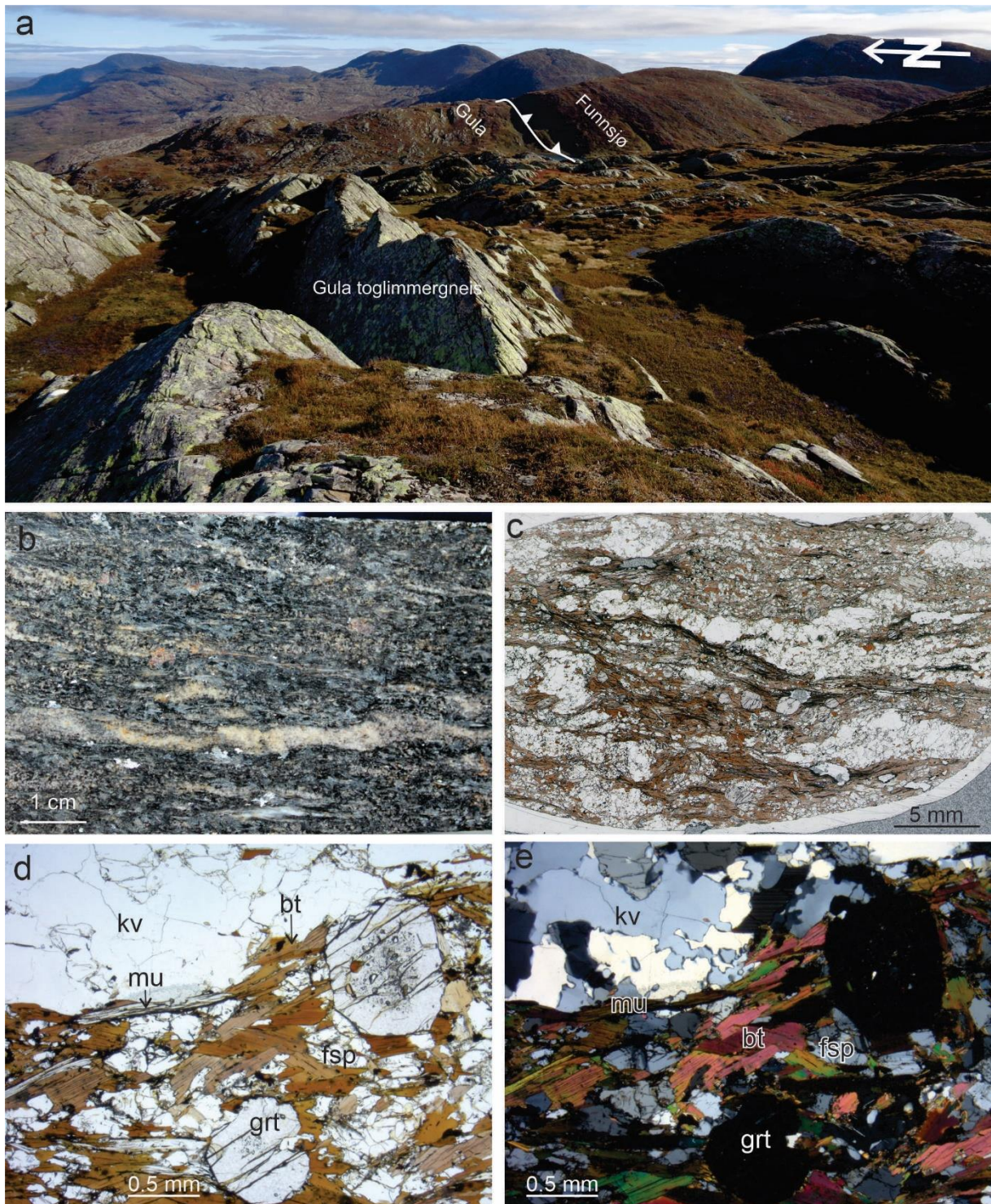


Figur 7 Bilder av relativt frisk gabbro (SKJ 04 - 7). a) Saget flate av håndprøve. b) Bilde av tynnslip som viser forholdet mellom lys plagioklas og grønn amfibol. c) Mikroskopibilde tatt under planpolarisert lys som viser tydelig magmatisk tekstur i frisk gabbro. d) Mikroskopibilde tatt under krysspolarisert lys av samme utsnitt som c). am=amfibol; bt=biotitt; plag=plagioklasfeltspat

### 3.2.3 Toglimmergneis

Toglimmergneis er den arealmessige dominerende av sidebergartene, og den er lett å kjenne igjen i felt (Figur 8a). Den er lys grå og er mellom- til grovkornet (Figur 8b). Gneisen er godt foliert og har ofte en tydelig flasertekstur hvor kvarts ( $\pm$  feltspat) danner linser omgitt av orienterte glimmerkorn (Figur 8c).

Mineralselskapet observert i tynnslip er hovedsakelig kvarts, plagioklas, biotitt > muskovitt og stedvis subhedrale til euhedrale poikilittiske porfyroblaster av granat (Figur 8d-e). Bergarten er relativt frisk med godt utviklede korngrenser.

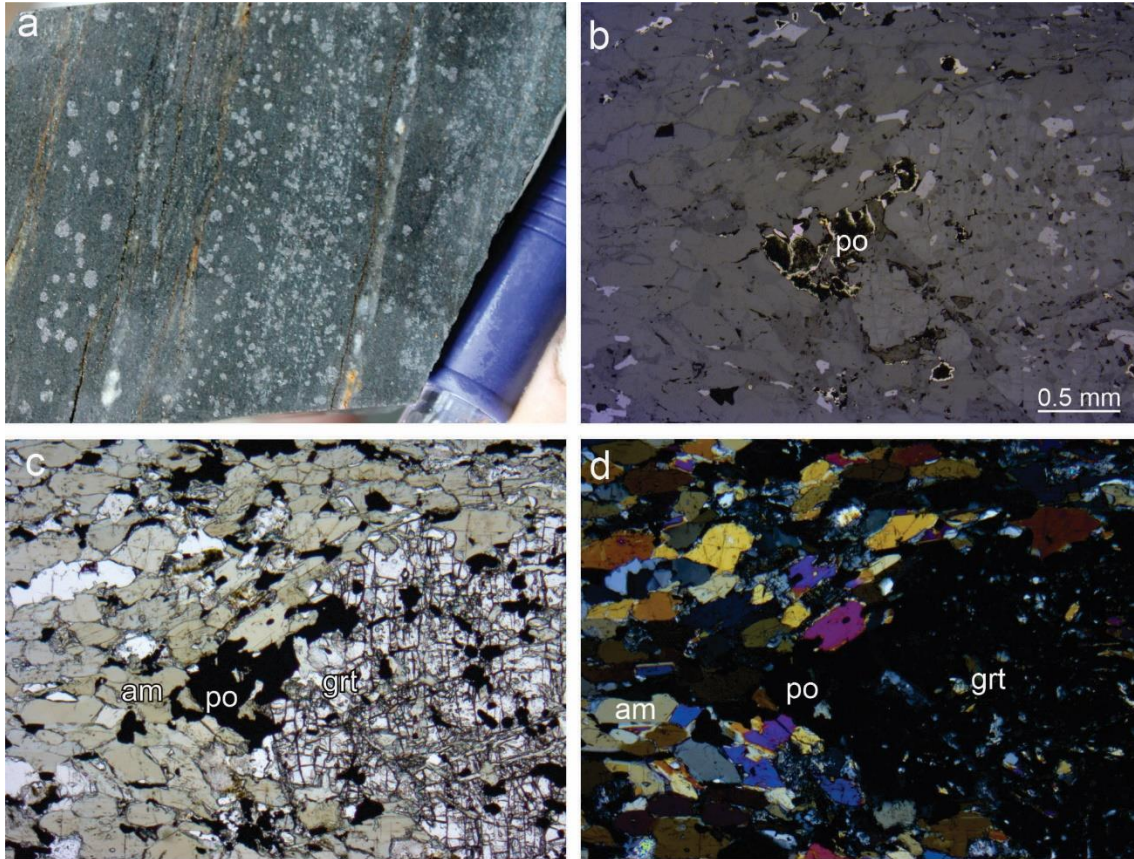


Figur 8 Bilder av toglimmergneis. a) Feltoptreden av toglimmergneis som danner ikke-vegeterte rygger i terrenget. b) bilde av saget prøve BR 529 som viser sterk foliasjon definert av orienterte glimmerkorn. c) Tynnslipbilde som viser kvarts- og feltspatlinser som danner flasertekstur. d) Mikroskopibilde tatt under planpolarisert lys som viser poikiloblastiske granater, lys muskovittglimmer, brun biotittglimmer, kvarts og feltspat. e) Samme utsnitt som d) tatt i under krysspolarisert lys. bt=biotitt; kv=kvarts; mu=muskovitt; fsp=feltspat; grt=granat.

### 3.2.4 Amfibolitt

Amfibolitt er en betegnelse brukt på en heterogen lagpakke med interne variasjoner. Den er godt foliert, er fin til middelskornet og har mørk til lys grå farge i håndstykke (Figur 9a). Hovedmineralene observert i tynnslip er 50-70% lys grønn, euhedral amfibol og 40-20% plagioklas (Figur 9c-d). Det er

varierende mengder av biotitt, kvarts, granat, og spor av ilmenitt som delvis er omvandlet til titanitt/rutil. Bergarten er generelt lite omvandlet, men plagioklas er delvis serisittisert og epidot-omvandlet. Noe klorittomvandling av biotitt og amfibol er også observert. Foliasjon er definert ved orienterte amfibolkorn. Amfibolitt med rik disseminasjon av ilmenitt og mindre mengder av magnetkis samt spor av kobberkis er observert i nær tilknytning til båndet jernformasjon (Figur 9b).



Figur 9 Bilder av amfibolitt. a) Saget håndstykke av prøve BR 547 som viser god foliasjon og granat. b) Mikroskopibilde tatt i pålys. Magnetkis er ofte omvandlet til jernhydroksid. Ilmenitt vises som små, lysegrå korn spredt i bergarten c) Mikroskopibilde tatt i planpolarisert lys som viser amfibol, poikiloblastiske granat, og fargeløs feltspat ± kvarts. d) Bilde tatt under krysspolarisert lys som viser samme utsnitt som b og c. am=amfibol; grt= granat; po=magnetkis.

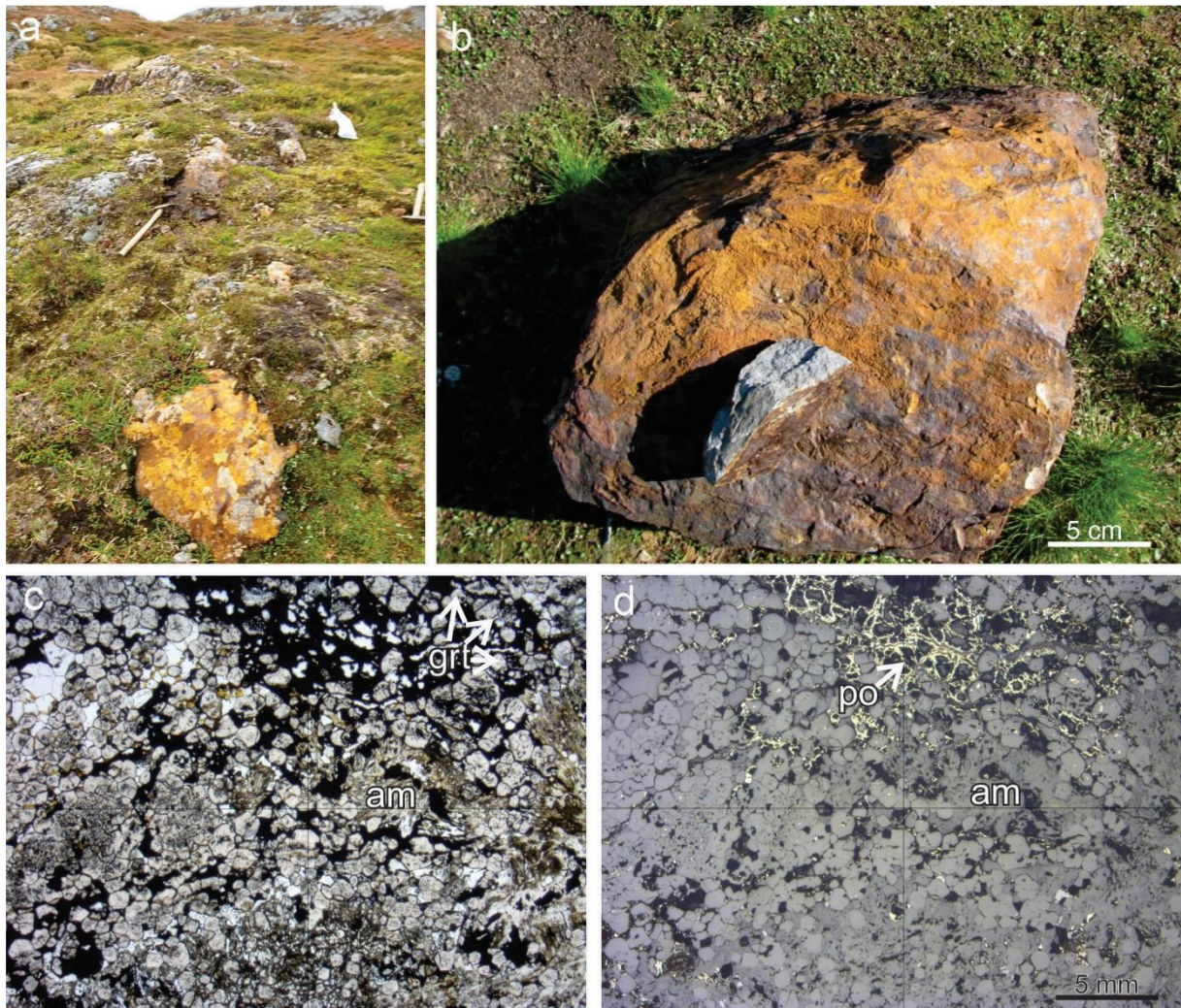
### 3.2.5 Båndet jernformasjon

Båndet jernformasjon opptrer i felt hovedsakelig i samme lagpakke som amfibolitt, men er også observert langs grensene til toglimmergneis (Figur 4). Tre prøver av jernformasjon, som finnes som tynne lag og linser (1-10 m) i nær tilknytning til amfibolitt, ble innsamlet. Prøvene består av mørkegrønne til svarte, fint båndete, finkornete og folierte bergarter som ofte har en rustfarge i felt (Figur 10a-b). Bergarten er relativt frisk selv om den stedvis kan være noe omvandlet. Den magnetiske susceptibiliteten varierer mellom  $0,52-4,53 \cdot 10^{-3}$  SI, og er dermed klart lavere enn i Ni-Cu-Co malmen, men høyere enn i glimmergneis og normal amfibolitt.

Hovedmineralene er amfibol; både hornblende og grüneritt, granat, kvarts og magnetkis (Figur 10c-d). Mengdeforholdet mellom hovedmineralene varierer mellom prøvene. I mindre mengder finnes pyritt, kobberkis, plagioklas, samt biotitt og kloritt som kan indikere senere omvandling. Magnetkis er omvandlet til limonitt (jernhydroksid) i varierende grad. Prøve SKJ 20 - 46 er fra den vestlige delen av feltområdet og er mest omvandlet og har laveste magnetisk susceptibilitet. Den inneholder også mer biotitt og limonitt enn de andre prøvene.



Bergartene ligner jernformasjon som er beskrevet fra Gulakomplekset lengre sør i Kvikne-området hvor de også opptrer sammen med amfibolitt (Nilsen 1978).



Figur 10 Bilder av båndet jernmalm. a) Feltopptreden av båndet jernmalm med jernhydroksidomvandling. b) Løs blokk av jernmalm. c) Mikroskopibilde av prøve JS-B2002 tatt i gjennomfallende lys som viser finkornet granat (grt) og amfibol (am) med interstitial magnetkis (po). d) Mikroskopibilde tatt i pålys som viser delvis omvandlet magnetkis.

### 3.2.6 Pegmatitt

Små kropper av felsiske pegmatitter er observert flere steder i feltområdet hvor de intruderer alle andre bergarter, inkludert pyroksenitt. Pegmatittene er grovkornete og består hovedsakelig av kvarts, delvis serisittisert/omvandlet feltspat, og små mengder biotitt.

## 3.3 Geokjemi av bergartene i Gulakomplekset

Det er utført geokjemiske analyser av 35 av umineraliserte og svakt mineraliserte bergartsprøver fra Brattbrakkenintrusjonen og sidebergartene innsamlet i 2020 for å karakterisere dannelsesmiljøet for Ni-Cu-Co mineraliseringene. De ble komplettert med re-analyser av fire prøver innsamlet i 2004 og tre prøver fra 2012. Alle 42 prøver er analysert ved laboratoriet ved Norges geologiske undersøkelse.

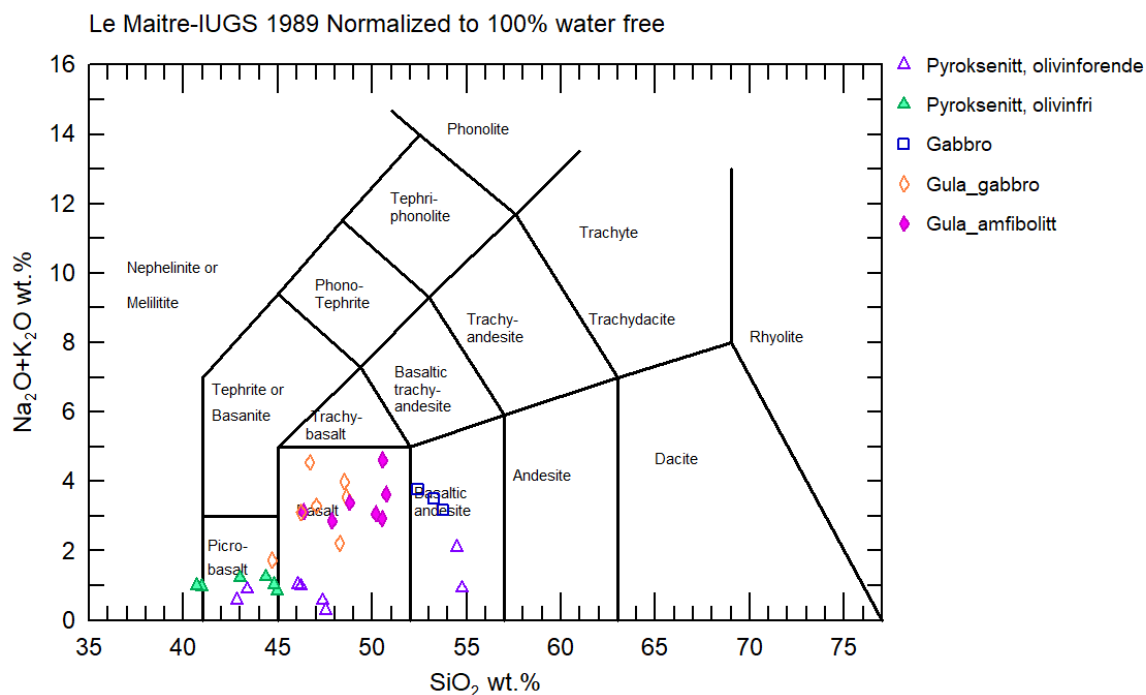
### 3.3.1 Metode

XRF-analyser (røntgenfluorescence-spektrometri) av hovedelementer (> ca. 0,5 %) på smeltede tabletter ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) og sporelementer (< ca. 0,5 %) på pressede Li-borat-tabletter (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, Zr.) er utført med XRF PANalytical Axios 4 kW instrument. I tillegg ble utfyllende sporelementanalyser, inkludert REE (sjeldne jordartsmetaller), utført med LA-ICP-MS på Thermo "ELEMENT XR" instrument (Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Pb, Bi, Th, U, V, Cr, Cu, Zn, Ga). Innholdet av total svovel (S) i fire prøver ble bestemt med LECO. Alle analyseresultatene er gitt i Tabell 1, 2 (se Vedlegg). Ved plotting av hovedelementene er total mengde av oksidene omregnet til 100 vekt% fri for vann.

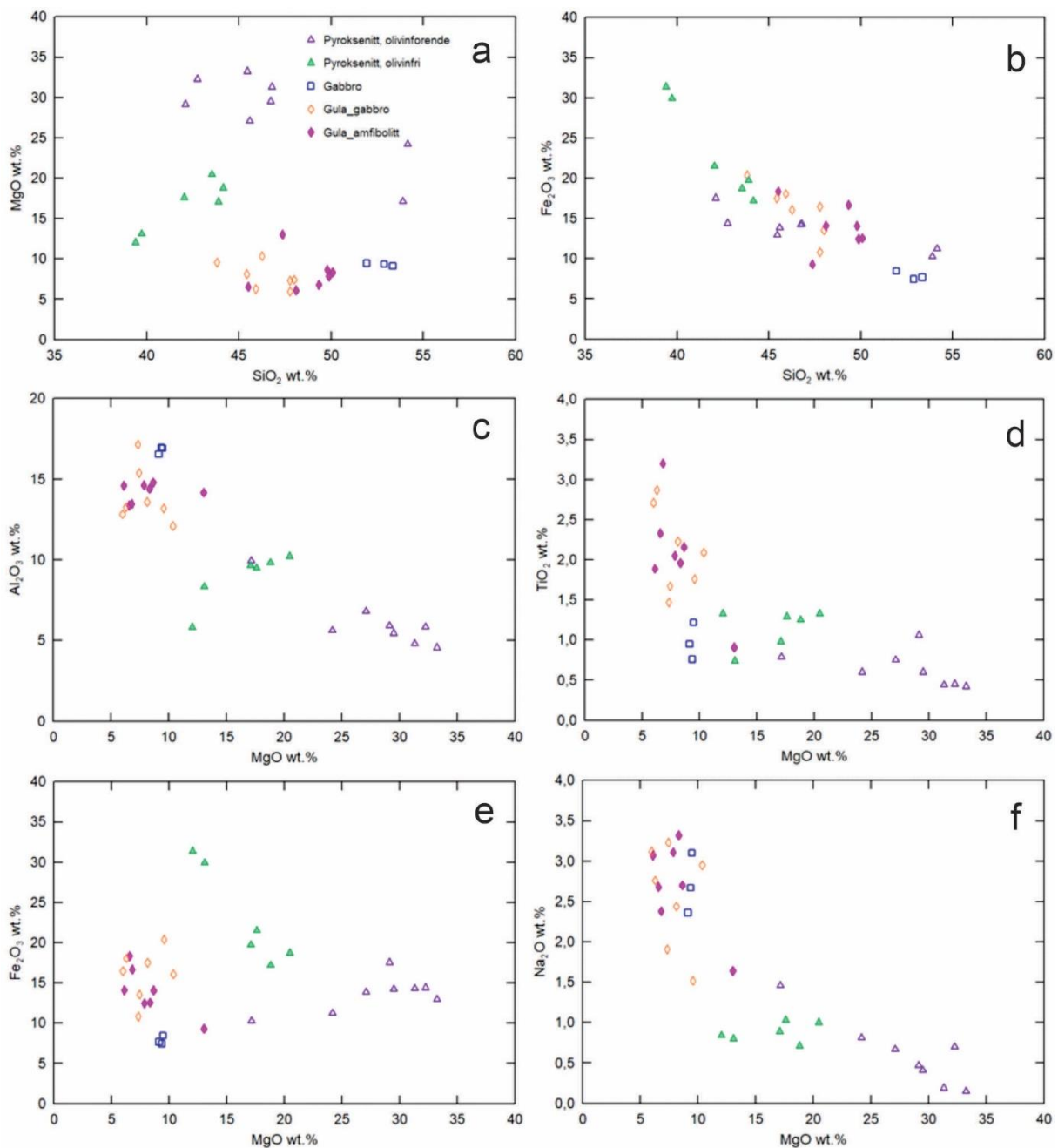
### 3.3.2 Resultater

Analyseresultatene er vist i ulike diagrammer for de magmatiske, dyp- og overflatebergartene for bedre å definere de ulike bergartstypene, sammenhengen mellom dem og deres opprinnelse. De er inndelt i olivinførende pyroksenitt, olivinfri pyroksenitt og gabbro som utgjør deler av Brattbakken-intrusjonen, samt gabbro og amfibolitt fra sidebergartene. Alle disse bergartene er en del av Gulakomplekset som beskrevet i Kapittel 3.1, men for å skille dem fra hverandre i denne beskrivelsen er sidebergartene angitt som Gula\_amfibolitt og Gula\_gabbro og samlet som sidebergartene.

De magmatiske bergartene kan klassifiseres i ulike diagrammer basert på sammensetningene av disse bergartene i ulike avsetningsmiljø som er aktive i dag. Dette benyttes også for å bestemme opprinnelsen til omdannede, eldre bergarter. I et slikt diskrimineringsdiagram plotter de aller fleste prøvene av de mafiske sidebergartene som tilhører Gulakomplekset i feltet for basalt (Figur 11) (Le Maitre 1989). Gabbro og pyroksenitt fra Brattbakken-intrusjonen har større spredning i innholdet av  $\text{SiO}_2$  og plotter også i feltene for pikrittisk-basalt (picro-basalt) og basaltisk andesitt. Amfibolitt og gabbro fra sidebergartene viser liten spredning i kjemisk innhold.



Figur 11 Magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene plottet i et klassifiseringsdiagram for gjennomsettende/magmatiske bergarter (Le Maitre 1989).



Figur 12 Magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene plottet i a)  $\text{SiO}_2$ -MgO og b)  $\text{SiO}_2$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  diagram. c, d, e, f) MgO i magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene plottet mot utvalgte hovedelementer.

Sammensetningene av de mafiske og ultramafiske bergartene fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene er vist i punktdiagram. Figur 12a viser at de fleste prøvene fra intrusjonen har langt høyere innhold av magnesium (MgO) enn sidebergartene. Unntak er silikarike ( $\text{SiO}_2$ ) prøver av gabbro fra den nordøstlige delen av intrusjonen, og  $\text{SiO}_2$ -rike prøver av pyroksenitt i nærheten av disse som også inneholder noe mindre MgO enn pyroksenitt i sørvest. Olivinfri pyroksenitt, som omgir den semi-massive nikkelmalmen, inneholder mindre MgO og viser stor spredning, mens alle sidebergartene fra Gulakomplekset har bra samling og skiller seg fra Brattbakken-bergartene.

Olivinfri og svakt mineralisert pyroksenitt har høyest innhold av jern ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Figur 12b), og er også dels anriket på svovel (Tabell 1).

MgO-innholdet i de mafiske og ultramafiske bergartene fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene er plottet mot innholdet av utvalgte hovedelementer i Figur 12 c-f. Det er tilsynelatende en god negativ korrelasjon mellom innholdet av MgO og  $\text{Al}_2\text{O}_3$  når olivinfri pyroksenitt utelukkes, og antyder en mulig felles magmatisk differensiasjonstrend for disse magmatiske bergartene. Denne trenden er i midlertidig ikke så tydelig i et MgO-TiO<sub>2</sub> diagram, og dette vil diskuteres nærmere nedenfor i forbindelse med presentasjoner av variasjoner i innholdet av sporelementer. Det er god samling av analyseverdiene både for  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  og  $\text{Na}_2\text{O}$  i sidebergartene, og gabbro fra Brattbakken-intrusjonen følger denne samlingen i MgO-Na<sub>2</sub>O diagrammet.

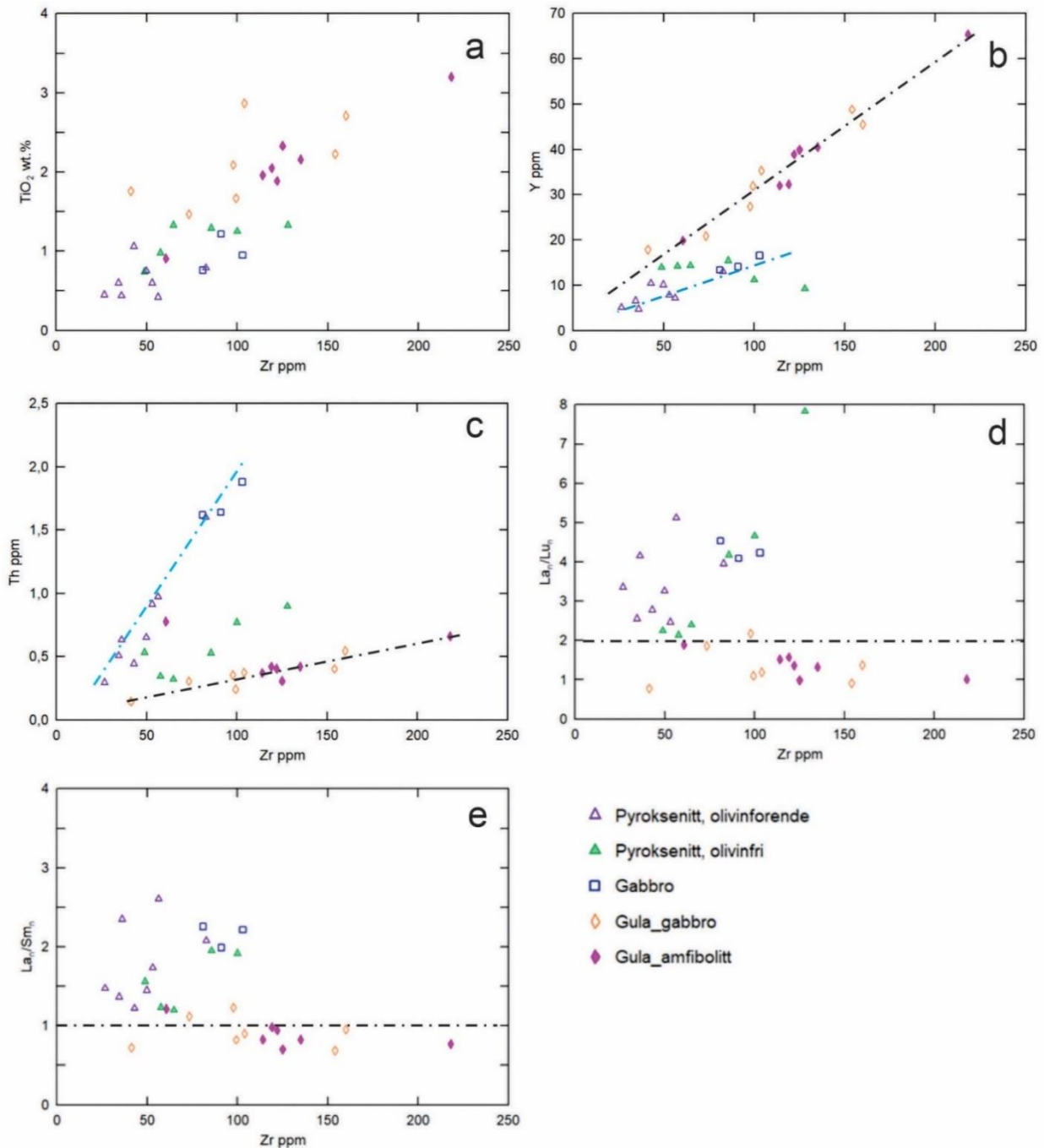
Noen elementer, som de såkalte HFSE (*elementer med høy feltstyrke*) (hafnium (Hf), zirkon (Zr), titan (Ti), niob (Nb), tantal (Ta), thorium (Th) og uran (U)) samt yttrium (Y) og sjeldne jordartselementer (REE) er smeltekjære og regnes som stabile under omdanning og svak omvandling av bergarter, og kan vise trender som indikerer opprinnelig avsetningsmiljø. Figur 13a viser at gabbro og amfibolitt i sidebergartene generelt har høyere innhold av både Ti og Zr enn gabbro og pyroksenitt fra intrusjonen. Det er imidlertid litt stor spredning i innholdet av titan til at det er mulig å peke på markerte magmatiske trender, men slike trender er langt mere synlig i Zr-Y diagrammet (Figur 13b). Det viser tydelig at sidebergartene og Brattbakken-intrusjonen har ulike magmatiske differensiasjonstrender. Olivinfri pyroksenitt som omgir den semi-massive nikkelmalm avviket fra Brattbakken-intrusjonens trend. Tilsvarende ulike magmatiske trender for de ulike gruppene av bergarter er også svært tydelig i Zr-Th diagrammet, og selv om Th-verdiene er svært lave, er avviket i trendene for de to bergartsgruppene signifikante (Figur 13c). Olivinfri pyroksenitt viser også her en avvikende trend, og har kjemiske verdier som plottes mellom sidebergartene og Brattbakken-intrusjonen. Disse avvikene for olivinfri pyroksenitt kan indikere assimilering/innblanding av sidebergartene i Brattbakkenmagma.

Sjeldne jordartselementer (REE – rare earth elements) inndeles gjerne i såkalte lette; LREE (light REE La-Gd) og tunge; HREE (heavy REE; Tb-Lu). REE-verdiene normaliseres mot kondritt (primitiv meteoritt) ved sammenligning av mengdeforhold mellom REE.  $\text{La}_n/\text{Lu}_n$ -forholdet gir en enkel indikasjon på forholdet mellom LREE og HREE, og det er tydelig at bergartene har ulik fordeling av REE, da Brattbakken-intrusjonens bergarter har generelt høyere  $\text{La}_n/\text{Lu}_n$ -forhold ( $> 2$ ) enn sidebergartene ( $< 2$ ) (Figur 13d). Det er vanligere å benytte  $\text{La}_n/\text{Sm}_n$  ved en slik karakterisering, og Figur 13e viser at de magmatiske bergartene i sidebergartene i hovedsak har  $\text{La}_n/\text{Sm}_n \leq 1$  og i Brattbakken-intrusjonen er  $\text{La}_n/\text{Sm}_n > 1$ .

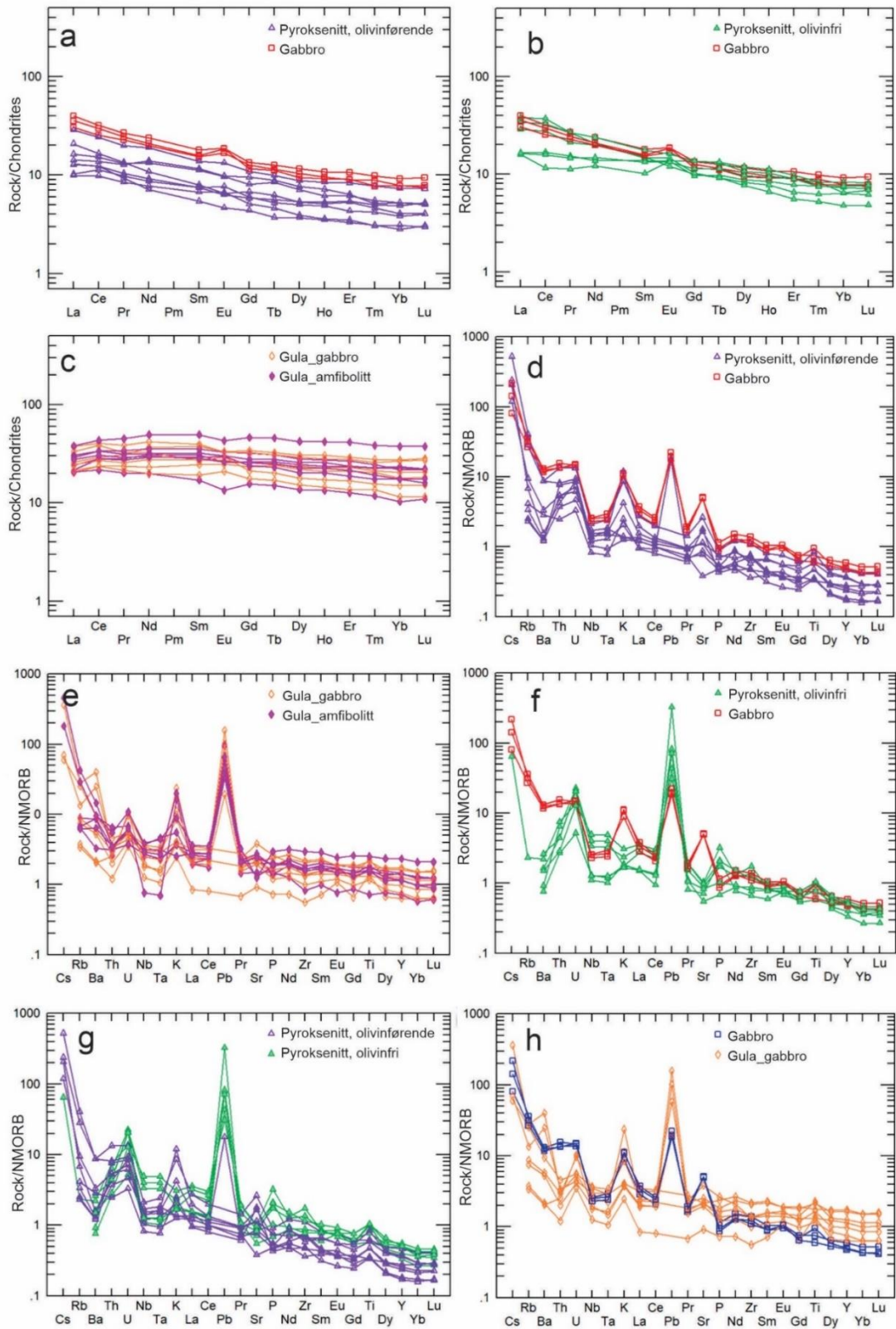
Normaliserte linjediagram (*'spider-diagram'*) er vanlig å benytte for å vise variasjoner i innholdet av REE i bergarter ved tolking av deres avsetningsmiljø.

Gabbro og olivinførende pyroksenitt som tilhører Brattbakken-intrusjonen har like REE-mønstre i et linjediagram når analyseverdiene er normalisert mot kondritt (primitiv meteoritt) (Sun and McDonough, 1989), og viser anriking av LREE i forhold til HREE (Figur 14a). Dette er et mønster som er karakteristisk for smelte ved midthavsrygger som er anriket på inkompatible (smeltekjære) grunnstoffer, E(enriched)-MORB. Olivinfri pyroksenitt viser ulike mønstre; tre av prøvene (SKJ 04 - 3, 20 - 31 og - 53) har mønster som gabbro og olivinførende pyroksenitt selv om de dels har større utarming av HREE. Tre prøver (SKJ 04 - 4, 12 - 22 og 20 - 35) er mindre anriket på LREE og har flatere mønster (Figur 14b) og kan indikere varierende grad av assimilering fra sidebergartene. Amfibolitt og gabbro fra sidebergartene har tilnærmet flatt mønster med svak utarming av LREE (Figur 14c) som er

vanlig for basalt avsatt langs midthavsrygger; N(normal)-MORB (mid ocean ridge basalt). De har generelt noe høyere konsentrasjon av REE enn N-MORB. Det er stor forskjell mellom mønstrene til de to hovedgruppene av mafiske bergarter, og indikerer at de sannsynligvis er dannet fra magmatiske smelter med ulik sammensetning. Det totale innholdet av REE er større i sidebergartene enn i intrusjonen.



Figur 13 a) Magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene plottet i a) Zr-TiO<sub>2</sub> diagram. b) Zr-Y diagram. c) Zr-Th diagram. d) Zr-La<sub>n</sub>/Lu<sub>n</sub> og e) Zr-La<sub>n</sub>/Sm<sub>n</sub> diagram. Normaliseringsverdier fra Sun & McDonough (1989)



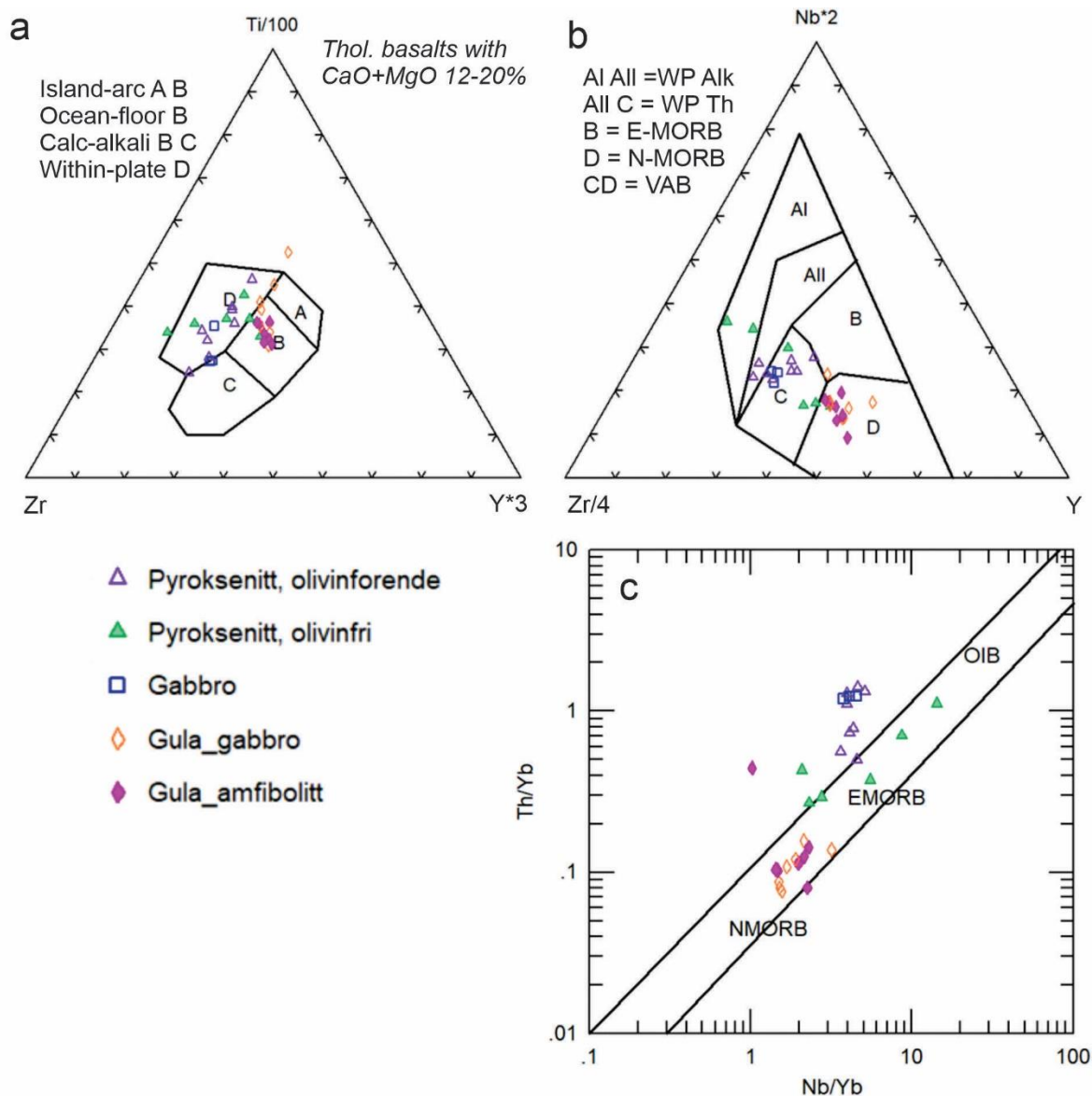
Figur 14 Spredningsdiagram hvor innholdet av sjeldne jordartselementer (REE) i forhold til sammensetningen til kondritt er plottet for a) Olivinførende pyroksenitt og gabbro i Brattbakken-intrusjonen b) Olivinfri pyroksenitt og gabbro og c) Gabbro og amfibolitt i sidebergartene. Spredningsdiagram hvor analyseverdier i forhold til sammensetningen til N-MORB er plottet for d) Olivinførende pyroksenitt og gabbro i Brattbakken-intrusjonen og e) Gabbro og amfibolitt i sidebergartene. f) Olivinførende pyroksenitt og gabbro i Brattbakken-intrusjonen og g) Olivinførende og olivinfri pyroksenitt. h) Gabbro i Brattbakken-intrusjonen og i sidebergartene. Normaliseringsverdier fra Sun & McDonough (1989).

Den antatte ulike opprinnelsen for de mafiske bergartene i Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene illustreres også tydelig i multi-element linjediagram hvor analyseverdiene er normalisert mot verdier for N-MORB (Figur 14d-h) (Sun & McDonough 1989). I tillegg til HFSE inkluderer dette diagrammet også andre inkompatible (smeltekjære) grunnstoffer som tilhører gruppen LILE (*store-ioner litofile elementer*); Cs (cesium), Rb (rubidium), Ba (barium), K (kalium), Sr (strontium) og Pb (bly). Flere av disse er imidlertid også mobile under senere omdanning etter at de er dannet, og verdiene må vurderes på denne bakgrunn. For eksempel ser Pb ut til å være relativt sterkt anrikt i de fleste bergartene uten at årsaken er klarlagt.

Olivinførende pyroksenitt og gabbro i Brattbakken-intrusjonen har like mønstre og er tydelig anrikt i LILE, Th og U i forhold til N-MORB, men utarmet på de fleste HFSE. En klar negativ anomali for Nb og Ta i basaltiske bergarter blir vanligvis antatt å skyldes dannelse i øybue-miljø uten at det er andre indikasjoner som tilsier dette i denne sammenheng. Sidebergartene viser også samme mønster og har en svak anrikning av LILE i forhold til N-MORB, men har tilnærmet flatt mønster som N-MORB for HFSE. Prøven av Gula-gabbro med minst konsentrasjon av REE (SKJ 20 - 61) er antatt å være noe omvandlet. Anrikning av noen mobile LILE som Cs, Rb, Ba, K, Pb og Sr i forhold til N-MORB i de fleste bergartene kan skyldes omdanning under metamorfose. Olivinfri pyroksenitt viser også i dette diagrammet en to-delning; SKJ 04 - 3, 20 - 31 og - 53, som har LREE-mønstre som olivinførende pyroksenitt og gabbro (Figur 14b), er mere anrikt i enkelte HFSE som for eksempel Nb og Ta enn Brattbakken-gabbro (Figur 14f). SKJ 04 - 4, 12 - 22 og 20 - 35, som er relativt utarmet på LREE (Figur 14b), har imidlertid Nb- og Ta-innhold som olivinførende pyroksenitt (Figur 14g). Ellers er det en generell anrikning av de smeltekjære grunnstoffene i olivinfri pyroksenitt i forhold til olivinførende med unntak av de mest mobile LILE som Cs, Rb og Ba.

Gabbro fra de to hovedgruppene av bergarter illustrerer tydeligere ulikhetene mellom dem i multi-element linjediagrammet (Figur 14h). Gabbro fra intrusjonen er mer anrikt i Th, men er utarmet for de fleste HFSE i forhold til gabbro i sidebergartene. Sistnevnte har tilnærmet flatt mønster for HFSE og sammenfaller mer med N-MORB selv om svak anrikning av LILE også finnes i denne. Gabbro fra intrusjonen er derimot tydelig utarmet på HFSE.

Basaltiske bergarter kan videre plottes i ulike diskriminantdiagrammer for å indikere hvilke geotektoniske miljø de opprinnelig kunne være avsatt i. De fleste prøvene av sidebergartene plotter i felt B (OFB – ocean floor basalt; *havbunnsbasalt avsatt ved aktiv spredningssone*) (Figur 15a) som representerer vulkanitter avsatt ved havbunns-spredning (Pearce & Cann 1973). Pyroksenitt fra Brattbakken-intrusjonen har egentlig for høyt innhold av MgO til at dette diagrammet kan brukes til å klassifisere dem, men prøver av gabbro fra intrusjonen tilfredsstiller kravet og inneholder mellom 12 - 20 wt.% CaO + MgO. Denne gabbroen plotter imidlertid ikke sammen med sidebergartene og viser at den kan ha en annen opprinnelse. Bergartene fra Brattbakken-intrusjonen plotter i feltet for WPB (*within-plate-basalt; basalt avsatt innenfor en skorpeplate og ikke ved aktiv spredningssone*). Tilsvarende gruppering av bergartene viser også Nb-Zr-Y diagrammet (Figur 15b) (Meschede 1986), og indikerer at Brattbakken-intrusjonen kan være dannet innen en kontinentalskorpe.



Figur 15 Magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og Gulagruppen plottet i a) Ti-Zr-Y klassifiseringsdiagram (Pearce & Cann, 1973) og b) Nb-Zr-Y klassifiseringsdiagram (Meschede, 1986). c) Magmatiske bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene plottet i Nb/Yb – Th/Yb diagram (Pearce, 2008).

Havbunnsbasalt kan videre differensieres i Nb/Yb – Th/Yb diagram (Pearce 2008). Analyser av prøver av sidebergartene plottes sammen, og indikerer bergarter med sammensetning nærmest normal basalt fra midthavsspredningsrygg (Figur 15c; N-MORB). En prøve (BR 470) plottes utenfor dette feltet og er svakt mineralisert og omvandlet. Prøvene fra Brattbakken-intrusjonen har en annen sammensetning, og spesielt olivinfri pyroxenitt viser stor spredning. Prøve SKJ 04 - 03, 20 - 31 og -53 plottes midt innenfor mantel-feltet, og SKJ 04 - 03, SKJ 12 - 22 og 20 - 35 plottes langs kanten eller utenfor. Olivinførende pyroxenitt viser i hovedsak tett samling, men prøvene BR 550 og SKJ 20 - 24/-29 plottes nærmere mantel-feltet. De to sistnevnte prøvene er innsamlet nærmest den olivinfri pyroxenitten og kan representere en overgangsfase (Figur 16).

En kort oppsummering av den kjemiske sammensetningen av de magmatiske, mafiske og ultramafiske bergartene fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene viser at de trolig er dannet fra ulike magmatiske smelter. På grunn av senere omdanning og omvandling er det ikke mulig entydig å bestemme de geotektoniske miljøene for dannelsen av bergartene. Det er imidlertid trolig at



Gulakompleksets amfibolitt og gabbro opprinnelig er dannet langs havbunnsbredning eller spredningsbasseng bak en øybue, og noen diagrammer antyder at Brattbakken-intrusjonen er dannet i kontinental skorpe. De ulike trender innenfor Brattbakken-intrusjonen samsvarer ikke med enkel magmatisk differensiering, men avvikene for olivinfri pyroksenitt kan indikere assimilering/innblanding av sidebergartene i magma.

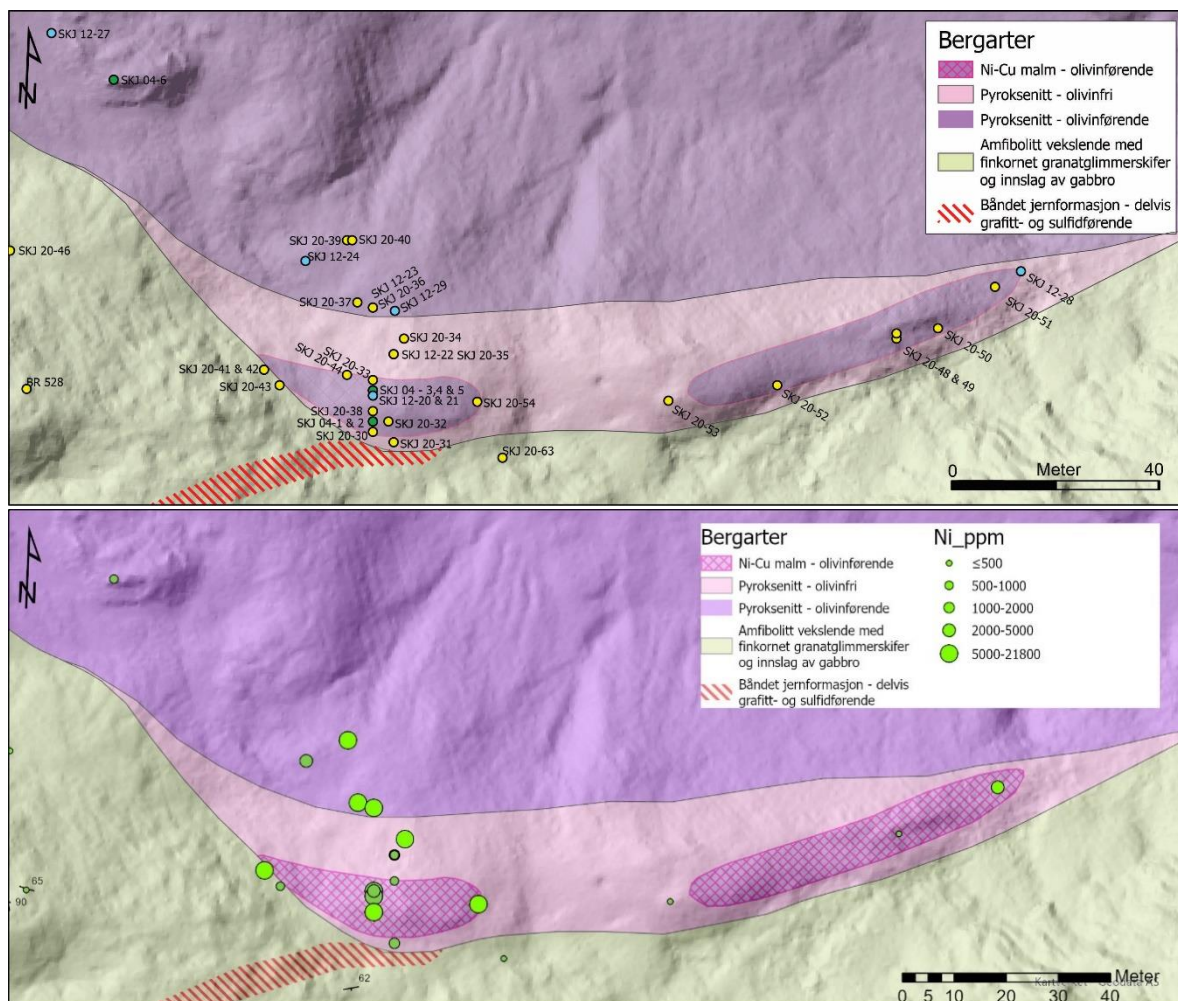
## 4 Ni-Cu-Co MINERALISERING

### 4.1 Feltbeskrivelse

Malmsonen faller i hovedtrekk sammen med de rustbrune områdene lengst sørvest og innerst i Vakkerdalen (Figur 5). Selve utgående av malmen er imidlertid noe mindre enn samlet areal av rustfarget berggrunn. Malmsonen kan best studeres på et platå; jernhatt-platået ovenfor de rustbrune skrentene i nord og øst. Det samlede arealet av malmens utgående er beregnet til ca. 870 m<sup>2</sup> fordelt på to adskilte partier på henholdsvis 350 m<sup>2</sup> i vest og 520 m<sup>2</sup> i øst. Vertikal utstrekning av malmen er ukjent (se diskusjon i Kapittel 7).

Malmprøvene er tatt innenfor et område på 35 m N-S (mellom SKJ 20 - 30 i S og SKJ 20 - 39 i N) og 140 m Ø-V (mellom SKJ 20 - 42 i V og SKJ 20 - 51 i Ø) (Figur 16). Kun prøve SKJ 20 - 42 er tatt helt in-situ (dvs. banket ut fra fastsittende berggrunn), men de fleste malmblokkene er vitret ut in-situ fra undergrunnen eller de er helt korttransporterte. Prøve SKJ 20 - 39 er vel den blokka som har trillet lengst nedover skråningen mot nord og først har stoppet opp ca. 30 m fra kanten av selve jernhatt-platået. Det er ikke lett å avgrense hva som er helt in-situ sulfidførende, hva som er masser (enkeltblokker og blokkansamlinger) som har vært litt i bevegelse nedover brattskråningen og hva som er rustfarget bare på grunn av avrenning fra ovenforliggende sulfidholdig grunn. Avgrensningen av malmsonen på kartet er derfor gjort etter beste skjønn. Malmsonen er kanskje på det tykkeste (bredeste) i utgående over jernhatt-platået med rundt 11 m mellom SKJ 20 - 30 i S og SKJ 20 - 44 i N. Likevel tyder de magnetiske målingene på at dette ikke er sammenhengende semi-massiv rikmalm med utgående i dagen, men slirer og linser av rik malm som brått avløses av sulfidfattigere malmpartier eller til og med sulfidfri vertspyroksenitt. De magnetiske målingene er imidlertid ikke helt entydige da graden av omvandling med dannelse av magnetitt i malmsonen og dels i vertspyroksenitt også har betydning for resultatene.

Rustryggen mellom lok. SKJ 20 - 53 i V og SKJ 20 - 51 i Ø hører også med til malmen. Dette er imidlertid sterkt utlutet og dypforvitret malm som er nesten helt uten gjenværende sulfider i utgående langs hele den ca. 65 m lange ryggen. Dette har ført til at denne delen av malmsonen bare har gitt helt ubetydelige utslag ved magnetiske bakkemålinger samt også ved magnetiske susceptibilitetsmålinger utført i hele ryggens lengde. Det er imidlertid sikkert at dette partiet også utgjør en del av malmen i Brattbakken og ikke bare er rusten, vitret pyroksenitt. Høye analyseverdier for Cu, Ni og Se i prøve SKJ 20 - 51 lengst øst på ryggen er med på å dokumentere dette.



Figur 16 Ni-Cu-Co malmzone med prøvenummer (over) og innhold av nikkelt (under). Gangarten i malmen er olivinrik mens pyroksenitt som umiddelbart omgir malmsonen er olivinfri. Videre mot nord dominerer olivinførende pyroksenitt.

## 4.2 Mineralogi

### *Malmens sulfidsammensetning*

Malmen varierer gradvis fra svakt sulfidførende pyroksenitt med 1 - 2 vekt-% svovel (S) som tilsvarer 2,5 – 5 % sulfider (magnetkis-ekvivalenter), via typisk impregnasjonsmalm med anslagsvis 5 - 20 % sulfider til semi-massiv eller årenett-tekstur rikmalm der sulfidene henger sammen i et tykt årenett med ikke-sammenhengende silikatmineraler imellom sulfidnettverket (Figur 19c). Sulfidinnholdet i frisk, uforvitret rikmalm ligger i området 40 - 60 %, mens silikatandelen pluss et varierende innhold av jernoksider (magnetitt) utgjør det resterende. I ekstremfall kan malmen være helt massiv med tilnærmet 100 % sulfider og uten noe gangart. SKJ 20 - 42 er tatt fra en slik liten sulfidlinse med tilnærmet ren sulfidfase, dvs. helt uten silikater, men med litt limonitt-dannelse (rustdannelse) langs årenett (Figur 17c). Det er bemerkelsesverdig at slik rik offset malm også dannes i Brattbakken-intrusjonen og da tilsynelatende i svært liten skala.



Figur 17 a) «Cragen» er en spiss, fast klippe av olivinfri pyroksenitt helt på kanten av jernhatt-platået mot nord; Cragen er brukt som et nyttig referansepunkt under prøvetakingen. b) Detalj fra jernhatt-platået med små og store biter av sterkt sulfidutlutet malm liggende i overflaten; kamerafutteral som referanse. c) In situ ren sulfidlinse uten silikatgangart på lok. SKJ 20 – 42, akkurat på kontakten mot sideberg av amfibolitt (lok. SKJ 20 – 41). d) Frisk malmblokk av semi-massiv Ni-malm SKJ 12 – 23 i nordskrånningen under jernhatt-platået; malmen har bare en mm-tynn rustskorpe

Det er ikke mulig å bestemme de relative mengdene av de ulike malmtypene, dvs. fordelingen av impregnasjonsmalm vs. semi-massiv malm og ren sulfidfase bare ved kartlegging i dagen. Det vil kreve kjerneboringer og et stort antall analyser av borekjerner.

Den semi-massive malmen opptrer rikelig i større og mindre blokker oppe på jernhatt-platået og nedover i nordskrånningen fra platået. Denne malmtypen er tett prøvetatt for å få best mulig inntrykk av dens mineralogiske og kjemiske karakteristika (innhold og fordeling av metaller, gangartsminerale, m.m.). Rikmalm fins både som blokker i frisk tilstand og naturligvis i mer eller mindre utlutet tilstand i størrelse fra blokker, via småstein til grus og fin sand der den har ligget eksponert for vær og vind siden istiden. Prøve SKJ 04 - 5, SKJ 12 - 23, SKJ 20 - 36, - 37, - 38 og - 39 er eksempler på det første, mens prøve SKJ 20 - 34, SKJ 04 - 2, SKJ 12 - 21 SKJ 20 - 34, - 51 og - 54 er eksempler på mer eller mindre sulfid-utlutet malm (Figur 21). Når sulfidene er helt utlutet, gjenstår det bare et porøst, svampaktig rustskjell med tetthet som ofte kan bli godt under  $1 \text{ g/cm}^3$ .

Sulfidmineral-selskapet er meget enkelt i denne malmen. I frisk og moderat vitret tilstand består sulfidfasen i semi-massiv malm av magnetkis ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) som hovedmineral samt mindre mengder pentlanditt og kobberkis. Andre sulfider er sjeldne eller ikke-eksisterende.

Pentlanditt er det mineralet som inneholder både nikkell (Ni) og kobolt (Co) i malmen, jfr. Figur 20. Pentlanditt-innholdet i malmen er ca. 3x Ni-innholdet ved kjemisk analyse (dvs. Ni-innholdet i ren pentlanditt ligger på ca. 30 – 33 vekt-%). I den friske semi-massive malmen ligger Ni-innholdet i

gjennomsnitt på rundt 0,9 til 1,0 % og Co-innholdet på rundt 0,08 % eller 800 ppm. Innholdet av Ni og Co varierer ikke mye i slik malm. I frisk tilstand er pentlanditten lys gul til gulhvitt og isotrop. I noen slip er fargen lik magnetkisens, men som regel er det en meget svak forskjell i fargenyanse. Videre viser pentlanditt ofte et heksagonalt oppsprekings eller krympemønster (*hexagonal parting*) med sprekker parallelt overflaten samt også radiære sprekker. Karakteristisk utvikling av flamme-pentlanditt sees imidlertid meget sjelden (SKJ 20 – 54, Figur 19b). Pentlanditt opptrer nesten alltid som anhedrale til subhedrale korn og er i all hovedsak fullstendig innesluttet i magnetkis som vertsfase.

Kobberkis er det eneste mineralet som inneholder kobber (Cu) i malmen. Innholdet av kobberkis er ca. 3x Cu-innholdet som vi får ved analyse. Innholdet av kobberkis i rikmalmen varierer mye mer enn Ni- og Co-innholdet. Kobberkis er ofte finkornet, anhedral og jevnt fordelt i magnetkis, men kan også opptre tett sammen med pentlanditt. I den semi-massive malmen sitter både pentlanditt og kobberkis nesten alltid fullstendig innesluttet i magnetkis og aldri i silikatmassen (kumulus-olivinen). I sjeldne tilfeller (f.eks. SKJ 04 - 3) opptrer det større ansamlinger av kobberkis i slipene, og en slik samling av kobberkis er årsaken til anrikning av gull, platina og palladium i nettopp denne ene prøven. Denne prøven er imidlertid ikke rik malm, men fattig impregnasjonsmalm med kun 2,4 % S. Kobberkis sitter derfor som en ren, monomineralsk samling i silikatmassen uten nært assosiert magnetkis og pentlanditt i denne prøven. Ellers ble det observert ett enkelt kubisk, isotropt, hvitt korn av mulig sperrylitt (PtAs<sub>2</sub>) i SKJ 20 - 38. Sperrylitt er generelt sett det vanligste platina-gruppe mineralet i Ni-Cu-Co sulfidmalm.

Hovedsulfidet magnetkis kan opptre i flere former (monoklin, heksagonal og i sjeldne tilfeller som støkiometrisk rent FeS, troilitt). Det er ikke identifisert undertype av magnetkis ennå, i reflektert lys i mikroskop sees bare at det kun er snakk om én homogen magnetkis. Fargen kan imidlertid variere fra lys gulhvitt til lys creme-beige til litt sterkere brun i pålys, og den viser nesten alltid en viss anisotropi under X-nicols. I sulfidmineraliseringen i Brattbakken har magnetkis og pentlanditt meget lik fargetone, og det er andre karakteristika ved disse sulfidmineralene som gjør at de lett kan skilles fra hverandre i pålys.

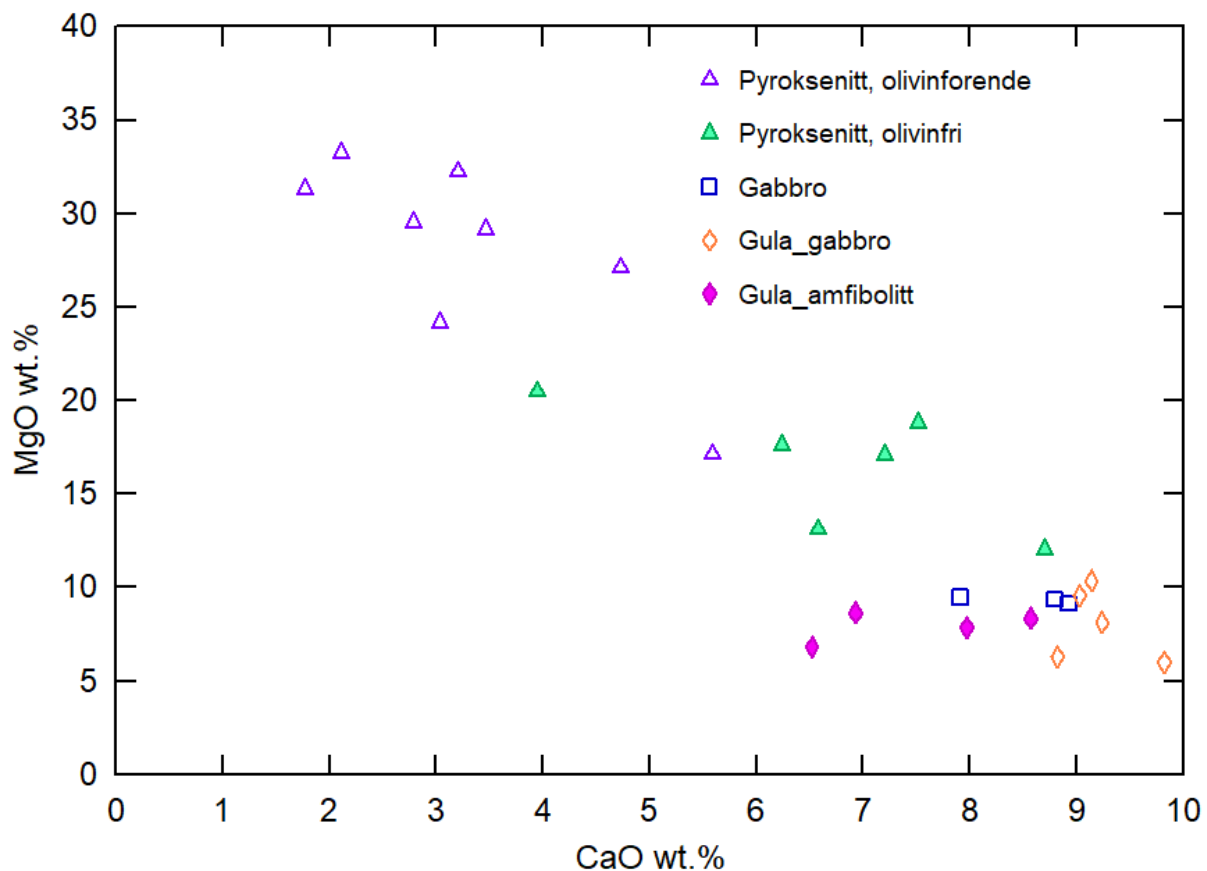
### ***Malmens gangart (silikat-innhold)***

Malmens gangart (silikatandel) i rik, semi-massiv malm består vesentlig av euhedral til subhedral kumulus-olivin som er mer eller mindre hydrert til bladlig antigoritt-serpentin i pseudomorfose etter kumulus-olivin. Videre opptrer underordnet også noe kloritt (mest penninitt og klinokloritt) som interkumulus-fase i pseudomorfose vesentlig etter ortopyroksen, eventuelt også mindre mengder klinopyroksen samt amfibol etter klinopyroksen. I svakt sulfidførende pyroksenitt med ca. 1 - 3 % S og impregnasjonsmalm med opptil 8 - 10 % S som tilsvarer ca. 20 - 25 % magnetkis-ekvivalenter er gangarten primært amfibol etter klinopyroksen, eventuelt med gjenværende klinopyroksen-relikter samt varierende mengder kloritt (f.eks. SKJ 04 - 4). Gangarten i SKJ 04 - 4 holder da karakteristisk 6,7 % Mg og hele 5,75 % Ca (XRF-analyse, omregnet fra oksid til element og ikke normalisert). Ved omtrent mer enn 10 % S (25 % magnetkis-ekvivalenter) skjer det tilsynelatende et vesentlig skifte i gangartens sammensetning. Da erstattes amfibol og klinopyroksen som hovedkomponenter av kumulus-olivin/serpentin etter olivin som hovedmineral, men fremdeles er relativt mye interkumulus ortopyroksen og noe klinopyroksen til stede samt kloritt etter begge pyroksener (f.eks. SKJ 20 - 54 med 7,47 % Mg og 1,08 % Ca). Ved økende sulfidinnhold i malmen avtar andelen ortopyroksen og klinopyroksen på bekostning av olivin og til slutt forsvinner klinopyroksen helt og ortopyroksen nesten helt (f.eks. SKJ 20 - 36 der gangarten holder 10,65 % Mg og bare 0,01 % Ca). Men fortsatt er det en god del kloritt i gangarten, og da primært i interkumulus-posisjon. I ekstremtilfelle er kloritt

totalt sammenvokst med serpentin og da uten noe klart skille mellom kumulus og interkumulus faser (SKJ 20 - 34). Slipene viser samlet sett en jevn overgang fra godt bevart euhedral kumulus-olivin til finkornet, bladlig serpentin i pseudomorfose etter de tidlige, magmatiske olivinkornene. Denne overgangen er ledsaget av til dels betydelig magnetitt-dannelse og da primært dannet som en opphopning av jernoksid på overgangen mellom sulfid (magnetkis) og silikater (serpentin og kloritt). Det er denne sekundære magnetitten som bidrar til de svært høye verdiene for magnetisk susceptibilitet i malmen (opptil  $350 \times 10^{-3}$  SI). Sulfidfasen (magnetkis) bidrar, isolert sett betydelig mindre (maks.  $64 \times 10^{-3}$  SI i ren sulfidfase, SKJ 20 - 42). Både serpentin og kloritt reagerer med sulfidfasen, vokser inn i sistnevnte og danner finkornete silikat/sulfid aggregater i kontaktsonen. Dess sterkere serpentinisering og klorittisering dess mer sekundære mineralreaksjoner og sammenvoksinger sees i slipene. Det er tydelig at en ujevn hydrering av malmen har funnet sted, på samme måte som for de rene silikatbergartene, og det lenge før malmen har dekomponert i dagen ved utlutning av sulfidfasen.

***Sammenhengen mellom olivinfri vertspyroksenitt, malmens gangart, sulfidinnholdet i malmen samt den senere hydreringen av malm og vertsbergarter***

CaO-MgO diagrammet (Figur 18) viser to veldefinerte avgrensede områder for henholdsvis olivinfri og olivinførende pyroksenitt. Diagrammet går egentlig mest på sulfidfri til sulfidfattige bergarter, men på grunn av tilknytningen til malmen og malmgenesen tas det med her. Malmen krystalliserer med kumulus-olivin og interkumulus ortopyroksen og litt klinopyroksen, mens bergartene rett utenfor malmen på tre av fire sider er olivinfri og for det meste også ortopyroksenfri (mot vest mangler prøver pga. snødekke og ur).



*Figur 18 CaO-MgO diagram viser at malmførende olivinfri pyroksenitt har høyere innhold av kalsium (Ca) enn olivinførende pyroksenitt, og dette kan skyldes assimilering fra sidebergarten.*

Det ser ut til å ha vært en form for både miksing og sidebergs-kontaminasjon/-assimilering i magmaet ved malmen i kontakt med sidebergartene. Olivinfri pyroksenitt har betydelig høyere innhold av i CaO nær denne kontakten (representert ved prøve SKJ 04 - 3, - 4, SKJ 12 - 22, SKJ 20 - 31, - 35 og - 53), og dette kan skyldes kontaminering av Ca-holdige sidebergarter som gabbro og amfibolitt.

I sidebergarten opptrer i tillegg sulfidførende båndet jernformasjon og amfibolitt, og assimilering av disse har trolig bidratt til å gi sulfidmetning i Brattbakken-magmaet. Det er indikasjon på dette gjennom en tydelig utvikling av S/Se-forholdet fra pyroksenitt med karakteristisk mantel-trend/nivå (SKJ 04 – 03) via gradvis rikere impregnasjonsmalm (SKJ 04 – 4) til semi-massiv malm med en markert samling av analyseverdiene godt innenfor den delen av diagrammet som kjennetegnes ved «sulphur addition» (Figur 21). Det er en meget tydelig kumulat-dannelse sammen med rikmalmen: det er mulig det har vært en synking av kumulus-olivin i magma-kammeret som i tid og rom faller sammen med synking av sulfider etter sulfidmetning i intrusjonen på grunn av assimilasjon av sulfidførende jernformasjon og amfibolitt. Karakteristiske og relativt finkornete kumulater fins ikke utenom malmsonen. Kumulusteksturen avtar gradvis fra den semi-massive malmen mot impregnasjonsmalmen. Dette sees ikke i felt, men kun ved å studere og sammenligne alle de innsamlede prøvene under ett. De to mest karakteristiske overgangsprøvene er SKJ 20 - 54 med et relativt lavt sulfidinnhold, men likevel med tendens til et sammenhengende sulfidnett og SKJ 04 - 4 som er en rik impregnasjonsmalm.

Det er ingen systematisk sammenheng mellom sulfidinnholdet i malmen og graden av serpentinisering av gangarts-olivin. Noen få prøver inneholder en svært lite omvandlet olivin (SKJ 12 - 20 og særlig SKJ 20 - 54), mens de fleste prøvene viser en sterkt omvandlet eller totalt serpentinisert olivin. Når kumulus-olivinen er sterkt serpentinisert er den assosierte interkumulus-fasen også alltid sterkt klorittisert. Helt unntaksvis går kumulus-fasen (serpentin) og interkumulus-fasen (kloritt) over i hverandre (SKJ 20 - 34). Hele denne hydrotermalomvandlingen har derfor foregått romlig ujevnt innenfor malmsonen akkurat som den har foregått romlig ujevnt også innenfor pyroksenitt og gabbro. Det er uklart hvordan den hydrotermale omvandlingen har skjedd. Den har i hvert fall skjedd lenge før overflateforvitringen av malmen.

### ***Malmens nedbrytning i dagen (sulfid-utlutning og dypforvitring)***

Malmen brytes gradvis ned ved sulfid-utlutningen i dagen. Den vitrede, mer eller mindre sulfid-utluttede malmen har en begrenset verdi i forhold til frisk malm når det gjelder å bedømme forekomstens verdipotensial, dannelse og resultatene fra de geofysiske målinger over malmsonen.

### ***Magnetkisens omvandling og nedbrytning***

Magnetkis brytes lettere ned enn pentlanditt og kobberkis. Nedbrytningen av magnetkis starter før og går mye raskere enn nedbrytningen av de to andre sulfidene, men til slutt brytes alle sulfidene ned og forsvinner helt.

Det første som skjer er at magnetkis blir mekanisk svakere, og fører til at det lett kan dannes en masse små hakk og utfall i slipet under selve poleringen. Neste steg er at det dannes tettsittende parallelle spalteriss, rettlinjede eller gjerne svakt krumbøyde, med en ledsagende markert gråbleking langs disse mot friskere magnetkis som har en friskere fargetone. Dette stadiet går gjerne under betegnelsen *altered pyrrhotite* i litteraturen (f.eks. Ixer 1990). Det neste stadium er at de parallelle rissene gradvis blir bredere, går over i hverandre og etter hvert erstattes av en grålig masse (limonitt, o.a.). På dette stadiet begynner svovel-innholdet i malmen å avta sterkt. Hele denne utviklingen ser

vi gradvis i semi-massiv malm fra SKJ 20 - 34 med 14,60 % S via SKJ 04 - 2, deretter SKJ 20 - 54 fram til - 51 med bare 3,47 % S i behold.

#### *Pentlandittens omvandling og nedbrytning*

Pentlanditt brytes betydelig saktere ned enn magnetkis, og ved en begynnende omvandling av magnetkis vil pentlanditt fortsatt være frisk. Det medfører en sekundær og relativ oppgradering av malmen fra frisk malm med gjennomsnittlig 1 % Ni til en moderat omvandlet malm med fra 1,5 til 2 % Ni. Co-innholdet følger her Ni-innholdet. Når magnetkis i malmen blir mye utlutet, for eksempel SKJ 20 - 54 med kun om lag 18 - 20 % av den opprinnelige magnetkis i behold, sees at fremdeles er om lag halvparten av den opprinnelige pentlanditt i behold med 0,48 % Ni og 0,04 % Co.

I slipene sees hyppig at pentlanditt går over til bravoitt ( $\text{Fe,Ni,CoS}_2$ ) i form av en diffus skyet, markert grålig masse som spiser seg fra kantene og innover i pentlanditten ved svovel-tilførsel fra den omgivende magnetkisen.

#### *Kobberkisens nedbrytning*

Kobberkis omvandles ikke synlig i slipene. Den brytes ned på et sent tidspunkt (f.eks. SKJ 20 - 51). Det er vanskelig å si noe kvantitativt om selve nedbrytningen, når og hvordan den finner sted fordi kobberinnholdet også i frisk malm varierer mye. Trolig kan kobberkisen holde stand meget lenge under malmens nedbrytning. Det er ofte spor av kobberkis selv i sterkt utlutet malm. Kobberkisen er alltid lett å identifisere i slipene med sin kraftigere gule farge enn magnetkisens og pentlandittens.

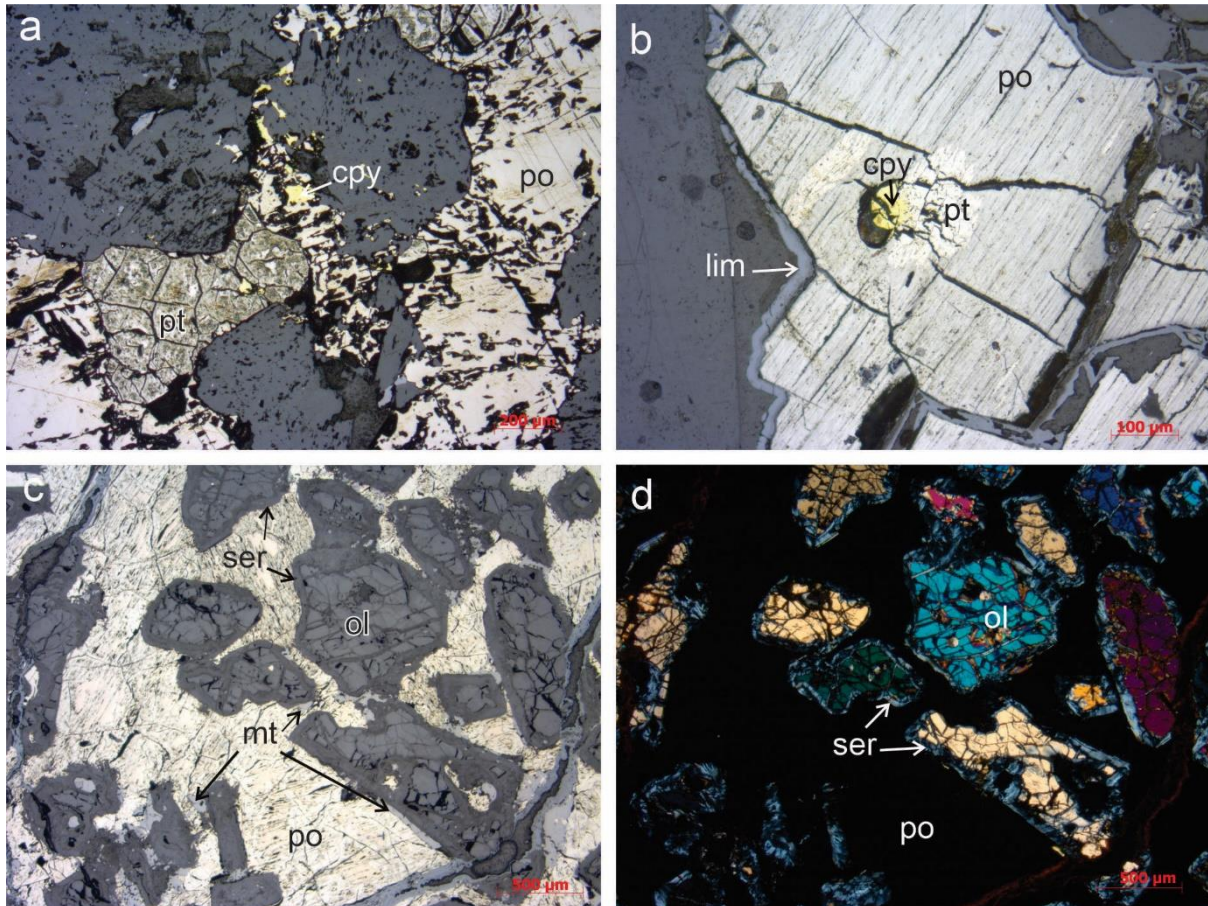
#### *Sillimanitt xenolitt i malmsonen*

Prøve SKJ 20 - 49 er svært anomal med bulksammensetning 88 vekt-%  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$  og består av nesten bare monomineralsk aluminiumsilikat, sillimanitt. Bergarten er trolig en inneslutning i selve malmsonen, dvs. en sterkt resorbert xenolitt av mulig høygrads-glimmerskifer fra sidefjellet, altså med sillimanitt som høygrads indikatormineral og som eneste gjenværende mineral etter resorbering av all kvarts, feltspat og biotitt fra den opprinnelige glimmerskiferen i den ultramafiske smelten. Prøve SKJ 20 - 50 av sterkt utlutet malm ble tatt umiddelbart ved siden av SKJ 20 - 49. Fra prøvetakingen kunne det ikke sees at SKJ 20 - 49 var en anomal bergart annet enn på frisk flate. Det ble anmerket i feltdagboka at dette var en meget tung og meget hard bergart å prøveta og som dessuten var helt ulik pyroksenitt. Det var derfor nødvendig å undersøke den nærmere på laben.

#### ***Overgangen fra malmens umiddelbare sideberg til sulfidfri eller sulfidfattig ultramafisk bergart lenger unna malmsonen (i distal posisjon til malmsonen)***

Malmens umiddelbare sideberg er olivinfri pyroksenitt både mot nord (SKJ 12 - 22 og SKJ 20 - 35), videre mot sør (SKJ 20 - 31) og mot øst (SKJ 20 - 53). Lenger bort fra malmen i retning mot nord, dvs. fra 25 - 30 m nord for jernhatten og videre nordover finnes blotninger av olivinførende pyroksenitt som stedvis går over i peridotitt, dvs. den har, eller har opprinnelig hatt, mer enn 40 % primær olivin (SKJ 12 - 24, SKJ 04 - 6, SKJ 20 - 55, -56, - 62 og BR 550). Sekundæromvandlingen (hydreringen) til serpentin, talk, kloritt og amfibol varierer lokalt. I tillegg finnes karbonat i ultramafitten i forbindelse med talkifisering av ortopyroksen. Dette gjelder imidlertid bare i de to prøvene tatt lengst i vest; SKJ 04 - 6 og særlig SKJ 20 - 62 der sistnevnte er tatt tett inntil vestgrensen av intrusjonen. SKJ 12 - 24 viser at det skjer et helt radikalt skifte i bergartssammensetning nede i brattskråningen et sted mellom 10 og 20 m nord for kanten av jernhatten. Ca. 5 m nord for selve toppen av Cragen ble det tatt to prøver av friskt utseende, uforvitret, hard olivinfri pyroksenitt, prøve SKJ 12 - 22 og SKJ 20 - 35, mens det 25 m lenger nede i skråningen brått opptrer en like friskt utseende, uforvitret, hard olivinrik

peridotitt, prøve SKJ 12 - 24. Den er derimot svært karakteristisk i gjennomfallende lys med en godt bevart kumulus-tekstur av bladlig antigorittisk aggregat-serpentin etter olivin in-situ. Se ellers ytterligere detaljer i kapittel 3.2 om bergartenes petrografi.



Figur 19 Mikroskopibilder av malm. a) Bilde av prøve SKJ 04-4 tatt under reflektert lys viser bravoittisert pentlanditt med krympesprekker, delvis omvandlet magnetkis og litt kobberkis (gul farge). b) Bilde av prøve SKJ 20 - 54 tatt under reflektert lys viser karakteristisk flamme-pentlanditt i magnetkis. Sekundær omvandling av magnetkis til limonitt langs korn grensene. c & d) Samme utsnitt tatt av prøve SKJ 20 - 38 viser kumulus-olivintekstur som gangart i malmen. Olivin har en omvandlingsrand av serpentin og magnetitt. cpy=kobberkis; pt=pentlanditt; po=magnetkis; lim=limonitt; ser=serpentin; mt=magnetitt; ol= olivin.

## 4.3 Malmkjemi

### 4.3.1 Metode

Malmanalysene er listet opp i Tabell 3 (se Vedlegg). Detaljer som gjelder analyselaboratorium, tidspunkt for analysene, analysemetoder, deteksjonsgrenser og akkrediteringsområder er gitt i tabellen.

Analysene er gjort ved tre forskjellige laboratorier som har anvendt ulike analysemetoder og ulik preparering og forbehandling (syreoppslutning) av prøvene som igjen kan gi ulike analyseresultater.



Ved *Aqua Regia leach* (kongevannssoppslutning, ACME 2004), som er en blanding av saltsyre pluss salpetersyre får man ved analysen selektivt fram bulksammensetningen av lettløselige mineraler som sulfider og spesielt en rekke sporelementer tilknyttet disse, mens store deler av silikat- og oksidmineralene i prøven ikke går i oppløsning og dermed ikke inngår i analyseresultatet, eller at analyseresultatene spesielt for silikatbundne elementer blir for lave i forhold til den totale kjemiske sammensetningen av prøven.

Ved *four acid leach* (ALS 20 12 2020), oppslutning i en blanding av fire sterke syrer: saltsyre, salpetersyre, perklorsyre og flussyre, er andelen av prøven som brytes ned og går i oppløsning før den instrumentelle delen av analysen relativt større enn ved kongevannssoppslutning, men likevel går ikke alle mineraler (særlig silikater og noen oksider) i løsnig. Det antas at denne metoden gir riktige analyseverdier for metallene som er bundet opp i sulfidmineralene i malmen.

Ved smelting av prøven forut for XRF-analyse (Kapitel 3.3.1) får man derimot totale analyseverdier for hovedelementene. Dette er den foretrukne metoden ved analyse av rene silikatbergarter. Er det imidlertid mye svovel i prøvene blir nikkilverdiene og til dels også koboltverdiene feil (for det meste noe for lave) på grunn av interferens. Dette er merket med røde verdier for Ni og Co i Tabell 3. Denne metode kan også gi for høye verdier for metallinnholdet i sulfidmalmer hvis metallene også er bundet i silikatmineraler.

Ulik *analytical finish* kan også gi ulike deteksjonsgrenser og nøyaktighet/reproduserbarhet ved analysene. Dette gjelder spesielt analysene av platina (Pt) og palladium (Pd) der både deteksjonsgrensene, men også gehaltene i malmen begge er lave.

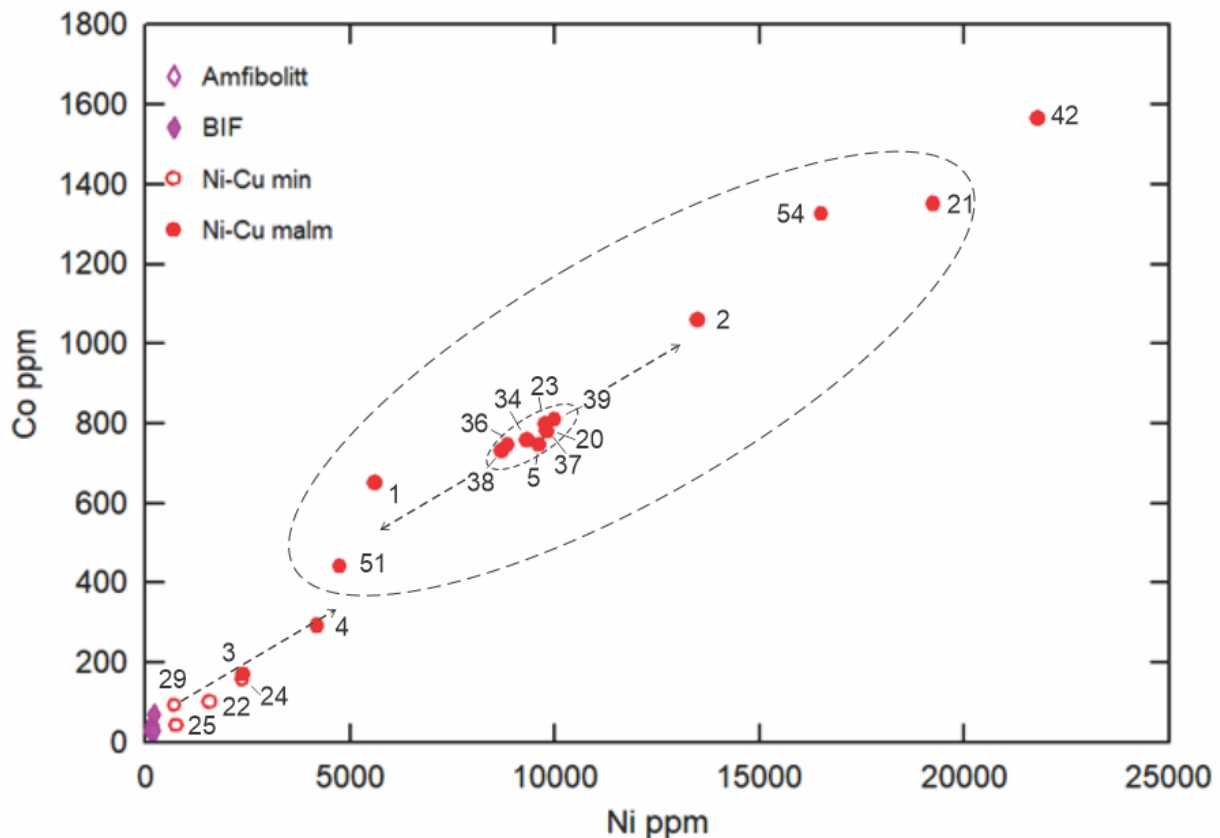
#### 4.3.2 Resultater

Sulfidene består av magnetkis med underordnede mengder pentlanditt og kobberkis. Magnetkis viser varierende grad av nedbrytning til såkalt *altered pyrrhotite* eller omvandlet magnetkis (Iyer 1990), mens pentlanditten omvandles til bravoitt ved svoveltilførsel fra den delvis svovel-utlutede magnetkisen.

Frisk, rik semi-massiv malm er definert kjemisk innenfor avgrensede felt spesielt med hensyn til innhold av både S, Se, Ni, Co og Cr i malmen, jfr. spesielt Figur 20 og Figur 21. Jern (Fe) viser ikke samme samling da Fe opptrer både i sulfid-, silikat- (olivin og kloritt) og oksidfase (magnetitt). Ved plotting av Ni/Co-verdiene (Figur 20) og S/Se-verdiene (Figur 21) sees at den semi-massive malmen er kjemisk veldefinert og plotter innenfor avgrensede intervaller.

Analysene viser en god samvariasjon i innholdet av Ni og Co i malmen (Figur 20). Dette skyldes at begge metaller sitter i ett og samme sulfidmineral, pentlanditt  $(Ni,Fe,Co)_7S_8$ . Ved økende Ni- og Co-innhold øker også sulfidinnholdet i prøvene. SKJ 20 - 29, - 22 og - 24 viser en stadig sterkere sulfidførende pyroksenitt som går gradvis over i en typisk olivinfri impregnasjonsmalm (SKJ 04 - 3 og - 4). Den går i sin tur over i en semi-massiv malm hvor Ni- og Co-verdiene for 8 prøver grupperer seg sammen med verdier rundt 1 % Ni og 800 ppm Co. Når den friske semi-massive malmen begynner å forvitte i dagen (sammenlign Fig. 17b med 17d) er det hoved-sulfidmineralet magnetkis som først starter å dekomponere og da ved en selektiv utlutning av svovelinnholdet i magnetkisen. Dette fører til en til dels sterk og rent sekundær anrikning i Ni og Co (SKJ 04 - 2, 20 - 54 og 12 - 21) ved at pentlanditt forblir stabil og uforvitret selv om magnetkis dekomponerer og gradvis brytes ned. Disse prøvene har alle mistet om lag halvparten av sitt opprinnelige svovelinnhold ved denne første del av nedbrytningen i overflaten. Ved fortsatt sulfidutlutning snur trenden brått og diametralt når også pentlanditt begynner å dekomponere (overgangen fra SKJ 04 - 2, 20 - 54 og 12 - 21 og til SKJ 04 - 1 og SKJ 20 - 51). I SKJ 04 - 1 og SKJ 20 - 51 er svovel-innholdet bare på hhv. ca. 34 % og ca. 18 % av det

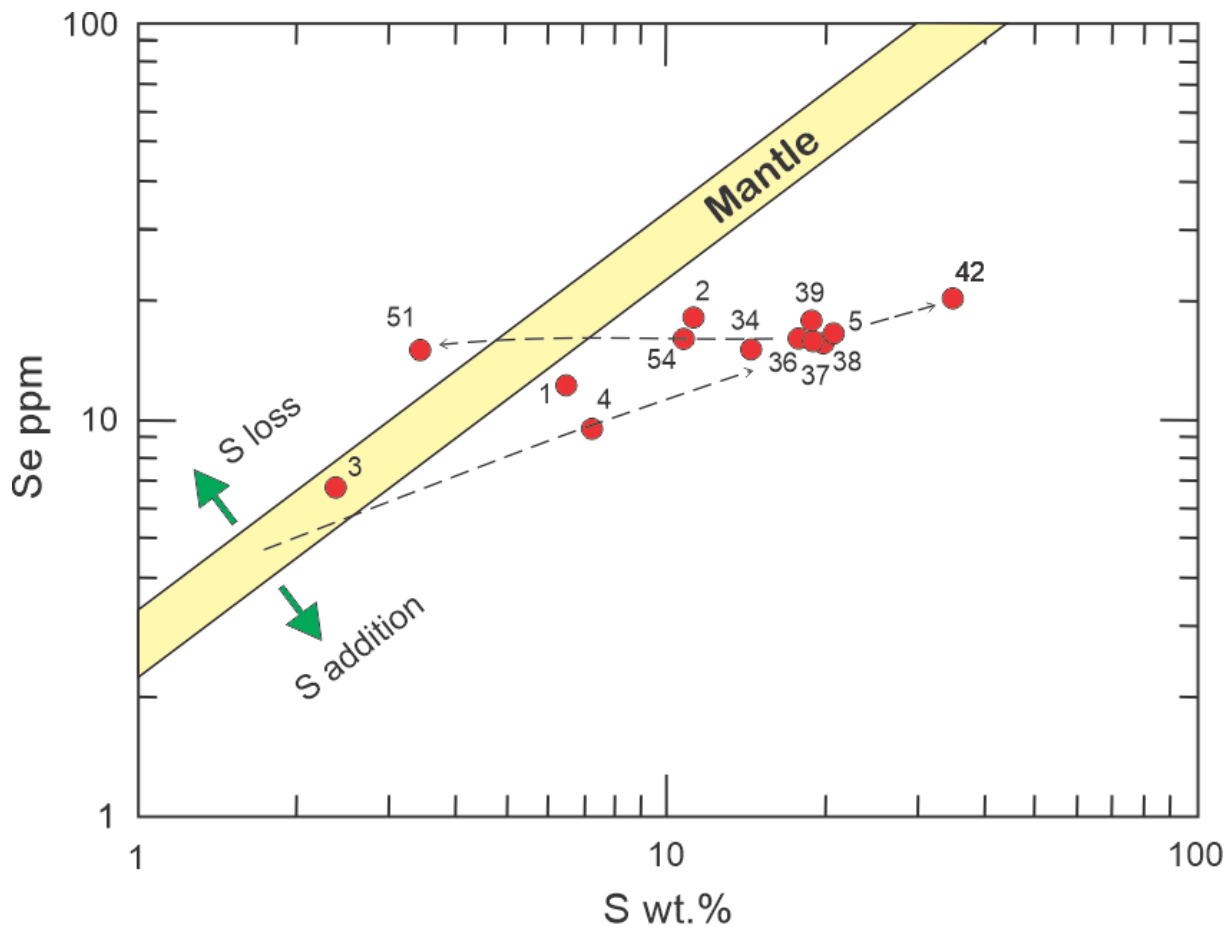
opprinnelige (Tabell 3). Til slutt utlutes all svovel i malm som ligger eksponert i overflaten og gehaltene av Ni og Co går da gradvis fra nivået i SKJ 20 - 51 ned mot null på figuren. SKJ 20 - 42 er en relativt frisk og meget ren sulfidmalm-linse (Fig. 17c) uten gangartssilikater, og det eneste som sees av omvandling er noen svake limonittreender (rustreender) i slipet. Analysen av SKJ 20 - 42 viser i praksis det øverste nivået for hvor høyt Ni- og Co-innholdet kan bli i frisk, uforvitret malm i Brattbakken intrusjonen med 2,2 % Ni og 1600 ppm Co. Rikere enn dette kan Brattbakken-malmen knapt bli i Ni og Co.



Figur 20 Nikkel-kobolt diagram som viser god samvariasjon mellom metallene i malmen. Pilene indikerer trender ved økende mineralisering og senere utluting av ulike sulfidmineraler. For nærmere forklaring, se teksten. Forkortede prøvenumre er angitt for å gi bedre lesbarhet av figuren. Grensen for Ni-Cu-Co mineralisering og Ni-Cu-Co malm er satt ved 2000 ppm Ni (0,2 % Ni).

Prøver med svovelinnehold og tilhørende seleninnhold som plottes innenfor det avlange gule feltet i diagrammet (Figur 21) har S og Se verdier på mantel-nivå. På oversiden av det gule feltet plottes prøver som har hatt et svovel-tap og på undersiden plottes prøver som har fått tilført eksternt svovel. Analyseresultatene viser en tydelig trend (vist med piler på diagrammet) fra svakt sulfidholdig pyroksenitt med mantel-verdier i SKJ 04 - 3 via impregnasjonsmalm i SKJ 04 - 4 til prøver av semi-massiv malm (gruppe med punkter med blant andre SKJ 04 - 5). Hoveddelen av malmen består av semi-massiv malm som plottes godt innenfor feltet for svovel-tilførsel. Dette indikerer tydelig at svovel er tilført fra en eksternt kilde. SKJ 20 - 42 er anomal med et S-innhold på 35 % og et Se-innhold på 20 ppm, som også sterkt indikerer eksternt tilført svovel. Det er også en sekundær trend fra semi-massiv malm (blant andre SKJ 04 - 5) nesten rett mot venstre via SKJ 04 - 2 og 20 - 54 til prøve SKJ 04 - 1 og 20 - 51. Denne er trenden ved svovelutlutningen av malmen som skjer uten noen tilsvarende sterkt fall i Se-verdier. Selen lutes altså ikke nevneverdig ut fra malmen ved svovel-utlutningen av

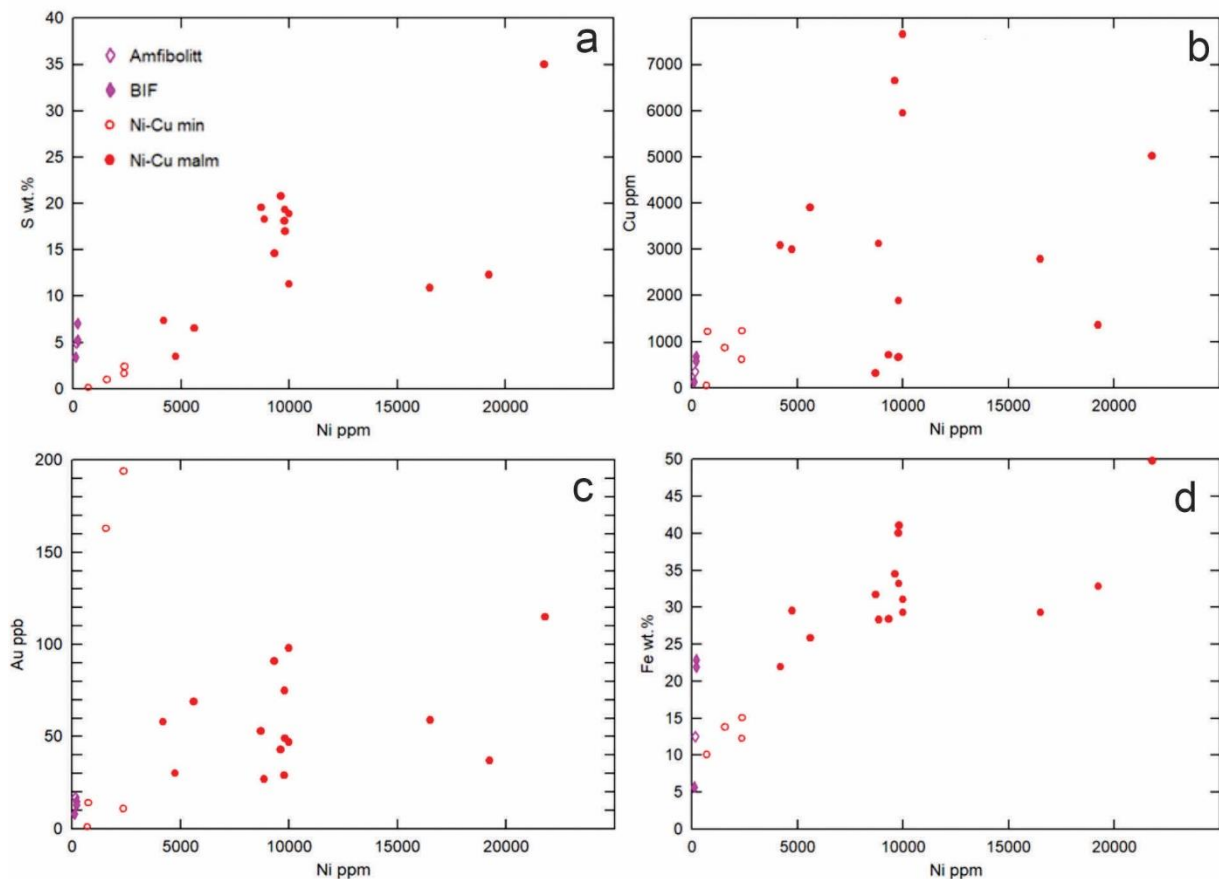
magnetkis. Det er imidlertid ikke undersøkt hvor Se sitter mineralogisk og hvorfor det ikke sees et tilsvarende og proporsjonalt fall i Se-verdiene ved dekomponeringen av sulfidene.



Figur 21 Svovel-selen diagram som viser S- og Se innhold i mantel (gult felt) og trender for ekstern tilførsel av svovel og senere utlating svovel. For nærmere forklaring, se teksten. Forkortede prøvenumre er angitt for å gi bedre lesbarhet av figuren. Grensen mellom Ni-Cu-Co mineralisering og Ni-Cu-Co malm er satt ved 2000 ppm Ni (0,2 % Ni).

Ni-S diagrammet (Figur 22a) viser også en tett samling av analyseverdier for semi-massiv malm innenfor avgrensede felt som ved S/Se og Ni/Co plottene. Tidlig selektiv utlating av magnetkis gir høye Ni-verdier ved fallende S-verdier (SKJ 04 - 2, 20 - 54 og 12-21) og utlating av både magnetkis og pentlanditt på et sent stadium gir fallende Ni- og S-verdier (SKJ 04 - 01 og 20 - 51). Disse siste verdiene blander seg med plotteverdiene for impregnasjonsmalmen (SKJ 04 - 3 og - 4).

Ni-Cu diagrammet (Figur 22b) viser en kompleks spredning av analyseverdiene. I tillegg til en sterk primær spredning av Cu-verdier fra 317 ppm (SKJ 20 - 38) til 6649 ppm (SKJ 04 - 5) ved tilnærmet samme Ni-verdi rundt  $\pm 1\%$  er det også her en tilsvarende sterk spredning av Ni- og Cu-verdiene på grunn av svovel-utlatingen. Prøver på et tidlig utlutningsstadium (SKJ 04 - 2, 20 - 54 og 12-21) plotter til høyre i diagrammet (til høyre for frisk malm rundt 1 % Ni), mens prøver på et sent utlutningsstadium (SKJ 04 - 01 og 20 - 51) plotter til venstre i diagrammet og blander seg med plotteverdiene for impregnasjonsmalm (særlig SKJ 04 - 4). Det er en selektiv mobilitet av kobberkis i forhold til magnetkis og pentlanditt som er årsaken til de sterke variasjonene i malmens Cu-innhold. Kobberkis er i en flytende/duktile fase lenge etter at magnetkis med pentlanditt har krystallisert og er derfor mobil. SKJ 12 - 23 og 20 - 36 som er tatt fra én og samme malmblokk (Fig. 17d) viser for eksempel betydelig forskjellige Cu-verdier med henholdsvis 662 og 3120 ppm Cu.



Figur 22 Plott av Ni mot utvalgte elementer. Grensen mellom Ni-Cu-Co mineralisering og Ni-Cu-Co malm er satt ved 2000 ppm Ni (0,2 % Ni).

Ni-Au diagrammet (Figur 22c) viser at det generelt er lavt innhold av gull i Ni-Cu-Co mineraliseringene ( $\leq 200$  ppb Au). Anrikningene av gull er tilsynelatende uavhengig av Ni-gehaltene, og også uavhengig av Cu-gehaltene i de sulfidholdige pyroksenitt-prøvene SKJ 04 - 3 og 12 - 22. En relativt stor ansamling av ren kobberkis som antas å være kilden eller vertsfasen til den kombinerte Pt-Au anrikningen, finnes i slippet av prøve SKJ 04 - 3. Det er generelt en svak trend hvor økende Au-verdier følger økende Ni-verdier, men selv ikke SKJ 20 - 42 fra den massive sulfidlinsen inneholder mer enn 115 ppb Au.

Ni-Fe diagrammet (Figur 22d) viser også samling av analyseverdier omkring 1 % Ni, men reduksjoner i Fe-innholdet er ikke like tydelig ved utluting av magnetkis og økende Ni-verdier. Fe-innholdet avtar imidlertid tydelig ved utluting av både magnetkis og pentlanditt.

Analysene indikerer at bare i SKJ 04 - 3 er det mulig å finne platina-gruppe mineraler (PGM) i malmen. Det lille enkeltkornet som ble lokalisert i slip av SKJ 20 - 38 kan mulig være et PGM, selv om Pt-verdien i bulkanalysen av malmen med  $< 5$  ppb indikerer noe helt annet. Ved verdier under 5 ppb av et element er det sjelden man finner mineraler med nettopp dette elementet som hovedkomponent. Derfor blir det spennende å «jakte på» sjeldne mineraler i malmen når nå NGU snart får en operativ SEM. I tillegg er det viktig å få fastslått den nøyaktige sammensetningen både av magnetkis og pentlanditt samt også delvis utlutet magnetkis og bravoitt.

## 5 GEOFYSISKE MÅLINGER – DATA

### 5.1 Helikoptermålinger

Tidligere på sommeren gjennomførte NGU geofysiske målinger fra helikopter over et ca. 600 km<sup>2</sup> stort område innenfor Verdal og Snåsa kommuner som blant annet også dekker Skjækerdalen med Brattbakken-intrusjonen (Ofstad m.fl. 2021). Det ble utført magnetiske målinger, elektromagnetiske motstandsmålinger samt radiometriske målinger. Foreløpige prosesserte måleresultater ble benyttet i felt og i videre bearbeiding av feltobservasjonene. Resultatene fra helikoptermålingene supplerer bakkemålingene og setter disse inn i et regional sammenheng (Figur 3).

### 5.2 Gravimetriske målinger

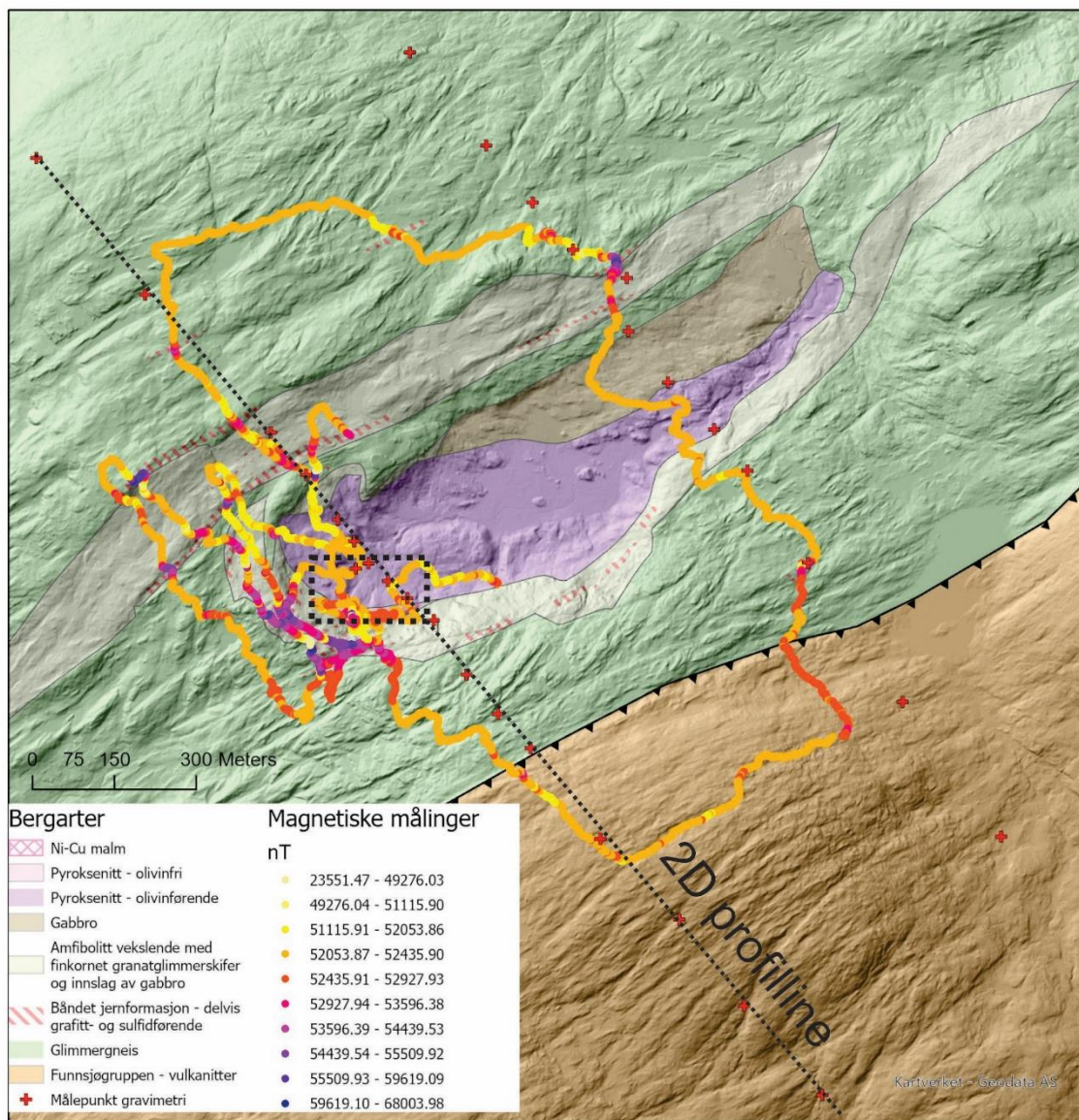
Gravimetriske målinger på bakken er utført langs to profiler på tvers av bergartenes strøkretning i Brattbakken-området. Hensikten var å se om gravimetriske måledata kunne indikere dypet og størrelsen av Ni-mineraliseringene og dens vertsbergarter (Figur 23).

Med gravimetri måles tiltrekningskraften til jordas sentrum. Denne kraften er avhengig av massen under måleinstrumentet (gravimeteret) som igjen er avhengig av bergartenes tetthet. En kan på denne måten kartlegge variasjoner i berggrunnens tetthet som vil være et hjelpemiddel i geologisk modellering og kartlegging. Store tunge kroppar (f.eks. en malm) vil kunne indikeres med slike målinger dersom masseoverskuddet er stort nok. En tyngdeanomali svekkes med dypet, og det kreves nøyaktig modellering og god kjennskap til omliggende geologi for å kunne indikere dypet på legemet. For å få frem eventuelle anomalier må det gjøres omfattende korreksjoner for høyde over havet, breddegrad, overliggende masse og terreng (nærliggende store masser). Den mest usikre korreksjonen er terrengkorreksjon og denne krever nøyaktige digitale høydemodeller.

Det ble målt to profiler med lengder 2,3 og 1,8 km i området øst for Brattbakken – Tverrvola (Figur 23). Målepunktavstand varierer mellom ca. 50, 200 og 300 meter og med minst avstand over Ni-forekomsten. Scintrex CG-5 gravimeter som har en teoretisk oppløsning på 0.001 mGal ble brukt (Scintrex 2019). Nøyaktigheten i måleverdiene er imidlertid i hovedsak bestemt av høydekorreksjoner, dvs. hvor mye terrenget varierer rundt målepunktene. Instrumentet måler bare variasjoner i tyngdefeltet mellom stasjoner. For å bestemme tyngdefeltets absolutte verdi i målefeltet, ble målingene knyttet til Kartverkets tyngdestasjon på NGU (NGU AB). For kontroll av instrumentets drift ble ett fast punkt målt morgen og kveld ved teltleiren i måleområdet.

Posisjon og høyde over havet er bestemt ved bruk av differensiell GPS. Det ble etablert en basestasjon på ett punkt i måleområdet. Høyde over havet og koordinatene bestemmes med stor nøyaktighet (cm-nivå). Både ved basestasjonen og ved de mobile målingene ble instrumentet Topcon Legacy E benyttet (Topcon 2019). Nøyaktigheten i posisjon og høyde regnes til å være bedre enn 10 cm i observasjonspunktene.

De målte tyngdedata er korrigerert for daglig drift og for friluftseffekten (stativhøyde over bakken). Ved beregning av Bougueranomali, er det benyttet programvare fra Geosoft, Oasis montaj Version 9.7.1. Gravity and Terrain Correction (Geosoft Inc. 2018). Tetthet på 2670 kg/m<sup>3</sup> ble brukt til Bouguer- og terrengkorreksjon. Terrengkorreksjon ble utført ved å bruke digitale terrengdata fra Kartverket. Absolutt tyngde, korreksjoner og Bougueranomali referer seg til IGSN71-systemet, og observert tyngde, korreksjonsverdier og Bougueranomali er angitt i mGal.



Figur 23 Kart over Brattbakken-området som viser geofysiske målepunkter. Røde kryss viser gravimetrisk målepunkt langs to NNW-SSE orienterte profiler. De magnetiske målepunktene er fargekodet etter susceptibilitet og ligger så tett at de ser ut som sammenhengende linjer. Stiplet linje viser hvor modellering og tolkning vist i Figur 25. Stiplet rektangel viser areal for Figur 26.

### 5.3 Magnetiske bakkemålinger

Det er utført magnetiske bakkemålinger over Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene (Figur 23). Resultatene ble brukt under feltkartleggingen og deretter til modellering av bergartenes fordeling mot dypet (Mrope m.fl. 2021).

Magnetiske målinger utnytter det jordmagnetiske feltet, og er en enkel og rimelig geofysisk målemetode. Bergarter og malmer magnetiseres i større eller mindre grad av det jordmagnetiske feltet og gir derfor forstyrrelser, anomalier, i dette feltet og gir derfor et bilde av variasjonene i de magnetiske egenskapene til ulike bergarter. Bergarter som inneholder betydelige mengder magnetitt (jernoksid) og/eller magnetkis (jernsulfid) gir kraftige magnetiske anomalier, men også mindre variasjoner i bergartenes magnetiske egenskaper er til stor nytte ved berggrunnskartlegging.

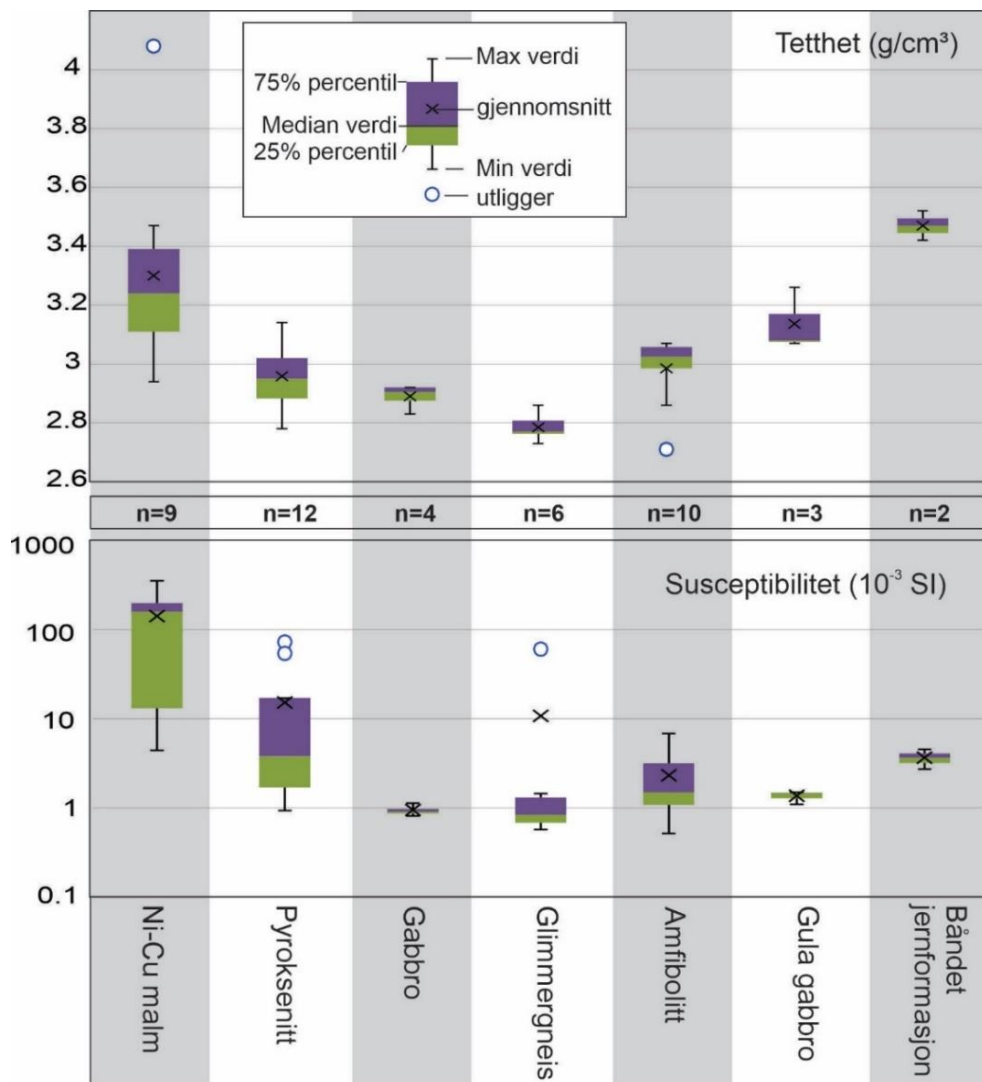
De magnetiske data ble innsamlet ved bruk av GEM GSM -19 magnetometer med en teoretisk nøyaktighet på  $\pm 0.2$  nT. Magnetometeret ble koblet til en GPS og montert på en bæremeis, og kontinuerlig målinger ble foretatt til fots. Det ble ikke benyttet et basemagnetometer som måler variasjoner i magnetfelt gjennom måleperioden, men nøyaktigheten på resultatene antas være tilstrekkelig etter behovet.

Totalt ble det utført magnetiske målinger over en lengde på ca. 11,3 km (Figur 23). De to lengste profilene fulgte tilnærmet de to gravimetrisk profilene som ble målt på tvers av bergartenes strøkretning, men de ble ikke målt like langt (Kapitel 5.1). De magnetiske profilene ble i tillegg knyttet sammen langs strøket. Mere detaljerte målinger ble foretatt over jernhatten med Ni-Cu-Co malmen og i sidebergartene vest og sør for denne hvor variasjonene i de magnetiske egenskapene er størst.

De magnetiske målingene over Ni-Cu-Co malmen gir svært store variasjoner over svært korte avstander; i meterskala og viser at de magnetiske egenskapene til mineraliseringene varierer sterkt. Vest og sørvest for jernhatten er det de båndete jernformasjoner som gir de sterkeste magnetiske anomaliene over to soner med bredde på ca. 40-50 m. Dette skyldes at flere lag med jernformasjoner som inneholder magnetkis opptrer sammen. De enkelte lag av jernformasjon er trolig ikke mer enn 1-10 m mektige (Figur 4). Flere lag med jernformasjoner som i hovedsak er tilknyttet sonene med amfibolitt ble også registrert både nord og sør for intrusjonen. Bredden på disse anomaliene er omkring 5-20 m. I tillegg finnes også magnetittrike soner i amfibolitten. Glimmergneisen gir generelt lave til moderate magnetiske utslag, mens de laveste verdiene er målt over umineralisert pyroksenitt og gabbro innenfor Brattbakken-intrusjonen. Verdiene over intrusjonen er jevnt lave, og dette samsvarer med resultatene fra de geofysiske helikoptermålingene som viser en negativ anomali over den (Ofstad m.fl. under arbeid). Bakkemålingene gir imidlertid langt bedre oppløsning på anomaliene enn de regionale målingene.

#### **5.4 Petrofysisk analyse av bergartsprøver**

46 innsamlede bergartsprøver ble testet ved NGU laboratorium for magnetisk susceptibilitet og tetthet. Resultatene fra disse målingene ble kombinert med målingene fra bakkegeofysikk for videre geofysisk modellering. Figur 24 viser at bergartene har karakteristiske petrofysiske egenskaper. Både Ni-Cu-Co malm og båndet jernformasjon har relativt høy tetthet og er sterkt magnetisk.



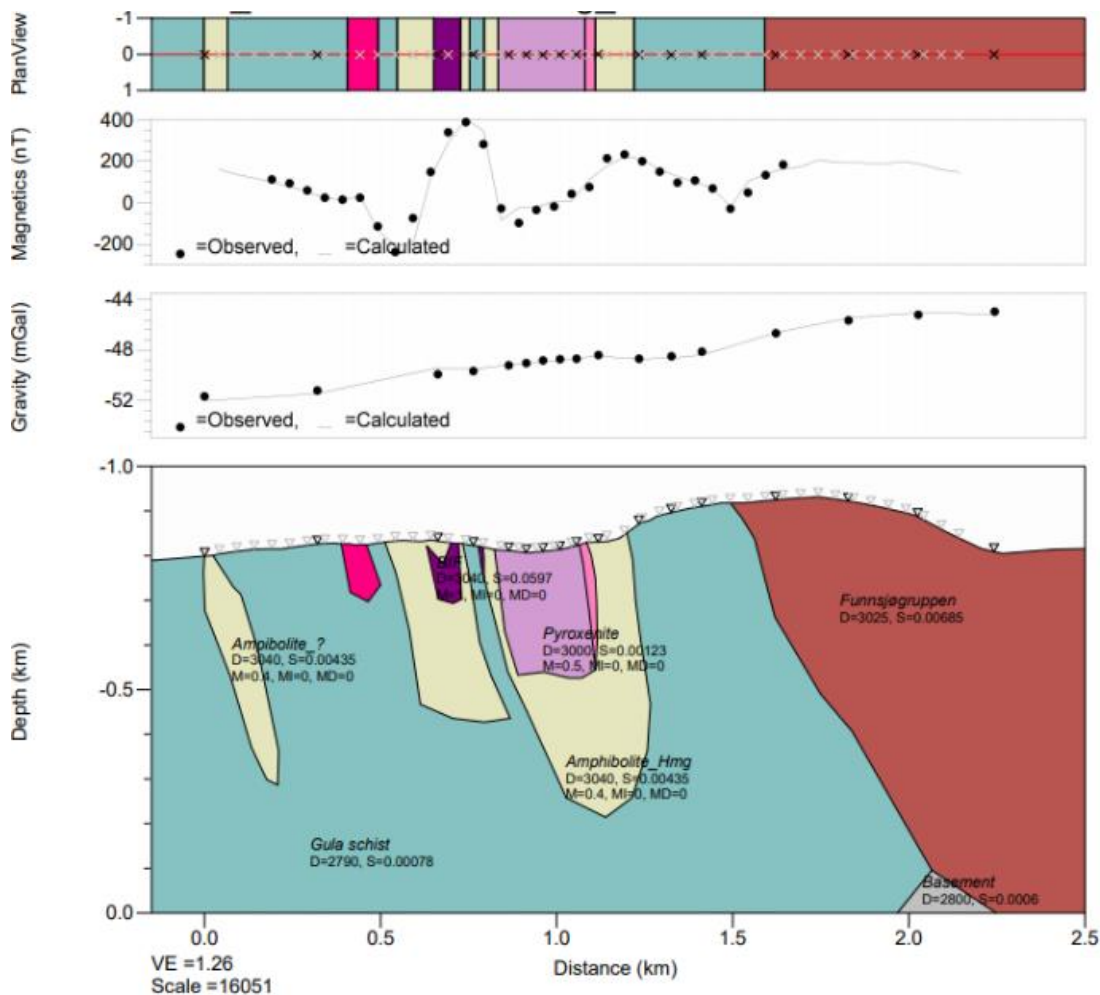
Figur 24 Petrofysiske resultater fra innsamlede prøver gruppert etter bergartstype. Øverste diagram viser tetthet (g/cm<sup>3</sup>). Nederste diagram viser magnetisk susceptibilitet (10<sup>-3</sup> SI) på log-skala. n= antall prøver analysert.



## 6 GEOFYSISK MODELLERING OG TOLKNING

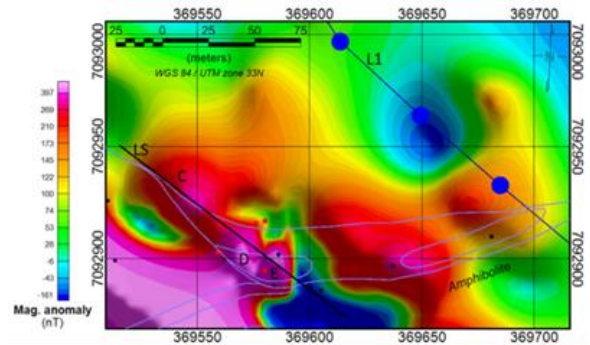
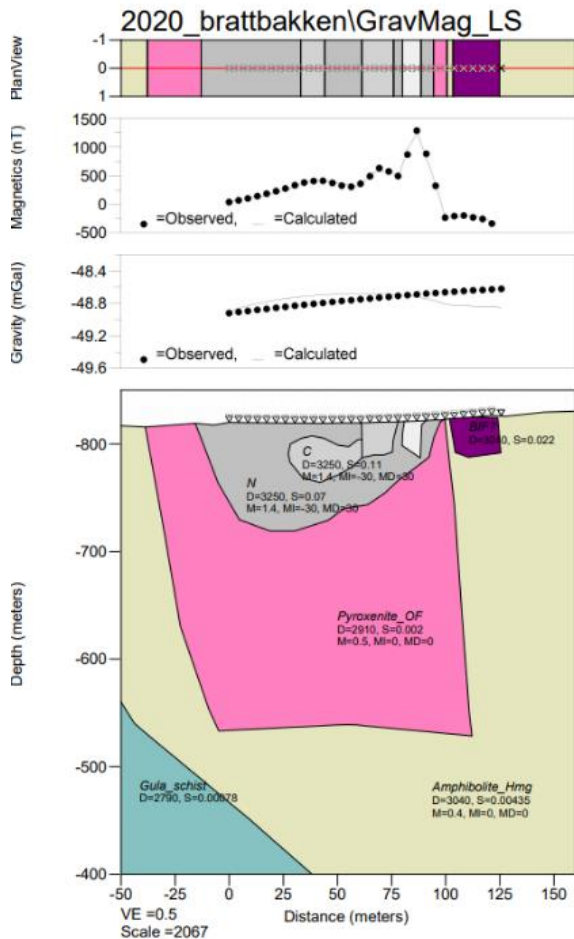
Denne beskrivelsen er et utdrag av Mrope m.fl. (2021) sin rapport som omhandler tolkning og modellering av resultatene fra de geofysiske målingene som ble utført i Brattbakken-området i 2020. Datagrunnlaget består av gravimetrisk, magnetisk og petrofysiske data av bergartsprøver beskrevet i Kapittel 5.2-5.4 samt kartlagte bergartsgrenser. Tolkningen omfatter 2D modellering (*forward modelling*) av gravimetrisk og magnetisk data og 3D VOXI inversjon av magnetisk data. For detaljer om dataprosessering, tolkning og konklusjoner henvises til fagrapporten (Mrope m.fl. 2021). Hensikten med arbeidet er å få bedre kunnskap om bergartenes og Ni-Cu-Co malmens utbredelse mot dypet under dagen.

2D modellering av magnetisk og gravimetrisk data er utført langs profiler som følger de to profilene med gravimetrisk måling (Figur 23). Resultatene indikerer at Brattbakken-intrusjonen er 260 m bred og opptil 270 m dyp under overflaten i vest når det antas at amfibolitt fra sidebergartene omslutter intrusjonen (Mrope m.fl. 2021) (Figur 25). Langs profilet i øst, hvor intrusjonen består av både pyroksenitt og gabbro er den 215 m bred og bare opptil 120 m dyp under overflaten.



Figur 25 2D profil over Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene langs profillinjen vest i intrusjonen. Triangler på overflaten av modellen viser lokaliteter for gravimetrisk målestasjoner (svart) og magnetiske målinger (grå). De gravimetrisk og magnetisk profiler i midten viser beregnede data (heltrukne linjer) som passer til de observerte data (punkter). Det horisontale overflate-bilde er et snitt ved 750 m over havnivå. Merk at lengden på vertikal akse er 1,26x i forhold til horisontal akse.

Geofysisk modellering (Mrope m. fl. 2021) over malmsoneområdene foreslår at malmsone strekker seg 100 til 175 m nordvestover fra utgående langs jernhatt-området. Denne tolkning er basert på at det oppnås god tilpasning mellom målte magnetiske verdier og beregnede verdier for malmsone med varierende susceptibilitetsverdier og mineralisering. Modellen antar en rik malmsone med høye susceptibilitetsverdier nær overflaten og avtagende mineralisering og susceptibilitetsverdier mot dyppet og nordvestover.



Figur 26 2D profil over malmsone i Brattbakken langs profil LS. De gravimetriske og magnetiske profiler i midten viser beregnede data (heltrukne linjer) som passer til de observerte data (punkter). Det horisontale overflate-bilde er et snitt ved 805 m over havnivå. Malmsone er vist med ulike gråtoner og antas å være 125 m bred langs dette profilet i NV-SØ retning. Merk at lengden på vertikal akse er 0,5x i forhold til horisontal akse. For detaljer om modelleringen se Mrope m.fl. (2021). Til høyre er plasseringen av LS vist på kartet over magnetiske data. Jernhatt-platået ligger ved punkt E.

## 7 DISKUSJON

Undersøkelsene i 2020 viser at berggrunnen i Brattbakken-området er mer variert enn det som framgår av resultatene fra de tidligere en-dags befaringsene. Alle bergartene tilhører Gulakomplekset. Brattbakken-intrusjonen er en bimodal ultramafisk-mafisk linseformet intrusjon som opptrer konformt med sidebergartene. Sidebergartene består i hovedsak av glimmergneis, og fører i tillegg lag og linser av amfibolitt, gabbro og jernformasjon. Kjemiske analyser og mikroskopiske undersøkelser viser at Brattbakken-intrusjonen og magmatiske sidebergarter (Gulakompleksets amfibolitt og gabbro) er dannet fra ulike magmatiske smelte. Gulakompleksets amfibolitt og gabbro kan opprinnelig være dannet fra basaltisk smelte langs havbunns-spredning eller spredningsbasseng bak en øybue, mens Brattbakken-intrusjonen trolig er dannet fra smelte med mere skorpeinnblanding. Dette er i motsetning til Nilsen (1974) som mener at de ultramafiske dypbergartene, som dels fører Ni-Cu-Co mineraliseringer, og amfibolittene i Gulakomplekset i Kvikneområdet er co-genetiske og dannet fra samme magmatiske kilde. Thompson m.fl. (1980) har studert Vakkerlien Ni-Cu-Co forekomst på Kvikne og støtter heller ikke Nilsens tolkning, og hevder også at dypbergartene i Gulakomplekset har ulike opprinnelse. Hvis amfibolittene i sidebergartene er tidlig-ordoviciske ( $\leq 485$  millioner år) og Brattbakken-intrusjonen er silurisk (440-430 millioner år), som de fleste større intrusjonene i Gulakomplekset (Nilsen m.fl. 2007), kan aldersforskjellen være omkring 50 millioner år.

Brattbakken-intrusjonen er en bimodal ultramafisk-mafisk intrusjon som består av pyroksenitt i SV og gabbro i NØ. Den ultramafiske delen utgjør i overflaten 60-65 % av det totale arealet av intrusjonen, og dette er en relativt stor andel ved sammenligning av andre Ni-Cu-Co mineraliserte intrusjoner i Gulakomplekset som for eksempel Dyrhaugen i Skjækerdalen (Hildreth 1997, Hildreth m.fl. 2001) og Vakkerlien på Kvikne (Thompson m.fl. 1980). Sammenhengen mellom pyroksenitt og gabbro kan diskuteres. Kjemiske analyser av olivinførende pyroksenitt og gabbro indikerer en magmatisk differensiasjonstrend (se Kapittel 3.3). Sammensetningen av olivinfri pyroksenitt avviker fra den magmatiske differensiasjonstrenden, og det kan skyldes innblanding/assimilering av sidebergartene i magma. Sammenligning med tolkninger av utviklingen av Dyrhaugen-intrusjonen (Hildreth 1997, Hildreth m.fl. 2001) kan imidlertid antyde to tilsynelatende uavhengige magmatiske pulser av henholdsvis gabbro og pyroksenitt da verken petrografiske eller mineralogiske mellomledd av de to hovedbergartene er påvist.

En innblanding av sidebergartene har trolig hatt stor betydning for dannelsen av Ni-Cu-Co malmen. Det er nødvendig med sulfidmetning av magma for at Ni-Cu-Co mineraliseringer kan dannes (Naldrett 2004). Assimilering av sulfidførende jernformasjon og amfibolitt i sidebergartene kan ha sørget for tilførsel av svovel og sulfidmetning i Brattbakken. En tydelig indikasjon på dette framkommer av S/Se diagrammet (Figur 21). Det er en tydelig utvikling av S/Se-forholdet fra pyroksenitt med karakteristisk mantel-nivå via gradvis rikere impregnasjonsmalm til semi-massiv malm med en sterk samling av analyseverdiene godt innenfor den delen av diagrammet som kjennetegnes ved svovel-tilførsel (S addition).

Det er en meget tydelig kumulat-dannelse sammen med rikmalmen, og det er mulig det har vært en akkumulering av kumulat-olivin i magmakammeret som i tid og rom faller sammen med akkumulering av sulfider etter sulfidmetning i intrusjonen på grunn av assimilasjon av jernformasjon og amfibolitt. Karakteristiske og relativt finkornete kumulater som viser en euhedral kumulat-olivin og interkumulat ortopyroksen/klinopyroksen fins ikke utenom malmsonen. Kumulusteksturen avtar gradvis fra den semi-massive malmen mot impregnasjonsmalmen. Dette sees ikke i felt, men ved å studere og sammenligne alle de innsamlede prøvene under ett. De to mest karakteristiske

overgangsprøvene er SKJ 20 - 54 med et relativt lavt sulfidinnhold, men likevel med tendens til et sammenhengende sulfidnett og SKJ 04 - 4 som er en rik impregnasjonsmalm.

Det er ingen systematisk sammenheng mellom sulfidinnholdet i malmen og graden av serpentinisering av gangarts-olivin. Noen få prøver har en svært lite omvandlet olivin (SKJ 12 - 20 og særlig SKJ 20 - 54), mens de fleste prøvene viser en sterkt omvandlet eller totalt serpentinisert olivin. Når kumulus-olivinen er sterkt serpentinisert er den assosierte interkumulus-fasen også alltid sterkt klorittisert (klorittisert fra ortopyroksen eller klinopyroksen). Helt unntaksvis går kumulus-fasen (serpentin) og interkumulus-fasen (kloritt) over i hverandre (SKJ 20 - 34). Denne hydrotermale omvandlingen har derfor foregått romlig ujevnt innenfor malmsonen akkurat som den har foregått romlig ujevnt også innenfor pyroksenitt og gabbro. Det er ingen umiddelbare ledetråder til å forstå akkurat hvordan den hydrotermale omvandlingen har skjedd. Den har i hvert fall skjedd lenge før overflateforvitringen av malmen.

På overflaten dekker Ni-Cu-Co malmen et areal på 870 m<sup>2</sup>, og den inneholder i gjennomsnitt 1,2 % Ni og 0,38 % Cu og 0,086 % Co med egenvekt/tetthet på ca. 3,4 t/m<sup>3</sup> (beregnet gjennomsnitt av 9 prøver: 2-5-34-36-37-38-39-42-54, se Tabell 3). Den totale lengden på malmsonen utgjør ca. 150 m og hvis det antas malmen fortsetter med samme areal ned til et dyp av 100 m blir total anslått mengde malm;

$870 \text{ m}^2 \times 3,4 \text{ t/m}^3 \times 100 \text{ m} = 295.800 \text{ t malm med } 1,2 \% \text{ Ni, } 0,38 \% \text{ Cu og } 0,086 \% \text{ Co.}$

Det eksisterer flere malmberegninger fra Vakkerlien som er den største, kjente Ni-Cu-Co forekomsten i Gulakomplekset på Kvikne. Det kanadiske selskapet Playfair Mining Ltd oppgir malmberegning på 400.000 tonn med 1,0 % Ni og 0,4 % Cu (<https://www.playfairmining.com/>). Disse beregningene er basert på 109 borekjerne hull som ble boret av Falconbridge/Sulfidmalm på slutten av 1970-tallet. Både mengde og metallinnhold er dermed tilsvarende for disse to Ni-Cu-Co forekomstene i Gulakomplekset.

En alternativ tolkning av volumet malmsonen vil være å ta utgangspunkt i den geofysiske modelleringen som antyder et areal med lengder ca. 100 til 175 m NV-SØ og tilsvarende lengder NØ-SV ned til et dyp av opptil 100 m (Mrope m.fl. 2021). Dette vil medføre et betydelig større volum på malmsonen, men samtidig kanskje med noe varierende gehalt. Malmsonen ser imidlertid ut til å være relativt motstandsdyktig mot erosjon, jernhatt-platået står fram som en hylle (Figur 5), men terrenget skråner brått nedover mot nordvest og indikerer ikke at malmsonen fortsetter i den retningen. Tilpasningen mellom målte og beregnede magnetiske verdier (Figur 26) kan alternativt skyldes variasjoner i magnetisk susceptibilitet i pyroksenitten. Dette kan imidlertid ikke bestemmes nærmere uten ytterligere geofysiske målinger eller kjerneboring.

## 8 KONKLUSJON

Feltundersøkelser med detaljkartlegging, prøvetaking og geofysiske bakkemålinger av Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene ble utført i september 2020, og videre bearbeiding av innsamlet materiale og geofysiske data ble utført høsten 2020 og våren 2021.

Bergartene i det undersøkte området tilhører Gulakomplekset. Ni-Cu-Co forekomsten ligger i Brattbakken-intrusjonen som er en bimodal ultramafisk-mafisk linseformet intrusjon som består av omdannet pyroksenitt og gabbro. Den opptrer konformt med sidebergartene som er en heterogen lagpakke med glimmergneis, amfibolitt, gabbro og tynne bånd av sulfidførende jernformasjon. Den kjemiske sammensetningen av de magmatiske mafiske og ultramafiske bergartene fra Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene viser at de trolig er dannet fra ulik magmatisk smelte.

Forekomsten i Brattbakken-intrusjonen opptrer dels som impregnasjonsmalm og dels som semi-massiv nett-tekstur malm med jevnt over 40 – 60 % sulfider i et sammenhengende nettverk dominert av magnetkis og med en ikke-sammenhengende gangart av varierende omvandlet kumulus-olivin og interkumulus-orto-/klinopyroksen. Malmen er nærmest omgitt av en omvandlet olivinfri og ortopyroksenfattig pyroksenitt. Utenfor sonen med olivinfri pyroksenitt opptrer hovedmassen av omvandlet olivinførende, ofte ortopyroksenrik pyroksenitt og lengst i nord opptrer en massiv, leukokratisk gabbro.

Malmen i Brattbakken-intrusjonen tolkes å være dannet ved en assimilering av sulfidførende sidebergarter (jernformasjon, amfibolitt og gabbro) som har vært gunstig og nødvendig for at Brattbakken-magmaet skulle bli mettet på svovel og sulfidene kunne dannes, for deretter å synke i magmakammeret og samle seg i en malmineralisering.

Ni-Cu-Co forekomsten danner på overflaten øst-vest orienterte, uregelmessige linsler sørvest i Brattbakken-intrusjonen. Forekomsten har et gjennomsnittlig innhold av 1,2 % Ni, 0,38 % Cu og 0,086 % Co og er sammenlignbar i gehalt og sannsynligvis også i størrelse med den godt undersøkte Vakkerlien Ni-Cu-Co forekomsten på Kvikne som også ligger i den samme geologiske hovedenhet Gulakomplekset.

Ved å forstå Brattbakken-intrusjonen med malmen, samt også de umiddelbare sidebergartene bedre, vil også den generelle kunnskapen om Gulakomplekset øke og dermed den mer generelle geologiske forståelsen av hele Trondheimsfeltet.

## 9 ANBEFALINGER

Detaljert geologisk kartlegging og undersøkelser av Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene med vekt på:

- Bestemme grenseforholdene mellom olivinførende, olivinfri og Ni-Cu-Co mineralisert pyroksenitt, og mellom Brattbakken-intrusjonens pyroksenitt og gabbro.
- Bedre bestemme mektighet og utstrekning av amfibolitt, gabbro og jernformasjon i sidebergartene og deres grenseforhold til Brattbakken-intrusjonen.
- Detaljert strukturgeologisk kartlegging for å klargjøre intrusjonens forhold til deformasjonshistorien.
- Isotop- og mineralkemiske analyser av Brattbakken-intrusjonen og sidebergartene for å bestemme dannelsesmiljø for Ni-Cu-Co mineraliseringene, verts- og sidebergartene.
- Analyser av et utvalg av de friskeste malmprøvene på alle platina-gruppeelementene (Os, Ir, Ru, Rh, Pt og Pd) kan bidra til å gi en bedre forståelse for malmdannelsen.

Detaljerte geofysiske målinger:

- Elektrisk målinger på bakken (CP, SP og/eller IP) for bedre å bestemme malmens utstrekning under overflaten.
- Magnetiske målinger med bruk av drone til bruk ved revidert modellering av malmen og bergartene i 3D.

Resultatene av undersøkelsen indikerer at malmkroppen ikke er svært stor mot dypet.

Kjerneboringer anbefales derfor ikke, men en ny vurdering bør imidlertid gjøres på grunnlag av resultater fra eventuelle oppfølgende undersøkelser.

Brattbakken-området er relativt godt blottet i forhold til andre områder med kjente Ni-Cu mineraliseringer innenfor Gulakomplekset og er derfor velegnet for mer detaljerte studier for å få bedre kunnskap om denne mineraliseringstypen innenfor komplekset. Dette kan være til nytte ved videre undersøkelser av de kjente forekomstene og ved prospektering innenfor Gulakomplekset. I den sammenheng anbefales det å gjøre en mer omfattende og detaljert geologisk og geofysisk tolkning av hele det nylig helikoptermålte området i Verdal og sydlige Snåsa (Ofstad m. fl. 2021).

## REFERANSER

- Corfu, F. m.fl. 2014: The Scandinavian Caledonides: main features, conceptual advances and critical questions. I: Corfu, F., Gasser, D. & Chew, D. M. (red): *New Perspectives on the Caledonides of Scandinavia and Related Areas. Geological Society, London, Special Publications, 390.*
- Engvik, A. K., m.fl. 2014: Metamorphic constraints on the Caledonian Upper Allochthon of Central Norway: the Gula Complex staurolite–garnet–kyanite mica schist. I: Corfu, F., Gasser, D. & Chew, D. M. (red): *New Perspectives on the Caledonides of Scandinavia and Related Areas. Geological Society, London, Special Publications, 390.*
- Foslie, S. 1959: Geologisk kart Jævsjø, M 1:100000. Norges geologiske undersøkelse.
- Grenne, T. m.fl. 2008: From Hyllestad to Selbu: Norwegian millstone quarrying through 1300 years, in: Slagstad, T. (Ed.), Special publication 11. Geological survey of Norway, pp. 47-66.
- Grenne, T. & Sveian, H. 2019: På stein og sti. NGU TEMA 2, Norges geologiske undersøkelse, 129 s.
- Hildreth, S.C. 1997: Assessment of the genesis of Ni-Cu-PGE mineralisation in the Skjækerdalen metagabbro-metadiorite, Norway. Ph. D. Thesis, Univ. of South Carolina, 188 s.
- Hildreth, S.C. m.fl. 2001: Genesis of Ni-Cu sulphide ore at the Skjækerdalen intrusive complex, central Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift v. 81, pp 49-58.*
- Ixer, R.A. 1990: Atlas of opaque and ore minerals in their associations. Open university press, Milton Keynes, 208 s.
- Le Maitre, R.W. (ed) 1989: A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks.
- Meschede, M., 1986, A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram: *Chemical Geology*, v. 56, p. 207-218.
- Mrope, F.M. m.fl. 2021: Processing and interpretation of Magnetic and Gravity data from Brattbakken, Verdalen municipality, Trøndelag. NGU Report 2021.017, 43 s.
- Naldrett, A.J. 2004: Magmatic sulphide deposits – geology, geochemistry and exploration, *Springer*, 727 s.
- Nilsen, O. 1974: Mafic and ultramafic inclusions from the initial (Cambrian?) volcanism in the central Trondheim Region, Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, Vol. 54, s. 337-359.
- Nilsen, O. 1978. Caledonian sulphide deposits and minor iron-formations from the Southern Trondheim Region, Norway. *Norges geologiske undersøkelse Bulletin*, 340, s. 35–85.
- Nilsen, O. m.fl. 2007: Silurian gabbro-diorite-trondhemite plutons in the Trondheim Nappe Complex, Caledonides, Norway: petrology and U-Pb geochronology. *Norwegian Journal of Geology*, vol. 87, pp. 329-342.
- Nilsen, O. & Wolff, F. C. 1989. Røros og Sveg. Berggrunnskart 1:250 000. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
- Nilsson, L.P. & Ihlen, P.M. 2019: Undersøkelse av nikkel-(kobolt) potensialet i mantelperidotitter i Velfjord – Tosen området, Brønnøy kommune, Nordland – en foreløpig rapport. NGU rapport 2019.015, 50 s.

- Ofstad, F. m.fl. 2021: Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey in Verdal and Snåsa, Trøndelag County. NGU Report 2021.013.
- Pearce, J.A. 2008: Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100, 14-48.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R. 1973: Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19, 290-300.
- Roberts, D. 2013: Berggrunnskart SNÅSA 1823 III, M 1:50 000, foreløpig utgave. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
- Sun, S.-S. and McDonough, W.F. 1989: Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, *Special Publications*, 42, 313-345.
- Thompson, J.P.H. m.fl. 1980: The geology of the Vakkerlien nickel prospect, Kvikne, Norway. *Bull. Geol. Soc. Finland* 52, 3-21.
- Wolff, F.C. 1976: Geologisk kart over Norge, berggrunnskart TRONDHEIM, M 1:250 000. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
- Wolff, F.C. 1977: Geologisk kart over Norge, berggrunnskart ØSTERSUND, M 1:250 000. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.

## **VEDLEGG**

Tabell 1 XRF hoved- og sporelement-analyse av bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og nærmest omkringliggende berggrunn

Tabell 2 LA-ICP-MS analyse av sjeldne jordarter (REE) pluss utvalgte sporelementer av bergarter fra Brattbakken intrusjonen og nærmest omkringliggende berggrunn

Tabell 3 Bulkanalyser av Ni-Cu-Co sulfidmalm, pyroksenitter og sidebergarter



X-H = XRF-HOVED  
 X-S = XRF-SPOR  
 Hovedelementer er rekalkulert  
 til 100 % på volatilfri basis

**XRF hoved- og sporelement-analyse av bergarter fra Brattbakken-intrusjonen og nærmest omkringliggende berggrunn**

Det er laget polerte tynnslip av alle de opplistede prøver med unntak av pr. SKJ 04-1, SKJ 04-2 og SKJ 12-21.

NGU-nr #	UTM sone 33W		Felt nr. Prøve-ID	Bergart hovedinndeling	Tetthet g/cm <sup>3</sup>	Mag. suscept. SI x 10 <sup>-3</sup>	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> *	Total	LOI
	E	N					wt-%	wt-%	wt-%	wt-%	wt-%	wt-%	wt-%	wt-%	wt-%	wt-%	wt-%	wt-%
ANALYSEMETODE																		
							X-H	X-H	X-H	X-H	X-H	X-H	X-H	X-H	X-H	X-H	X-H	X-H
114951	369 584	7 092 889	SKJ 20 - 31	Olivin-fri pyroksenitt umiddelbart i heng av malmsonen	2.97	3.38	44.16	9.83	17.19	1.25	18.80	7.51	0.71	0.13	0.22	0.20	100.0	5.23
114953	369 584	7 092 906	SKJ 20 - 35	Olivin-fri ferro-pyroksenitt umiddelbart i ligg av malmen på jernhatt-platået (rett under Cragen)	2.86	1.82	39.72	8.34	29.90	0.74	13.10	6.58	0.80	0.13	0.45	0.25	100.0	7.07
114958	369 559	7 092 903	SKJ 20 - 41	Gula amfibolitt, Fe-Ti rik, i kontakt med ren sulfidlinse i SKJ 20 - 42	3.11	1.32	45.51	13.38	18.34	2.33	6.57	10.24	2.68	0.40	0.34	0.24	100.0	0.34
114960	369 562	7 092 900	SKJ 20 - 43	Gula gabbro, i kontaktsonen mot pyroksenitt	3.02	4.20	46.26	12.10	16.10	2.09	10.36	9.14	2.95	0.30	0.37	0.31	100.0	1.61
114963	369 681	7 092 910	SKJ 20 - 49	Sillimanitt-dominert xenolitt(?) fra sideberget	3.10	0.48	33.83	54.16	4.90	0.14	0.50	0.45	4.95	1.10	0.02	0.02	100.0	1.15
114965	369 637	7 092 897	SKJ 20 - 53	Olivin-fri pyroksenitt øst for malmen på jernhatt-platået	2.78	0.94	43.54	10.22	18.72	1.33	20.46	3.94	1.00	0.22	0.19	0.38	100.0	6.93
114967	369 657	7 093 039	SKJ 20 - 55	Olivin-holdig pyroksenitt, høy Mg-Cr, lav Ca	2.93	17.07	46.79	4.80	14.29	0.44	31.30	1.77	0.19	0.09	0.19	0.07	100.0	6.22
114968	369 803	7 093 165	SKJ 20 - 56	Olivin-holdig pyroksenitt, høy Mg-Cr, lav Ca	2.89	0.97	54.13	5.61	11.25	0.60	24.17	3.03	0.81	0.10	0.22	0.06	100.0	4.06
114969	369 885	7 093 270	SKJ 20 - 57	Gabbro, sterkt serisitt-kloritt omvandlet	2.92	0.81	51.93	16.93	8.46	1.22	9.49	7.91	3.10	0.64	0.14	0.10	100.0	2.92
114970	369 993	7 093 296	SKJ 20 - 58	Gabbro, moderat omvandlet	2.89	0.89	53.35	16.55	7.68	0.95	9.15	8.93	2.36	0.79	0.13	0.13	100.0	2.11
114971	370 113	7 093 283	SKJ 20 - 59	Olivin-holdig pyroksenitt, tatt helt i kontakten mot gabbroen	2.92	1.13	53.90	9.94	10.27	0.79	17.13	5.59	1.46	0.62	0.18	0.11	100.0	2.97
114972	369 886	7 092 962	SKJ 20 - 60	Gula-gabbro, noe Fe-Ti-(Mn) anriket melagabbro	3.07	1.50	45.43	13.59	17.54	2.23	8.12	9.24	2.44	0.61	0.59	0.21	100.0	0.88
114973	369 893	7 092 949	SKJ 20 - 61	Gula-gabbro, Fe-rik melagabbro	3.26	1.47	43.81	13.19	20.41	1.76	9.57	9.03	1.52	0.18	0.50	0.08	100.0	1.78
114974	369 483	7 092 991	SKJ 20 - 62	Olivin-holdig pyroksenitt, karbonatførende	3.01	6.20	46.71	5.45	14.22	0.60	29.50	2.78	0.41	0.15	0.19	0.05	100.0	5.15
114975	369 605	7 092 886	SKJ 20 - 63	Gula-gabbro	3.08	1.10	47.99	15.39	13.55	1.67	7.43	10.10	3.23	0.27	0.23	0.16	100.0	1.06
Prøvetaking 2012																		
135104	369 580	7 092 898	SKJ 12 - 20	Semi-massiv Ni-malm, svakt utlutet			21.37	1.33	58.70	0.20	17.72	0.49	<0.1	0.04	0.13	0.03	100.00	15.80
135105	369 580	7 092 898	SKJ 12 - 21	Semi-massiv Ni-malm, sterkt utlutet			28.07	1.94	46.91	0.42	20.54	1.58	0.22	0.04	0.25	0.03	100.00	14.90
135101	369 584	7 092 906	SKJ 12 - 22	Olivin-fri pyroksenitt umiddelbart i ligg av malmen på jernhatt-platået (rett under Cragen)	3.02	1.84	43.89	9.63	19.72	0.98	17.07	7.20	0.89	0.12	0.38	0.12	100.00	4.31
135106	369 580	7 092 915	SKJ 12 - 23	Semi-massiv Ni-malm, frisk og uforvitret			21.28	1.09	57.25	0.29	19.82	0.14	<0.1	0.03	0.08	0.03	100.00	13.90
135102	369 567	7 092 924	SKJ 12 - 24	Olivin-holdig peridotitt, sterkt omvandlet	2.86	53.58	42.09	5.91	17.53	1.06	29.14	3.46	0.47	0.10	0.20	0.06	100.00	7.78
135103	369 584	7 092 916	SKJ 12 - 29	Olivin-holdig pyroksenitt/ peridotitt	3.14	17.05	42.75	5.83	14.39	0.45	32.25	3.20	0.70	0.18	0.19	0.05	100.00	3.55
Prøvetaking 2004																		
29222	369 580	7 092 899	SKJ 04 - 3	Overgang pyroksenitt / impregnasjonsmalm	3.17	13.10	42.05	9.49	21.51	1.29	17.60	6.24	1.03	0.17	0.38	0.24	100.00	5.88
29223	369 580	7 092 899	SKJ 04 - 4	Impregnasjonsmalm	3.39	10.58	39.39	5.82	31.38	1.33	12.01	8.70	0.84	0.13	0.32	0.08	100.00	5.16
29224	369 580	7 092 899	SKJ 04 - 5	Semi-massiv Ni-malm			25.50	1.41	49.35	1.00	22.34	0.18	<0.1	0.03	0.14	0.05	100.00	23.30
29225	369 530	7 092 959	SKJ 04 - 6	Olivin-holdig pyroksenitt/ peridotitt, svakt karbonatførende, Mg-Cr rik, Ca fattig	2.94	4.42	45.45	4.55	12.97	0.42	33.23	2.11	0.15	0.86	0.18	0.09	100.00	5.08
29226	370 040	7 093 253	SKJ 04 - 7	Gabbro, svakt omvandlet, svakt leukokrat	2.83	0.92	52.88	16.97	7.48	0.76	9.38	8.80	2.67	0.81	0.13	0.11	100.00	1.38



**LA-ICP-MS analyse av sjeldne jordarter (REE) pluss utvalgte sporelementer  
av bergarter fra Brattbakken intrusjonen og nærmest omkringliggende berggrunn**

NGU-nr #	UTM koord. sone 33W		Felt nr.	Lokalisering av prøvepunkter med kort beskrivelse	Bergart hovedinndeling	Field No. Prøve-ID	NGU-Nr #	Glødetap wt-%	Be ppm	Rb ppm	Sr ppm	Y ppm	Zr ppm	Nb ppm	Sn ppm
<b>Prøvetaking 2020</b>															
114951	369 584	7 092 889	SKJ 20 - 31	Nær kontakten mellom Ol-fri pyroksenitt og Gula-gabbro i sør	Olivin-fri pyroksenitt nær malmen	SKJ 20 - 31	114951	5.23	1.3	<1	81.1	11.2	100	9.38	6.4
114953	369 584	7 092 906	SKJ 20 - 35	I brattskrånningen, ca. 5 m nord for toppunktet på Cragen	Olivin-fri pyroksenitt nær malmen	SKJ 20 - 35	114953	7.07	<1	<1	64.2	13.9	48.8	2.56	6.9
114958	369 559	7 092 903	SKJ 20 - 41	Rett i overkant av vestlige snøbre, lok. bare 5 m VNV for lok. 43 og helt i kontakten mot pyroksenitten	Gula amfibolitt	SKJ 20 - 41	114958	0.335	2.6	5.0	180	39.9	125	8.63	2.8
114960	369 562	7 092 900	SKJ 20 - 43	Rett i overkant av vestlige snøbre, lok. bare 5 m ØSØ for lok. 41 og 42 og helt i kontakten mot pyroksenitten	Gula gabbro	SKJ 20 - 43	114960	1.61	1.6	4.9	345	27.4	97.7	8.13	3.6
114963	369 681	7 092 910	SKJ 20 - 49	På kammen av rustryggen ca. 25 m vest for enden av ryggen mot skredmasser	Sillimanitt-dominert xenolitt fra sideberget	SKJ 20 - 49	114963	1.15	3.9	22.0	38.5	0.70	6.1	3.85	2.1
114965	369 637	7 092 897	SKJ 20 - 53	Innenfor et nær sulfidfritt område mellom jernhatt-platået i vest og rustryggen i øst	Olivin-fri pyroksenitt nær malmen	SKJ 20 - 53	114965	6.93	1.4	1.3	92.9	9.26	128	11.5	5.2
114967	369 657	7 093 039	SKJ 20 - 55	Liten oppstikkende blotning ved bekk ca. 40 m nedenfor base campen	Olivin-holdig pyroksenitt	SKJ 20 - 55	114967	6.22	<1	1.9	77.7	4.74	36.2	2.45	<2
114968	369 803	7 093 165	SKJ 20 - 56	Ved vestgrensen av det sentrale myrområdet, ca. 130 m NØ for base camp	Olivin-holdig pyroksenitt	SKJ 20 - 56	114968	4.06	<1	1.4	34.1	7.79	53.1	3.29	<2
114969	369 885	7 093 270	SKJ 20 - 57	Hovedgabbro-området i NØ	Gabbro	SKJ 20 - 57	114969	2.92	1.1	15.1	446	14.1	91.2	6.00	<2
114970	369 993	7 093 296	SKJ 20 - 58	Hovedgabbro-området i NØ	Gabbro	SKJ 20 - 58	114970	2.11	<1	20.3	445	16.6	103	5.91	<2
114971	370 113	7 093 283	SKJ 20 - 59	På grensen mellom pyroksenitt og gabbro, ca. 300 m NØ for base camp	Olivin-holdig pyroksenitt, tatt helt i kontakten mot gabbroen	SKJ 20 - 59	114971	2.97	<1	15.8	236	13.0	82.6	4.91	<2
114972	369 886	7 092 962	SKJ 20 - 60	I foten av høy, bratt nordvendt fjellvegg kort sør for myrområdet	Gula-gabbro	SKJ 20 - 60	114972	0.879	1.5	7.5	227	48.8	154	6.88	<2
114973	369 893	7 092 949	SKJ 20 - 61	I foten av høy, bratt nordvendt fjellvegg kort sør for myrområdet	Gula-gabbro	SKJ 20 - 61	114973	1.78	<1	2.1	82.7	17.9	41.3	2.95	<2
114974	369 483	7 092 991	SKJ 20 - 62	Nær vestgrensen av intrusjonen, SV for base camp. Ribbe-pyroksenitt-lok. med Tr-ribber	Olivin-holdig pyroksenitt	SKJ 20 - 62	114974	5.15	<1	3.8	69.6	6.57	34.6	2.80	<2
114975	369 605	7 092 886	SKJ 20 - 63	På sørsiden av østlige snøfelt, like SØ for jernhattplatået	Gula-gabbro	SKJ 20 - 63	114975	1.06	<1	4.2	199	31.9	99.3	4.55	2.0
<b>Prøvetaking 2003</b>															
114978	369482	7 092 967	JS-B2003	SV-lige område med gabbro, amfibolitt og BIF, i den vestlige kontaktsonen til Brattbakken intrusjonen	Pegmatitt	JS-B2003	114978	0.724	6.4	127	171	13.0	104	20.8	10.9
114979	369 653	7 092 816	JS-B2004	Gneisområdet sør for Brattbakken intrusjonen	Gula granat-biotitt gneiss	JS-B2004	114979	1.22	1.4	91.0	96.7	32.1	317	12.4	2.1
114980	369 669	7 092 753	JS-B2005	Gneisområdet sør for Brattbakken intrusjonen	Gula gneiss	JS-B2005	114980	0.744	1.5	75.1	128	36.1	276	12.3	<2
114981	370226	7 093 224	JS-B2006	Innenfor den østlige delen av Brattbakken intrusjonen	Pegmatitt	JS-B2006	114981	0.349	3.3	58.6	148	10.6	38.9	2.18	<2
114982	370245	7 093 280	JS-B2007	Innenfor den østlige delen av Brattbakken intrusjonen	Pegmatitt	JS-B2007	114982	0.415	4.7	18.4	178	15.3	40.5	3.45	3.8
114983	369 769	7 093 345	JS-B2008	Nordlige område med amfibolitt og BIF, nord for Brattbakken intrusjonen	Gula amfibolitt	JS-B2008	114983	0.665	<1	3.6	223	32.0	114	6.39	<2
114984	369 481	7 093 291	JS-B2009	Nordlige område med amfibolitt og BIF, nord for Brattbakken intrusjonen	Gula amfibolitt	JS-B2009	114984	0.655	1.1	3.8	246	38.9	122	5.80	2.0
<b>Prøvetaking 1997</b>															
114987	369 728	7 092 478	BR 429	Innenfor Funnsjøgruppen sørøst for Brattbakken intrusjonen	Rhyolitt / rhyodacitt i Funnsjø-gruppen	BR 429	114987	0.280	<1	1.1	65.2	8.76	28.3	3.93	<2
114986	369 937	7 093 434	BR 470	Nordlige område med amfibolitt og BIF, nord for Brattbakken intrusjonen	Gula amfibolitt	BR 470	114986	2.00	<1	16.3	134	19.9	60.6	1.78	<2
114988	369 511	7 092 851	BR 527	SV-lige område med gabbro, amfibolitt og BIF, ca. 100 m VSV for jernhatten	Gula gabbro	BR 527	114988	1.13	<1	1.9	177	20.9	73.4	4.17	2.1
114989	369 513	7 092 899	BR 528	SV-lige område med gabbro, amfibolitt og BIF, ca. 100 m V for jernhatten	Gula amfibolitt	BR 528	114989	0.889	1.2	3.5	118	40.5	135	7.26	<2
114985	369 402	7 092 909	BR 529	Gneisområdet vest for Brattbakken intrusjonen	Gula biotitt-gneiss	BR 529	114985	2.49	2.3	194	52.5	36.9	220	19.9	3.7
114990	369 356	7 092 970	BR 539 a	V-lige område med gabbro, amfibolitt og BIF, nær toppvarden (trig. punkt) på Brattbakken	Gula glimmerskifer	BR 539a	114990	2.36	2.1	130	118	30.4	190	15.7	2.7
114991	369 356	7 092 970	BR 539b	V-lige område med gabbro, amfibolitt og BIF, nær toppvarden (trig. punkt) på Brattbakken	Gula granat-glimmerskifer	BR 539b	114991	2.01	2.9	82.6	388	32.0	305	17.2	2.6
114992	369 174	7 093 148	BR 541	Gneisområdet vest for Brattbakken intrusjonen	Gula granat-glimmerskifer	BR 541	114992	2.96	1.3	155	117	30.5	177	22.0	3.7
114993	369 266	7 093 129	BR 542	Ca. 120 m øst for toppvarden på Brattbakken (873 moh)	Gula gabbro	BR 542	114993	0.614	1.0	14.2	192	45.5	160	8.55	2.4
114994	369 277	7 093 130	BR 543	Ca. 130 m øst for toppvarden på Brattbakken (873 moh)	Gula gabbro	BR 543	114994	0.999	<1	15.8	190	35.3	104	5.84	<2
114995	369 337	7 093 105	BR 545	Nordlige område med amfibolitt og BIF, NV for Brattbakken intrusjonen	Gula amfibolitt	BR 545	114995	1.57	<1	23.8	218	32.3	119	6.76	<2
114996	369 375	7 093 080	BR 547	V-lige område med gabbro, amfibolitt og BIF, nord for toppvarden (trig. punkt) på Brattbakken	Gula amfibolitt	BR 547	114996	2.91	1.5	16.3	113	65.4	218	9.10	2.4
114997	370 470	7 093 464	BR 550	Helt i NØ-enden av intrusjonen, ved liten bekk fra Andtjønnområdet	Olivin-holdig pyroksenitt	BR 550	114997	6.30	<1	5.3	148	10.1	49.7	3.63	<2

NGU-nr #	Cs ppm	Ba ppm	La ppm	Ce ppm	Pr ppm	Nd ppm	Sm ppm	Eu ppm	Gd ppm	Tb ppm	Dy ppm	Ho ppm	Er ppm	Tm ppm	Yb ppm	Lu ppm	Hf ppm	Ta ppm	W ppm	Pb ppm	Bi ppm	Th ppm	U ppm	V ppm	Cr ppm	Cu ppm	Zn ppm	Ga ppm	
114951	<0.4	5.80	6.83	17.0	2.01	9.25	2.30	0.696	2.07	0.343	2.09	0.437	1.08	0.159	1.09	0.157	2.19	0.527	0.28	12.9	1.39	0.769	1.06	129	583	502	93	10.2	
114953	<0.4	10.3	3.77	7.10	1.07	5.68	1.56	0.785	1.98	0.365	2.23	0.478	1.29	0.193	1.24	0.180	1.25	0.135	<0.2	23.4	2.00	0.533	0.985	301	233	1040	152	7.3	
114958	<0.4	54.0	5.11	17.2	2.69	14.5	4.68	1.51	5.33	0.977	6.19	1.34	3.86	0.576	3.85	0.553	3.09	0.612	0.44	29.8	<0.1	0.308	0.500	415	84	39	137	21.0	
114960	<0.4	36.3	7.85	23.7	3.07	15.2	4.11	1.70	4.37	0.757	4.55	0.973	2.78	0.397	2.57	0.386	2.33	0.381	0.43	17.5	0.56	0.355	0.453	201	138	463	98	16.8	
114963	0.94	69.7	0.78	1.62	0.184	0.63	0.16	0.102	<0.3	<0.04	<0.16	<0.04	<0.09	<0.04	<0.2	<0.04	<0.13	0.151	1.83	30.4	0.39	0.110	0.281	60.7	313	129	411	52.1	
114965	0.45	13.9	8.99	22.7	2.55	9.68	2.24	0.846	2.11	0.346	1.95	0.373	0.921	0.133	0.81	0.123	2.42	0.644	0.22	9.3	0.25	0.898	0.644	113	159	320	92	12.8	
114967	<0.4	8.22	3.02	7.55	0.880	3.34	0.83	0.269	0.90	0.139	0.94	0.199	0.548	0.079	0.48	0.078	0.87	0.125	0.45	<5	<0.1	0.633	0.338	121	1460	107	72	6.0	
114968	<0.4	7.74	3.06	7.52	0.986	4.29	1.14	0.366	1.20	0.211	1.36	0.300	0.896	0.127	0.83	0.133	1.27	0.198	0.48	<5	<0.1	0.914	0.401	293	1980	17	60	8.4	
114969	0.57	73.7	7.21	15.6	2.16	9.27	2.34	0.973	2.60	0.427	2.63	0.541	1.49	0.225	1.33	0.189	2.04	0.388	0.79	6.7	<0.1	1.64	0.643	245	241	18	63	15.0	
114970	1.00	82.2	9.48	19.5	2.55	11.1	2.76	1.08	2.75	0.471	2.95	0.612	1.77	0.251	1.57	0.240	2.43	0.345	0.27	5.8	<0.1	1.88	0.686	268	316	22	53	13.8	
114971	1.66	54.8	6.82	14.9	1.89	8.86	2.12	0.771	2.24	0.371	2.23	0.481	1.38	0.198	1.24	0.185	1.98	0.321	0.26	<5	<0.1	1.60	0.625	314	1050	48	61	11.3	
114972	0.49	157	6.13	17.7	2.94	17.1	5.76	1.94	6.98	1.21	7.75	1.72	4.82	0.709	4.63	0.720	4.03	0.390	0.85	47.2	<0.1	0.404	0.211	396	103	37	110	20.7	
114973	<0.4	13.6	2.11	6.06	0.890	5.28	1.88	1.10	2.40	0.440	3.04	0.686	1.87	0.283	1.90	0.290	1.24	0.140	1.13	<5	<0.1	0.145	0.165	379	221	26	101	16.7	
114974	1.43	9.82	2.43	6.93	0.930	4.05	1.15	0.446	1.24	0.195	1.27	0.276	0.716	0.107	0.65	0.102	0.90	0.172	0.90	5.3	0.17	0.507	0.401	133	1460	127	81	6.9	
114975	<0.4	33.4	4.81	14.5	2.23	10.7	3.76	1.43	4.78	0.905	5.61	1.19	3.48	0.518	3.02	0.466	2.47	0.194	0.28	5.8	<0.1	0.242	0.197	320	217	57	86	20.9	
114978	11.7	295	15.1	30.0	3.40	12.5	3.04	1.23	2.78	0.480	2.60	0.436	1.08	0.144	0.89	0.129	3.11	2.59	1.87	34.9	0.14	4.96	5.04	49.3	109	<15	70	17.7	
114979	3.90	295	28.9	56.4	6.65	27.5	5.96	1.13	5.16	0.867	5.17	1.12	3.22	0.445	3.01	0.470	8.09	0.867	0.81	12.2	0.12	9.07	2.28	94.9	437	29	58	13.8	
114980	2.73	265	40.8	56.6	8.99	37.3	7.69	1.41	6.54	1.02	5.61	1.17	3.25	0.427	2.94	0.449	6.97	0.760	0.31	10.6	0.11	8.49	1.55	82.5	176	19	56	12.9	
114981	1.58	210	11.4	27.8	2.73	8.71	2.01	0.903	1.98	0.367	2.07	0.407	0.980	0.136	0.69	0.096	1.11	0.390	0.24	67.1	<0.1	4.77	3.59	<9	22	<15	<15	12.0	
114982	1.25	58.9	9.73	24.9	2.46	7.23	2.01	0.793	2.17	0.433	2.64	0.509	1.36	0.171	0.96	0.137	1.23	0.483	2.44	48.4	0.15	2.78	5.22	<9	28	<15	<15	12.8	
114983	<0.4	20.7	5.73	17.2	2.60	13.6	4.47	1.72	4.89	0.865	5.14	1.14	3.11	0.446	2.97	0.404	2.85	0.308	0.41	10.2	<0.1	0.372	0.176	325	161	33	94	20.0	
114984	<0.4	54.7	7.20	20.7	2.97	14.8	4.91	1.74	5.69	1.03	6.53	1.45	3.91	0.579	3.96	0.567	3.28	0.303	0.72	19.2	<0.1	0.405	0.276	321	173	18	108	20.9	
114987	<0.4	18.9	2.79	6.83	0.817	3.30	0.89	0.355	1.23	0.213	1.37	0.339	1.07	0.159	1.03	0.166	0.87	0.236	<0.2	<5	<0.1	0.778	0.498	210	46	50	55	9.4	
114986	1.27	60.4	4.91	13.2	1.92	9.25	2.61	0.778	3.20	0.559	3.48	0.758	2.09	0.302	1.75	0.278	1.52	0.092	2.13	28.6	<0.1	0.778	0.320	208	708	23	88	16.4	
114988	<0.4	12.8	5.09	14.5	2.04	9.33	2.93	1.22	3.61	0.635	3.86	0.821	2.26	0.349	1.95	0.293	1.82	0.216	2.69	30.3	0.12	0.306	0.487	267	262	35	81	23.1	
114989	<0.4	40.4	6.91	20.5	3.25	16.5	5.39	1.91	6.57	1.15	7.12	1.55	4.40	0.626	3.69	0.558	3.43	0.415	0.42	12.0	<0.1	0.420	0.258	376	166	57	99	22.6	
114985	8.24	318	49.3	96.2	10.9	43.6	8.26	1.33	6.79	1.09	6.21	1.32	3.68	0.538	3.33	0.545	5.84	1.21	1.17	21.6	0.20	14.0	3.65	160	137	16	116	23.5	
114990	5.95	353	38.6	74.6	8.70	33.2	6.36	1.63	5.42	0.886	5.17	1.09	3.17	0.490	3.05	0.473	5.09	0.990	0.75	23.5	0.21	12.1	3.54	154	122	22	85	22.9	
114991	4.53	305	13.6	32.5	4.29	18.6	5.02	1.64	5.05	0.881	5.39	1.16	3.16	0.432	3.22	0.463	6.42	1.14	0.63	16.8	0.30	6.94	6.64	148	96	55	102	20.0	
114992	2.84	571	30.3	62.7	7.08	29.4	5.65	1.16	5.00	0.824	4.83	1.04	2.91	0.456	3.31	0.525	4.61	1.20	0.98	22.9	0.27	11.1	1.21	118	127	84	90	22.6	
114993	0.42	59.6	8.86	24.8	3.65	19.5	6.01	1.91	6.65	1.16	7.37	1.59	4.60	0.654	4.53	0.690	4.13	0.451	0.40	<5	<0.1	0.547	0.264	452	61	42	134	22.7	
114994	2.53	253	5.82	16.5	2.43	12.9	4.17	1.56	5.30	0.920	5.98	1.29	3.79	0.541	3.48	0.523	2.90	0.297	0.65	<5	<0.1	0.376	0.252	837	<15	225	135	19.3	
114995	3.22	91.8	6.59	18.8	2.77	13.9	4.32	1.51	5.28	0.935	5.80	1.28	3.54	0.488	2.96	0.448	2.94	0.355	1.50	19.8	<0.1	0.422	0.298	363	135	60	119	19.2	
114996	<0.4	60.7	9.02	26.5	4.27	23.1	7.56	2.48	9.53	1.71	10.7	2.37	6.86	0.980	6.37	0.951	5.73	0.585	1.01	13.9	<0.1	0.662	0.509	511	46	64	151	24.4	
114997	0.83	20.9	3.86	9.30	1.25	6.23	1.72	0.560	1.66	0.317	1.80	0.350	1.02	0.140	0.89	0.127	1.27	0.212	0.24	<5	<0.1	0.651	0.290	120	1590	54	77	8.4	







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)