

BACHELOROPPGÅVE

Sogn-Voss anortositten:

Kartlegging og undersøkning av bergartsførekomstar rundt Eidsfjorden med omsyn til ressurspotensiale og geologisk utvikling

av

406 Vegard Ose Velle
401 Kristoffer Hatlegjerde
413 Vetle Øyri

Sogn-Voss anorthosite province:

Mapping and investigations of geology in an area near Eidesfjorden with regards to resource potential and geologic history

Geologi og Geofare

GE491

Juni 2016



Avtale om elektronisk publisering i Høgskulen i Sogn og Fjordane sitt institusjonelle arkiv (Brage)

Eg gir med dette Høgskulen i Sogn og Fjordane løyve til å publisere oppgåva ”Sogn-Voss anortositen: Kartlegging og undersøking av bergartsførekomstar rundt Eidsfjorden med omsyn til ressurspotensiale og geologisk utvikling” i Brage dersom karakteren A eller B er oppnådd.

Eg garanterer at eg har opphav til oppgåva, saman med eventuelle medforfattarar. Opphavsrettsleg beskytta materiale er nytta med skriftleg løyve.

Eg garanterer at oppgåva ikkje inneheld materiale som kan stride mot gjeldande norsk rett.

Ved gruppeinnlevering må alle i gruppa samtykke i avtalen.

Fyll inn kandidatnummer og namn og set kryss:

406 Vegard Ose Velle

JA X NEI___

401 Kristoffer Hatlegjerde

JA X NEI___

413 Vetle Øyri

JA X NEI___

BACHELOROPPGÅVE I GEOLOGI

Sogn-Voss anortositten:

Kartlegging og undersøkning av bergartsførekomstar rundt Eidsfjorden med omsyn til ressurspotensiale og geologisk utvikling



Sogn-Voss anorthosite province:

Mapping and investigations of geology in an area near Eidesfjorden with regards to resource potential and geologic history

Vegard Ose Velle, Kristoffer Hatlegjerde og Vetle Øyri

Juni 2016

Forord

Vi ynskjer å takke vegleiarane våre Deta Gasser frå NGU og førsteamanuensis ved HiSF Helge Henriksen for all den gode hjelpa og støtte vi har fått til dette bachelorprosjektet. Vi vil også takke alle lærarane på Geologi og geofare ved Høgskulen i Sogndal for tre flotte år.

Juni 2016, Sogndal

Samandrag

Noreg har nokre av verdas største førekomstar av anortositt, ein bergart som består av minst 90 prosent plagioklasfeltspat ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAlSi}_2\text{O}_8$). Bergarten er vurdert som ein viktig ressurs på fleire områder. I dei seinare år er det utvikla lovande prosesser for å nytte anortositten som eit alternativ til dagens aluminiumsråstoff, men teknologien er enda ikkje testa ut i stor skala. Utvinning av aluminiumsoksid frå anortositten stiller strenge krav til bergartens mineralogiske kvalitet. Plagioklasen må vere kalsiumrik ($\text{An} > 70\%$) og innhald av aksessoriske mineral er ikkje ynskja. Bergarten har i tillegg fleire viktige bruksområder frå byggeråstoff til prydstein.

I arbeidet med denne oppgåva har eit område ved Kaupanger i Sogn vorte geologisk kartlagt. Hensikta med kartlegginga var å bedømme ressurspotensialet for bergartane og resultatata frå kartlegginga er også drøfta i høve til området geologiske historie. Vi har delt opp området i sju litologiske bergartsgrupper og generelt består dei av ulike anortosittiske- og lecocabbroide bergartar som ligg over monzonittiske bergartar. Overgangen frå monzonittane til dei plagioklasrike bergartane representera eit skilje mellom øvre og nedre del av Jotundekket.

Grensesona er prega av intens duktil skjærdeformasjon relatert til den kaledonske orogonesa. Bergartane i området har elles ei varierende deformasjonsgrad. Til dømes finn ein koronastrukturar som vitnar om granulitt- til amfibolittfacies metamorfose. Vi observerte også kloritt, noko som indikera lågare omdanningfacies, men dette er særst lokalt.

Strukturmålingar i feltet synar at bergartane kan ha vorte folda i ei nordvest-søraustleg retning og dette samsvarar med den kaledonske skyveretninga. Saman med andre

observasjonar kan resultata underbygge nyare forskning som utfordrar den meir etablerte sanninga der Jotundekket har vorte relativt lite deformert i den kaledonske fjellkjedefoldinga.

Med omsyn til ressurspotensial for området er moglegheitene for aluminaproduksjon avgrensa. Ein finn nokre felt med ein gunstig samansetning, men stort sett er er innhald av aksessoriske mineral for høgt. Derimot har ein gode føresetnadar for bruk av bergartane som byggeråstoff. Bergartane i området tilhøyrar Sogn-Voss anortositten som er ein av dei største anortositt-provinsane i verda. Ressurspotensialet i regionen vert sett på som meget stort, både i dag og for framtida.

Innhald

Forord

Samandrag

1.0 INNLEIING.....	1
1.1 Bakgrunn for oppgåveval.....	1
1.2 Val av problemstilling.....	2
1.3 Metode.....	3
2.0 BAKGRUNN.....	4
2.1 Generell bergartsinformasjon.....	4
2.1.1 Opphavsmiljø for anortositt.....	5
2.1.2 Danningsmodellar for anortositt.....	7
2.1.2.1 Ashwal: anorogenisk tostegsmodell.....	8
2.1.2.2 Dushesne: post-kollisjon skorpetipp smeltemodell.....	9
2.2 Noregs anortosittiske førekomstar.....	10
2.2.1 Sogn-Voss-anortositten.....	11
2.2.1.1 Geografisk oversikt.....	11
2.2.1.2 Ei tektonisk oversikt.....	12
2.2.1.3 Ei litologisk oversikt.....	16
2.2.2 Lindåsdekket.....	17
2.2.3 Rogaland anortosittprovins.....	19
2.2.4 Andre førekomstar.....	22
2.3 Anortositten som ein ressurs.....	22
2.3.1 Dagens aluminiumsproduksjon.....	23
2.3.1.1 Bauksitt.....	23
2.3.1.2 Bauksitt i eit globalt perspektiv.....	24
2.3.1.3 Raffinering av bauksitten- Bayerprosessen.....	25
2.3.2 Vidare prosessering- aluminiumsframstilling.....	26
2.3.2.1 Kraftforbruk ved elektrolyse.....	26
2.3.2.2 Aluminiumsproduksjon i Noreg i dag.....	28
2.3.2.3 Resirkulering av aluminium.....	28
2.3.2.4 Ulemper ved dagens aluminiumsproduksjon.....	29
2.3.3 Anortositt som ei mogleg aluminiumskjelde.....	31
2.3.3.1 Anortitt-innhald.....	32
2.3.3.2 Mørke mineral.....	34
2.3.3.3 Gangar av andre bergartar.....	35
2.3.3.4 Alumina frå anortositt - ny teknologi med Aranda-Mastin prosessen.....	35
2.3.4 Anortositten som ein ressurs i dag.....	37
2.3.4.1 Pukk.....	37
2.3.4.2 Blokk- og naturstein.....	39
2.3.4.3 Andre bruksområder.....	40
2.3.5 Uttak i drift i Sogn-Voss-området.....	41
2.3.5.1 Sogndal-Kaupanger.....	41
2.3.5.2 Gudvangen Stein.....	42
3.0 RESULTAT.....	43
3.1 Geografisk og geologisk oversikt over feltområdet.....	43
3.1.1 Dei litologiske sonene.....	45

3.1.1.1 Monzonittiske gneisar.....	45
3.1.1.2 Anortosittane.....	46
3.1.1.3 Dei gabbroide sonene.....	51
3.1.1.4 Amfibolitt.....	52
3.1.1.5 Koronittar.....	53
3.1.1.6 Tonalittiske/Granodiorittiske gangbergartar.....	55
3.2 Deformasjon og strukturar i felt.....	56
3.2.1 Plastiske deformasjonar.....	57
3.2.1.1 Planære strukturar.....	57
3.2.1.2 Lineære strukturar.....	64
3.2.2 Sprø deformasjonar.....	68
3.2.2.1 Sprekker.....	69
3.2.2.2 Forkasningar.....	69
4.0 DISKUSJON.....	72
4.1 Mineralogi og deformasjonsstrukturar relatert til den geologiske historia til anortositten i Sogn.....	72
4.1.1 Magmatisme i ein sein fase av den Svekonnorvegiske fjellkjedeforminga.....	72
4.1.2 Granulittfacies omdanning etter intrusjonen: Koronittdanning.....	74
4.1.3 Kaledonsk påverknad.....	77
4.1.4 Post-kaledonsk tektonikk?.....	82
4.2 Ressurspotensialet i kartleggingsområdet.....	83
4.2.1 Aluminiumspotensialet.....	83
5.0 KONKLUSJON.....	89
Etterord/ Feilkjelder.....	90
Referanser.....	91
Vedlegg 1: Oversiktskart med blotninger og litologi	
Vedlegg 2: Bergrunnskart og profil	
Vedlegg 3: Strukturkart	

1.0 INNLEIING

1.1 Bakgrunn for oppgåveval

Denne bacheloroppgåva var eitt av fleire prosjekt som vart føreslått av lærarane i Geologi og Geofare ved høgskulen i Sogn og Fjordane før sumaren 2015. Vi vart ikkje umiddelbart tent av presentasjonen med forslag og gjekk derfor til skulebiblioteket sitt arkiv for å låne ein stor bunke av «fagbladet» GEO. I magasina håpa vi på å finne eit framoverlent og framtidretta bachelortema. Ein artikkel beskreib med store ord anortosittens «fantastiske ressurspotensial» og dette vekka interessa vår.

Utvinning av mineralressursar frå naturen har gjennom store delar av menneskets historie vore heilt sentralt for å sikre vidare utvikling og vedlikehald av samfunnet. Særs mykje av det vi omgir oss med er mineralske produkt eller inneheld mineralske komponentar.

Utnytting av mineralske ressursar har historisk skapt stor framgang for menneskeheita; bruk av glas for eksempel har gitt oss briller, mikroskop, teleskop, fiberoptikk, kamera og mykje meir. Metalliske forbindelsar ein finn i naturen har til dømes gitt oss verkty og våpen.

Utvinning av myrmalm og bruk av jern til ulike formål er eit klassisk døme som har definert ei eiga tidsepoke i mennesket si historie.

Ein ressurs som har kome meir i fokus i nyare tid er aluminium. Metallet er lett, har ei rekkje nytteområder og legeringer av metallet finn ein over alt i det moderne samfunnet. Metallet vert som regel utvunne frå bauksitt, ein aluminiummalm ein stort sett finn i land med eit tropisk klima. I forbindelse med utvinninga har ein fleire problemstillingar knytt til miljø og etikk. Sida ein finn bauksitten i tropiske områder har ein sett dømer på at regnskog vert rydda og avtalar inngått på tvilsame regimer sine premisser. Dømer på slike utfordringar kan ein i dag sjå i militærdiktaturet Guinea på Afrikas vestkyst, kor ein finn ein av verdas største bauksittførekomstar.

Av fleire grunnar vorte investert betydelige summar for å finne eit alternativ til bauksitten. Hovudbarriera i høve til å finne ei ny råvarekjelde ligg i kost-nytte-analysane til aluminiumsprodusentane. Til dømes har det lenge vore kjent at bergarten anortositt kan vere

eit mogleg kjelde for aluminumsråstoff. Bergarten består nesten berre av plagioklasfeltspat som innehald ein stor vektprosent alumina (Al_2O_3). Det er betydelige førekomstar av bergarten i Noreg og det har i lengre tid vore lagt ned ein stor innsats for å kartlegge førekomstane og utvikle ein kostnadseffektiv teknologi for utvinning.

I nyare tid har ein gjort framsteg med å utvinne alumina frå denne plagioklasrike bergarten. Den optimistiske artikkelen vi til dømes leste i forbindelse med oppgåvevalet presenterte eit storstilt industrikonsept som lova full utnytting av råvara i tillegg til fangst og utnytting av klimagassen CO_2 (Carstens, 2007). Lovnadane gjorde oss veldig nysgjerrige, og vi ville finne ut meir om bergarten som ein finn blant anna eit «steinkast» frå høgskulen i Sogndal.

1.2 Val av problemstilling

Geologistudiet i Sogndal er retta mot naturfarar og fokus på skred, flom, klimatilpassing og liknande har vore gjennomgåande i heile studiet. Sjølv om naturfarar er eit spennande geofagleg område, har vi sakna å lære meir om andre aspektar av geovitskapen. Spesielt har vi sakna å lære meir om Noregs geologiske historie. Vi har derfor også valt å bake eit historisk fokus inn i følgjande hovudproblemstillingar:

- Er bergartane ein finn i området vest for Kaupanger eigna for utvinning av aluminiumsråstoff eller andre bergressursar?
- Kva geologiske faktorar avgjer om bergartane ein finn i området eigna seg for utvinning? Og korleis kan dette relaterast til den geologiske/tektoniske utviklinga til anortosittførekomstane i Sogn og Voss?

Underproblemstillingar for å svare på hovudproblemstillingane:

- Kva er den litologiske/petrologiske og strukturelle oppbyggingen av Sogn-Voss anortositten i eit område vest for kaupanger?
- Korleis er området deformert?
- Korleis kan dette verte knytt til ressurspotensialet og geologisk utvikling?

1.3 Metode

For å svare på disse problemstillingane har vi nytta ein kombinasjon av litteraturstudiar og feltarbeid. Litteraturstudiane gjekk i hovudsak ut på å lese oss opp på relevant teori og fagstoff som vi nytta i forbindelse med feltarbeidet, som bakgrunnsstoff for teorikapitela og som støttelitteratur til å gjere tolkingar i diskusjonskapittelet. Vi har hovudsakelig nytta oss av forskingslitteratur, med fokus på primærkjelder og atriklar av nyare dato. Pensumbøker innanfor mineralogi, petrologi, strukturgeologi og geologisk historie har også vore til god hjelp i arbeidet med oppgåva.

Av rettleiar Deta Gasser fekk vi utdelt ein del artiklar om tema knytt til oppgåva, samt berggrunnskart i N50- og N250-skala. Vi vart tildelt eit kartleggingsområde i Kaupanger, ikkje langt frå høgskulen. Og i forbindelse med oppstartsmøtet var vi ein tur i feltområdet saman med Deta og førsteamanuensis Helge Henriksen ved HiSF. Under denne første turen fekk vi tips til kvar ein finn gode blottingar samt rettleiing i høve til utføring av feltstudering.

Feltarbeidet vart gjort på lik måte som i strukturgeologikurset med fokus på bergartsobservasjonar, strukturmålingar og fotografering. Nesten hundre bergartsprøver vart samla inn i laupet av rundt 14 dagar i felt. Vi enda opp med to feltundersøkingar; ei før vinteren 2015 og ei i april 2016. Årsaka til dette var for det første at vi var usikre på detaljgrada når det gjaldt feltarbeidet. Dei første tre dagane i felt nytta vi til å kartlegge ei strekkje som ikkje var meir enn 300 meter lang (sjå vedlagt blotningskart, ved.1). For det andre vart vi sær forvirra av bergartanes polydeformerte karakter med innslag av fleire komplekse strukturar og varierende omdanningsgrad.

Vi har nytta oss av relativt enkle metodar i arbeidet med klassifisering av bergartar og vurdering av strukturar og deformasjonar. Dei ulike litologiske sonene er klassifisert ved hjelp av bergartsprøver og feltundersøking. Bergartane er igjen klassifisert utifrå dei minerala vi kunne sjå med lupe og ved hjelp av geologiske klassifiseringssystem som til dømes Streckeisens. Vi tok til saman rundt hundre strukturmålingar og desse vart utført med eit «amatørkompass» med klinometer. Vidare vart tolkinga av strukturar utført ved hjelp av stereoplot og basiskunnskap innan strukturgeologi.

Dersom ikkje noko anna er nemnt er bileta i oppgåva tatt av oss.

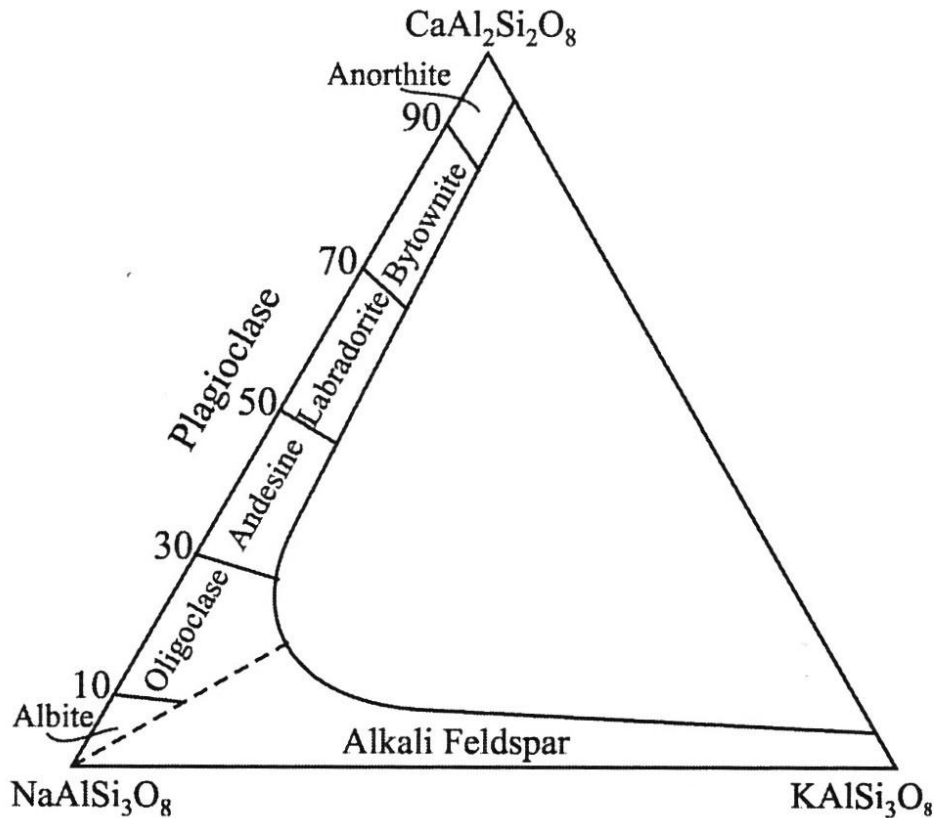
2.0 BAKGRUNN

2.1 GENERELL BERGARTSINFORMASJON

Anortositt er ein grovkorna (fanerittisk) størkningsbergart som inneheld minst 90 prosent plagioklasfeltspat. Andre mineral som opptrer i bergarten er til dømes pyroksen og olivin (Nesse, 2012, s. 216). Anortositt er ein utbreidd bestanddel av den prekambriske jordskorpa (Lundmark & Corfu, 2008, s. 1) og fins fleire stadar i den norske bergrunnen (Wanvik, 1999). Bergarten opptrer ofte innanfor geologiske provinsar med intrusive bergartar og førekjem i fleire land og på alle kontinenta (Wanvik, 1999, s. 37).

Bergarten opptrer som regel i to intrusjonstypar som er namngitt etter dei geologiske eonane dei vert danna i. Intrusjonstypane, som er ulike både med høve til tekstur og komposisjon, er arkeiske og proterozoiske anortosittar. Arkeiske anortosittar førekjem som klynger av plagioklas-megakrystallar på 1 – 5 cm i diameter, omringa av ein mafisk matriks med basaltkomposisjon. Denne anortosittvarianten opptrer typisk som mindre dike og sill intrusjonar. Proterozoiske anortosittar forekjem som større «massiv» og består nesten berre av plagioklas forma som plutoner i batolitt-størrelse. Dei proterozoiske anortosittmassiva skil seg frå den arkeiske anortositten ved at plagioklasen har ei mindre kalsiumsrisk samansetning og at bergartstypen manglar ultramafiske komponentar (Frost & Frost, 2013, ss. 131-132).

Plagioklasfeltspat er eit samlebegrep for mineral som utgjer blandingsledd i ein kontinuerlig blandingsserie mellom endeleda albitt ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) og anortitt ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Serien går igjennom oligoklas, andesin, labradoritt og bytownitt avhengig av forholdet mellom natrium og kalsium i minerala. (Figur 2.1.1) Som ein ser av dei kjemiske formlane over har ein meir aluminium i anortitt enn albitt. Dette skuldast ein koblet substitusjonsreaksjon som involverer utbytting av dei store basekationane kalsium og natrium og ein utskifting av tetraederkationa aluminium og silisium for å oppretthalde ein overordna ladningsbalanse (Nesse, 2012, ss. 69-71,82). Kalsium (Ca^{2+}) har to ladingar medan natrium (Na^+) har ein ladning, derfor må ein ha substitusjon av aluminium(Al^{3+}) for silisium(Si^{4+}) når ein går frå albitt til anortitt.



Figur 2.1.1: Blandingsserie for plagioklasfeltspat og alkaliefeltspat. Den aktuelle serien for denne bergarten ligg langs linja til venstre (Nesse, 2012, s. 239).

2.1.1 Opphavsmiljø for anortositt

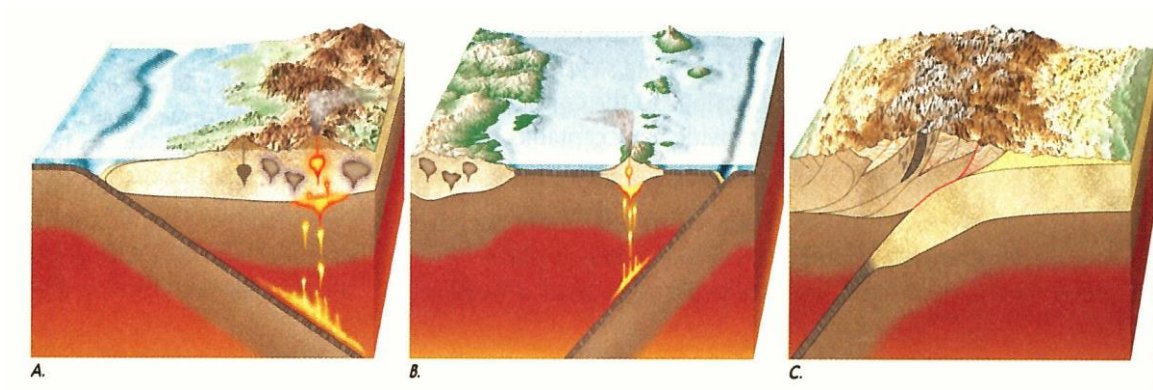
Dei store protezoiske anortosittbatolittane er danna innanfor eit begrensa tidsavsnitt i jordas historie og dei opptrer i ein slags verdsomspennande kjede (Herz, 1969). Det har vore mykje debatt om kva årsaka til dette kan vere. Dei fleste tektoniske miljø har vore mistenkte for danninga av dette geologiske fenomenet, deriblant ekstensjonsregimer, intraplatesoner og platekonvergenssoner. Til og med meteoritnedslag har vore vurdert som opphavsforklaring for anortosittmassiva (Bybee, et al., 2014). Når ein samanliknar dei ulike teoriene med forskning frå dei ulike anortosittprovinser, så er nokre av teoriene meir sannsynlege enn andre.

Til dømes syner forskning frå ulike anortosittintrusjonar i den 1600 km lange Grenville-Labrador regionen at produksjon av anortosittisk magma har pågått i over 500 millionar år (Bybee, et al., 2014). Når størrelsen og tidsrommet blir så omfattande bestrider funna nokre av teoriene. Meteoritnedslag ville til dømes truleg vore for kortvarige og avstandsbegrensa. Bybee, et al. (2014) skriv vidare at det er mindre sannsynleg at sjølv dei største

kontinentalriftene kunne forsyne områder av ein slik størrelse med intrusjonar, over et så langt tidsrom utan å iverksette kontinental oppbrytning. Sjølv om dateringane av dei eldste og yngste proterozoiske anortosittmassiva i verden syner eit stor tidsgap, er sjølve prosessane knytta til danninga av ein intrusjon meir begrensa i tid.

Utifrå forskninga som Bybee, *et al.* (2014) gjorde på det isotopiske likevektsforholdet mellom høg-aluminiums ortopyroksen megakrystallar (HAOM) og anortosittmatriksen rundt (.i mellom anna Rogaland anortosittprovins) er det truleg at magmatiske prosessar i forbindelse med ein anortosittintrusjon varer rundt 100 millioner år. Dei har derfor føreslått at det tektoniske miljøet som har best evne til å levere store nok mengder med magma over ei tidsperiode på ~100 millionar år er platekonvergenssoner.

Dette er soner der ei tektoniske plater kolliderer og den tyngre plata søkk under den lettare plata. Dette vil vidare føre til danning av vulkanbogar på land eller til havs (havbotn-kontinentalplate kollisjon og havbotn-havbotn kollisjon), eller danning av vulkanbogar og høge fjellkjeder slik som Himalaya (kontinentalplate-kontinentalplate kollisjon). Sistnemnte fører til fjelldanning på grunn av forkorting og auke i tjukknad av kontinentalplatene som kolliderer (*figur 2.1.2*) (Lutgens, Tarbuck, & Tasa, 2012, ss. 372-376).



Figur 2.1.2: Figur som viser dei ulike platekonvergenssonene. A syner kollisjon mellom kontinentalplate og havplate, B syner kollisjon mellom to havplater og C syner kollisjon mellom to kontinentalplater. Alle tre kan produsere vulkanbogar, sjølv om C ikkje har i teikninga (Lutgens, Tarbuck, & Tasa, 2012, s. 390).

Forslaget om platekonvergens som årsak til dei store anortosittførekomstane vi finn i verda, passar godt med fleire proterozoiske anortosittførekomster. Dei fleste førekomstane ein finn i Noreg er truleg knytta til den svekonorvegiske orogonesa (Lundmark & Corfu, 2008) medan nokre av anortosittane i grenville-labrador regionen har vorte tolka til å vere resultatet av ein kollisjon mellom Laurentia og eit anna kontinent, sannsynligvis Amazonia, for cirka 1100 millionar år sidan (Hynes & Rivers, 2010).

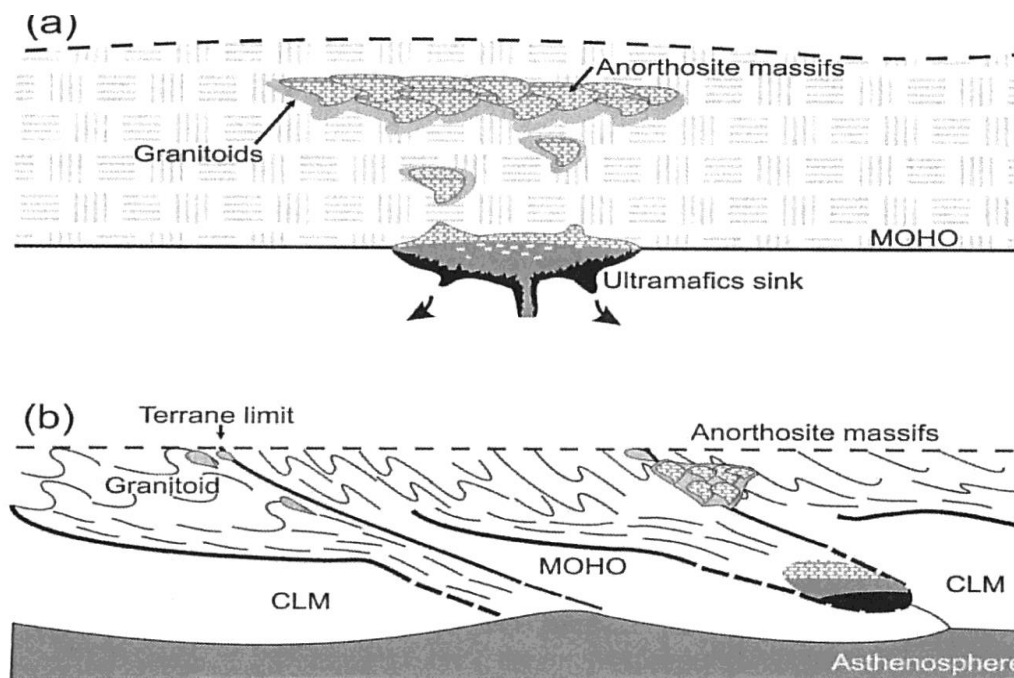
2.1.2 Danningsmodellar for anortositt

I høve til dannelsesmåten for anortositt, er det usemje om ein del faktorar knytt til opphavet av smelta og magmatiske prosesser. Ein årsak til debatten er at ein ofte finn anortositt saman med ulike granittiske bergartar (Ashwal, 1993, ss. 3-4). Den tektoniske settinga som har ført til smelting er føreslått til å vere eit resultat av fjerninga av litosfære under ei fjelldannande platekollisjons-sone og oppvelling av varm astenosfære (Lundmark & Corfu, 2008). Slik type delaminasjon av nedpressa skorpe kan føre til smelting av meir feliske bergartar som opprinneleg låg beskytta frå den varme mantelen. Delaminasjon av botnskorpe vil føre til at fjellkjeden vert heva og modellen brukes i mange samanhengar for å forklare skifting frå konvergens til ekstensjon, fjellkjedekollaps og intrusjonsaktivitet (Fossen & Gabrielsen, 2013, ss. 303-305).

Danninga av dei store voluma med plagioklas som utgjer bergarten, kan i følge Lundmark & Corfu (2007) vere eit resultat av to prosessar eller ein kombinasjon av desse. Den første kan vere krystallisering av magma med opphav i mantelen, som ligger på eller langs nedste del av kontinentalskorpa. Den andre er smelting av tørre (vassfrie) bergmassar i nedre del av jordskorpa (Lundmark & Corfu, 2008). Dette er også dei konkurrerande teoriane som ser ut til å vere i hovudfokus i Charlier et al. (2010), der Ashwal (1993) står for den «*anorogeniske tostegs modellen*», og Duchesne et al. (1999) står for «*post-kollisjon skorpetunge smelte modellen*» (figur 2.1.3).

2.1.2.1 Ashwal (1993): anorogenisk tostegsmodell

Vi begynner med å forklare Ashwal (1993) sin modell, som er representert som (a) i figur 2.1.3. Mafiske magmasmelter med opphav i mantelen akkumulerer ved grensa mellom skorpa og mantelen. Denne grensa vert kalla for Moho¹. Mafiske silikatmineral med høgt smeltepunkt vert først krystallisert ut og søkke til botn av magmakammeret (representert som dei mørke felte i figur 2.1.3). Differensieringsprosessane fører til at den gjevarande smelta vert anrika av aluminium og jern/magnesium samt at den får auka tettheit. (Charlier, et al., 2010, s. 2).



Figur 2.1.3: Figur som viser dei to føreslåtte modellane for danning av anortositt (frå Charlier, 2010). Den øvste representerar den anorogeniske tostegsmodellen til Ashwal (1993), og den nedste representerer post kollisjons skorpetipp smeltingsmodellen til Duchesne et al. (1999). Anortositt førekomstar er i begge figurane representerte med «anorthosite massifs, MOHO står for grensa mellom jordskorpa og mantelen. CLM står for «continental lithospheric mantle». Magmakammera er i begge figurar representert med sirkelforma objekt med svarte og grå fargar. Grundigare forklaringar blir gitt i avsnitta under figuren (Charlier, et al., 2010, s. 2).

¹ Moho står for «Mohorovičićs diskontinuitet», og representerer ei viktig seismisk grense der ulikheiter i kjemisk komposisjon av bergartar i jordskorpa og i øvre del av mantelen, fører til ei hastigheitsauke på jordskjelvbølger når dei krysser denne på veg nedover. Grensa vart kalla opp etter den kroatisk seismologen «Andrija Mohorovičić», som oppdaga den under stadium av jordskjelvbølger (Brynhi, 2009), (Herak & Herak, 2005)

Plagioklasfeltspat er flytande i slik tung smelte og begynner derfor å stige mot toppen av magmakammeret der det samlast som anortosittiske kumulat (Representert som kvite blokker i figur 2.1.3). Denne plagioklasrike ”grauten” er gravitasjonelt ustabil i desse forholda og stig derfor oppover i skorpa gjennom diapiriske prosessar. Oppdriften flyttar massane opp til den midtre delen av jordskorpa der dei vart avkjølt og størknar som ballongforma anortosittplutonar (figur 2.1.3). Intrusjonen fører til kontaktmetamorfose og oppsmelting av jordskorpa rundt plutonen, noko som kan danne ulike granittiske bergarter som omringer anortosittmasiva figur 2.1.3 (Charlier, et al., 2010, s. 2).

2.1.2.2 Duchesne *et al* (1999): post-kollisjon skorpetipp smeltemodell

Den andre modellen, som vart framlagt av Duchesne *et al.* (1999), er representert i figur 3 som (b). Denne modellen har likskapar med Ashwal (1993) sin modell, men her er magmaopphav og transportrute for smelta er forskjellig. Magmaen oppstår i denne teorien ikkje frå mantelen, men frå smelting av nedpressa jordskorpe under en fjellkjede. Prosessen produserer først granittiske smelta på grunn av oppsmelting av materiale som opprinneleg kom frå midtre delar av jordskorpa. Smelta beveger seg vidare oppover langs skorpelineament mellom ulike terreng på grunn av delaminasjon langs svakheitssoner, før dei størknar på eit høgare nivå. Desse er representerte i figur 3 (b) som «granitoid».

Etter ein termal kvileperiode på fleire titals millionar år, fører ei auke i temperatur til oppsmelting av ein jordskorpebit med passande bergartskomposisjon og ein får danna eit djuptliggande magmakammer. I dette magmakammeret skjer same differensieringsprosess som i Ashwal (1993) sin teori, der plagioklas flyt til topps i magmakammeret, medan meir mafiske komponentar søkk til botn. Den same plagioklasrike ”grauten” bevege seg vidare oppover skorpa gjennom dei same diapiriske prosessane, men istadenfor å stige meir eller mindre vertikalt, slik som den gjorde i Ashwal (1993) sin teori, så følgjer den heller definerte svakheitssoner på veg mot dei midtre delane av jordskorpa der den størknar. Av den grunn kan det godt hende desse diapirane følgde same veg som dei granittiske smeltene gjorde, noko som gjer at desse bergartane kan opptre saman (Charlier, et al., 2010, s. 2).

Som vi har sett opptre anortosittane frå proterozoikum ofte saman med ulike granittiske bergartar. Bergartane går ofte under namnet «AMCG-suite» i litteraturen. Forkortinga kan på

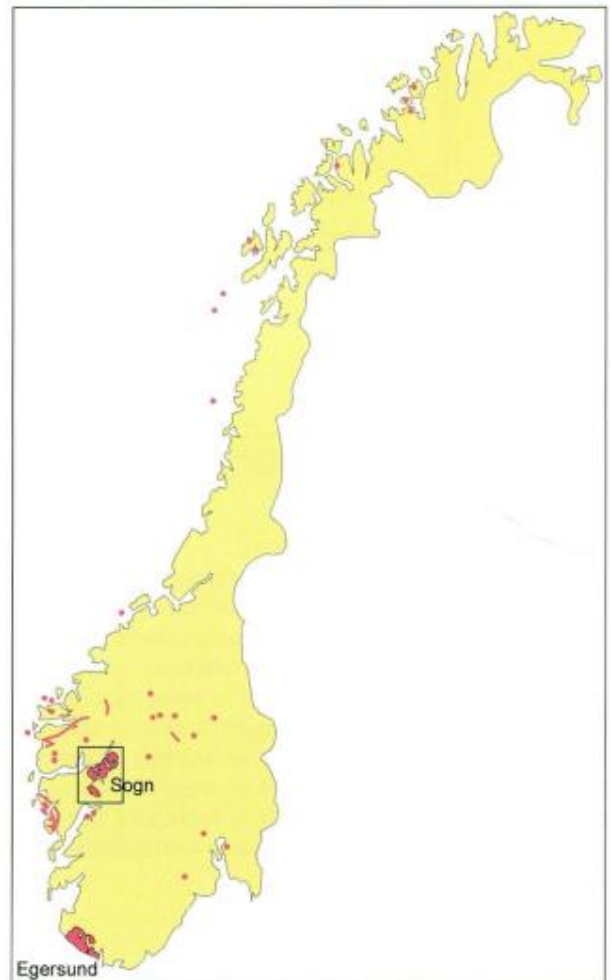
norsk oversettast til «anortositt, mangeritt, charnokitt og granittserien». I oppgåva vår har vi brukt forkortinga AMCG-serien. Vi vil og presisere at vi ofte snakkar om «anortosittiske bergartar» i oppgåva. Dette omgrepet inkluderar også dei lecocabbroide bergartane; gabbro-anortositt samt anortositt-gabbro og er nytta for enkelthet skuld.

2.2 NOREGS ANORTOSITTISKE FØREKOMSTAR

I Noreg finn ein anortosittiske bergartar i fleire delar av landet. Dei fleste førekomstane er relativt små, men Noreg har også nokre av Europas største anortosittmassiv. Noregs førekomstar tilhøyrer ein paleogeografisk belte-fordeling av proterozoiske anortosittførekomstar som strekkjer seg frå Øst-Europa, gjennom Fennoskandia, Sør-Grønland og austlige deler av Nord-Amerika (Herz, 1969). Sjølv om førekomstane i Noreg er beslekta med kvarandre, har dei strukturelle og mineralogiske skilnader som fortel særlige deformasjonshistoriar og gjev opphav til ulike og varierte ressursmoglegheiter. I lang tid har den nær monomineralske bergarten vore gjenstand for kommersiell og akademisk interesse. Vi vil i dette delkapittelet presentera nokre av dei viktigaste førekomstane i landet, og trekkje fram nokre hovudmoment frå nyare litteratur i forhold til geologiske særtrekk og historie.

Utvinning og ressurspotensialet til anortosittane i

Sogn og Voss vil bli dekkja av eigne kapitel i denne oppgåva, og hensikta her er ikkje å greie ut om bruk av anortositt. Vi har likevel skrevet korte avsnitt om bergverksdrift i dei andre anortosittiske førekomstane i landet. Utvinninga er eit resultat av mellom anna geografiske og geologiske vilkår, og passer dermed inn her.



Figur 2.2.1: Kart som synar dei anortosittiske førekomstane i Noreg. (Wanvik, 2000)

2.2.1 Sogn-Voss anortositten

2.2.1.1 Geografisk oversikt

Sogn-Voss anortositten er Vest-Europas største førekomst av Anortosittiske bergartar. Bergartene dekkjer eit areal på over 700 km², og det glasialt eroderte fjordlandskapet i Sogn og Nord-Hordaland avslører ein stor mektigheit (Wanvik, 1999). Geografisk sett er førekomsten delt i to. Den nordlege delen (1) finn ein i Sogn og strekker seg frå Dyrdal til Kinsedal i Lustrafjorden. Den sørlege delen (2) ligg i Nord-Hordaland og består av eit større massiv mellom Mjølefjell og Gudvangen med fleire mindre omkransande anortosittkroppar (fig. 2.2.2)

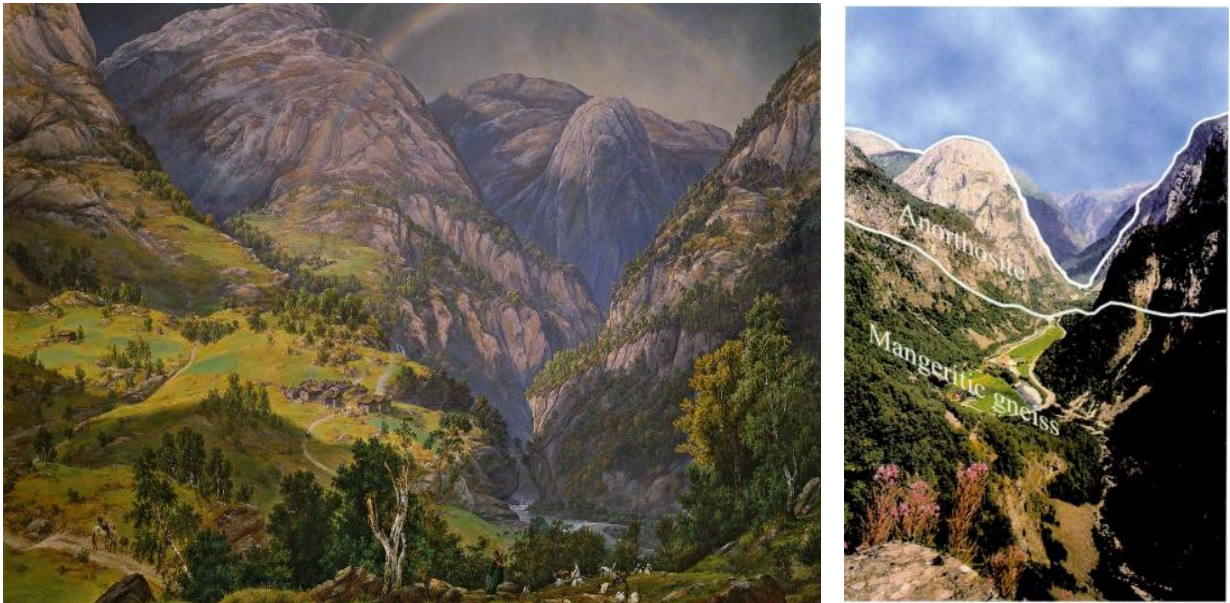
Spesielt i den sørlige delen kjem mektigheita godt fram. Gudvangen- Mjølefjell-massivet har ein mektigheit på meir ein 1200 meter (Bryhni, Brastad, & Jacobsen, 1983). Lenger mot nord i Fresvikområdet er det antyda at anortosittane har ein mektighet på oppimot 2000 meter (Wanvik, 2000). Gode dømer på den store mektigheita ser ein mellom anna i Nærøydalen og i fjellet Bleia ved Aurlandsfjorden som ragar 1800 moh. (Wanvik, 2000).



Figur 2.2.2: Kart over Sogn-Voss anortositten (Wanvik, 2000).

2.2.1.2 Ei tektonisk oversikt

Dei Anortosittiske bergartene ein finn i Indre Sogn og Nord-Hordaland er størkningsbergartar som vart danna djupt i den Baltiske kontinentalranden (Lundmark & Corfu, 2008). Bergartane er svært gamle. Dateringar tyder på at dei blei danna for rundt ein milliard år sidan, og at dei har gjennomgått fleire før-kaledonske deformasjonshendingar (Lundmark & Corfu, 2008).

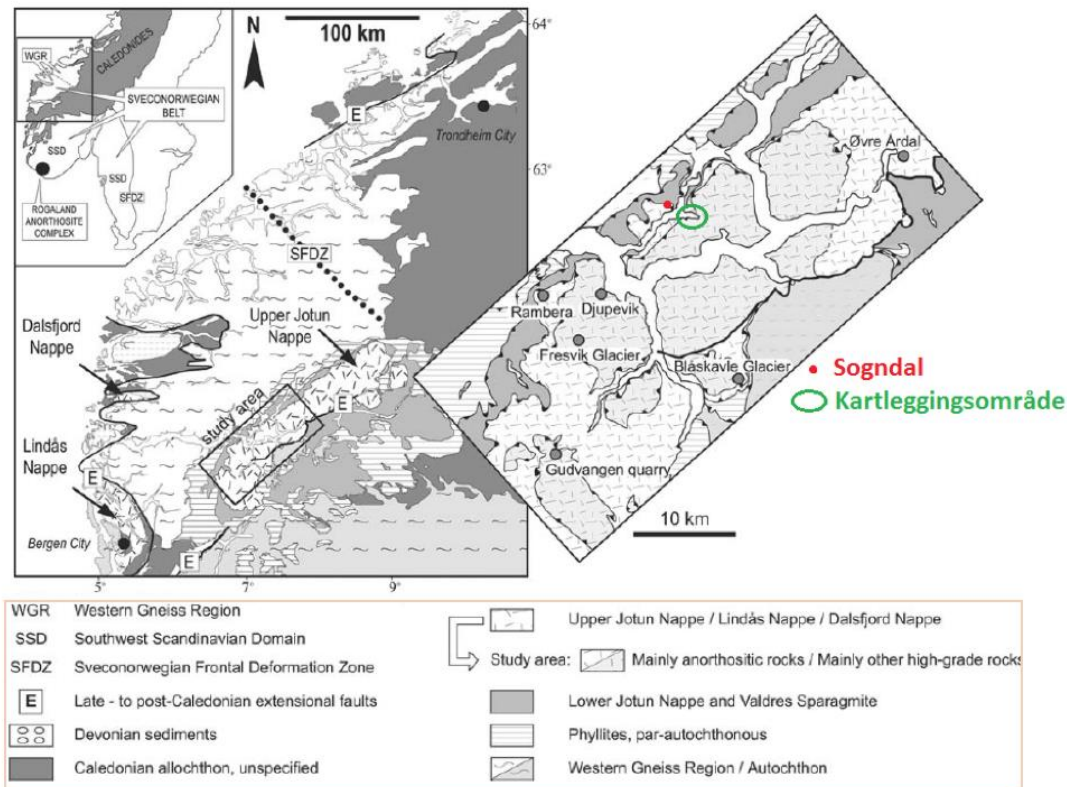


Figur 2.2.3: «Frå Stalheim» J.C Dhal 1842 (venstre) Målarer har gjengitt utsikta frå Stalheim mot Jordalsnuten som stikk opp mellom dalsidene. Legg merke til den sparsame vegetasjonen som er eit typisk landskapstrekk for dei næringsfattige anortosittiane. Til høgre ser ein eit fotografi frå same område, med grensa mellom anortosittane og dei underliggende gneisane markert (Wanvik, 1999, ss. 6, 52).

I den kaledonske orogonesen for omlag 425 millionar år sidan, kolliderte dei to kontinentane Baltica og Laurentia og danna ei av dei største fjellkjedene i jordas historie (Bryhni, Nøttvedt, Ramberg, & Rangnes, 2013). Den baltiske kontinentalranden med anortosittane vart brote opp, imbriknert og skjøve inn over det Baltiske skjoldet (Milnes & Corfu, 2008). Bergartane finn ein i dag langt frå sin opphavsstad. Paleo-geografiske rekonstruksjonar antyder at Jotundekket, som anortosittane tilhøyrar, vart transportert opptil 300 km frå nord-vest under den kaledonske innskyvinga. På tross av dei enorme kreftene som har vore i sving under kontinentkollisjonen opptre Jotundekket tilsynelatande som eit massivt krystallinsk skyvedekke, som relativt sett er lite prega av kontinentkollisjonen (Milnes & Corfu, 2008).

At Jotundekket har overlevd den lange transporten utan omfattande nedknusing og deformasjon vert forklart med at dekket har vært skyvd på oseanske sedimenter/skifer frå kambrosilur (Bryhni, Nøttvedt, Ramberg, & Rangnes, 2013). Originale restar etter desse bergartane kan ein i dag finne som folda, forkasta og stadvis fossilrike skifer i Oslo området. Under Jotundekket er desse bergartane omdanna til fyllitt medan dei er omdanna til glimmerskifer lengre vest, mot baklandet av den kaledonske orogenen.

Den låge friksjonsmotstanden ein finn i oseanske avsetningsbergartar samstundes som at inneklemt vatn truleg har redusert kornkontaktrykket og smurt glidesona forklarar kanskje korleis Jotundekket har overlevd den lange transporten utan betydelig deformasjon (Bryhni, Nøttvedt, Ramberg, & Rangnes, 2013).

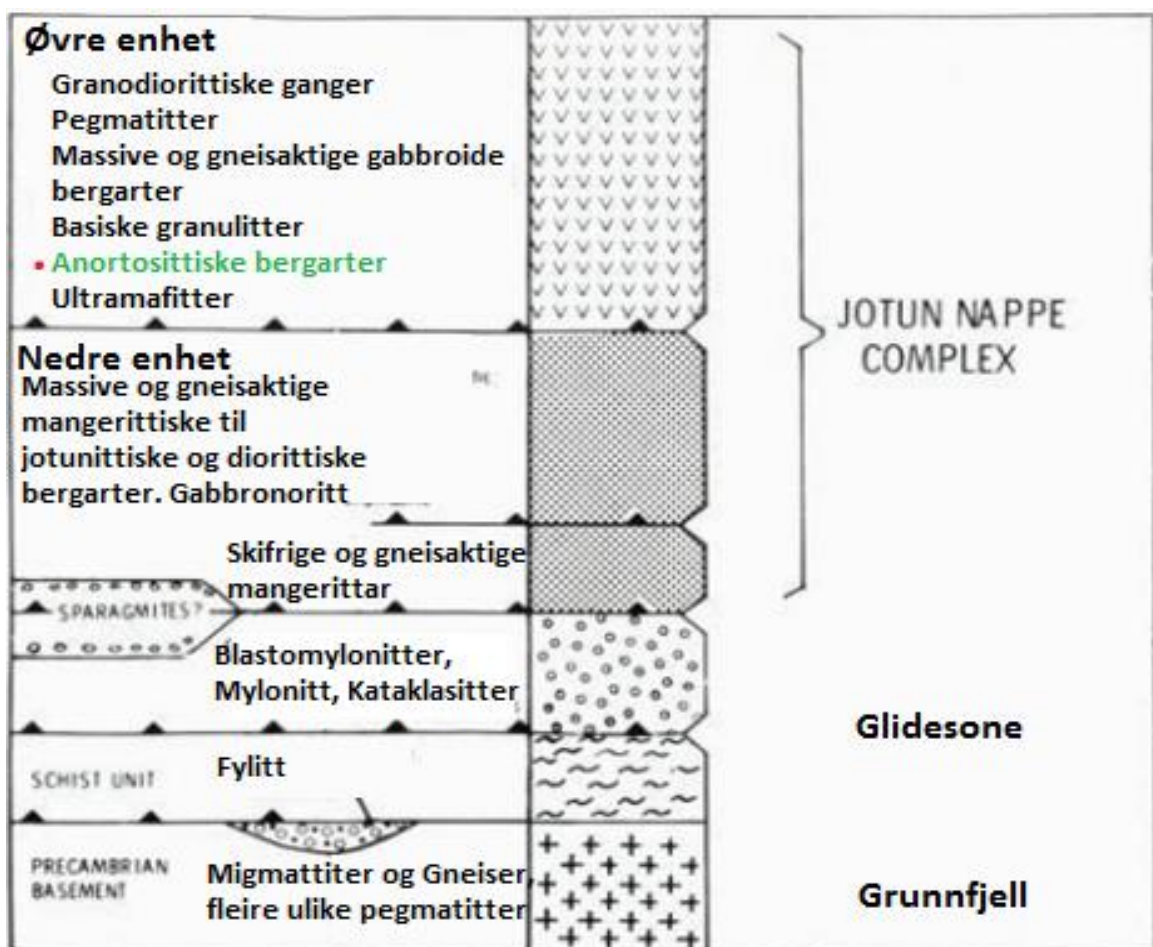


Figur 2.2.4: Kart over Jotundekket og studieområdet (Lundmark & Corfu, 2008).

Sogn-Voss anortositten utgjer saman med andre prekambriske bergartar den øvre eininga av Jotundekket (fig 2.2.4). Eininga kan igjen kan delast i to basert på komposisjon og historie. Den eldste delen består av opptil 1.6 milliardar år gamle bergarter truleg danna under den gotiske perioden (Corfu & Andersen 2002). Litologisk består den av bergarter frå

gabbrofamilien i tillegg ulike gneisar, og disse utgjør mellom anna landets høgaste fjelltoppar i Jotunheimen

Den andre delen består av dei yngre anortosittiske bergartane som ligg lenger mot sørvest. Denne delen av øvre Jotundekket har blitt nedforkasta langs Lærdal-Gjende forkastninga og utgjør hengblokka i det som den berømte geokjemikeren VM. Goldschmidt døypte «Faltungsgrabenen» (Milnes & Corfu, 2008).

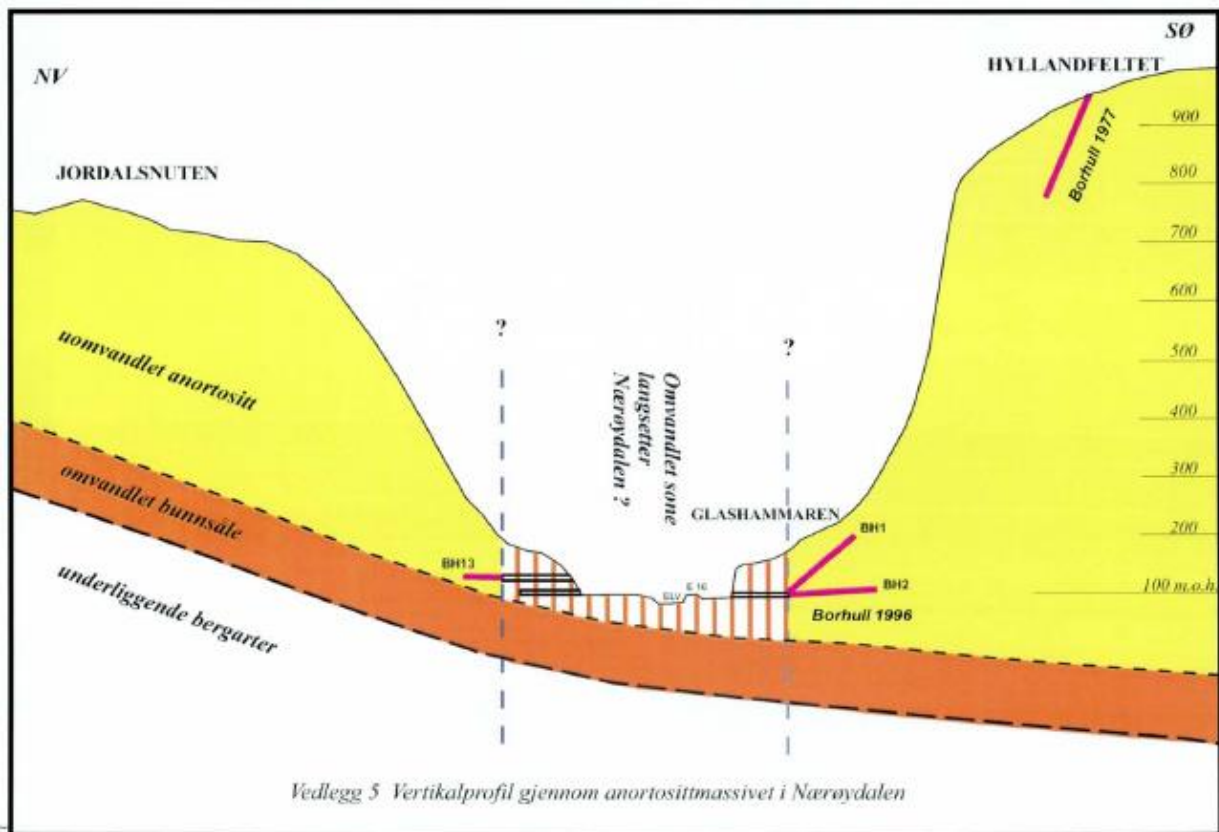


Figur 2.2.5: Forenkla og redigert oversikt over Jotundekketts samansetning (Bryhni, Brastad, & Jacobsen, 1983)

Under dei anortosittiske bergartane har ein Jotundekketts nedre eining der ein mellom anna finn mangerittiske og jotunitiske bergartar (Qvale, 1980). Slike bergarter finnar ein òg i

forbindelse med andre proterozoiske anortosittførekomster og disse hypersthenførende bergartane er mellom anna tolka til å vere eit resultat av magmatisk differensiering relatert til danninga av plagioklassmelta (Corfu, 2004).

Overgangen mellom Jotundekket to deler er prega av interne skyvegrensar og sterk deformasjon (Bryhni, Brastad, & Jacobsen, 1983). Mot grensa til den nedre eininga av Jotundekket har den kalsiumrike anortositten vorte omdanna til en mjølkekvit og finkornet albittisk anortosittversjon (Wanvik, 1999). Den omdanna botnsåla har enkelte stader ein mektigheit på opptil eit par hundre meter (fig. 2.2.6). Fleire har peikt på den tektoniserte kontakten og reist spørsmål om dei to einingane er separate skyvedekker som vart sidestilt under den kaledonske fjellkjededanninga. Derfor er det usikkert om ein kan trekke ein direkte magmatisk link mellom anortosittenane og dei magerittiske gneisane (Lundmark & Corfu, 2008) (Qvale, 1980) (Bryhni, Brastad, & Jacobsen, 1983).



Figur 2.2.6: Snitt gjennom Nærøydalen (Wanvik, 1999, s. 60), som syner mektigheit til den omdanna bunnsåla

2.2.1.3 Ei litologisk oversikt

Litologisk er det stor variasjon internt i anortosittkomplekset. Generelt sett kan en sei at dei nordlege områda av Sogn-Voss anortositten har ein større andel mafiske mineral enn massivet ein finn i sør (Wanvik, 2000). Dei nordlige områda består hovudsakeleg av polymetamorfe leucogabbroide bergartar med 10 – 35 prosent mafiske mineral (Wanvik, 1999). Pyroksenar som ofte er omdanna til grønleg amfibol og granat er dei vanlegaste mørke minerala. Dei opptreer som flekker, band og koronastrukturar. Anortositt i definisjonens rette forstand førekjem i enkelte områder ved Eidsfjord, Kolarbotn, Dyresdal, Kinesdal og ved Reinspelnosi (Wanvik, 1999). I ein oversiktsrapport utgitt i forbindelse med leiting etter drivverdige anortosittførekomstar er desse rene felta i nord beskrive som relativt små (Qvale, 1980).

Den sørlige delen av anortosittkomplekset Gudvangen/Mølefjell massivet har derimot svært reine førekomstar. Anortositt med 5-10 prosent mafiske mineral dominerer i det 145 km² store massivet (Wanvik, 1999). Det er hovudsakleg amfibol og epidot som er dei dominerande mørke minerala i tillegg til mindre mengder biotitt og kloritt (Wanvik, 2010, 1999). Ein finn òg pyroksen samt nokre granat, men det kan virke som at det er ei meir lågmetamorf mineralsamansetning i dei sørlege områda enn i nord.

Anortositten i Sogn og Voss er for det meste medium til grovkorna med ein kornstørrelse på opptil ein centimeter. Fargen på anortositten varierer mellom kvit, lysegrå, fiolett og raudbrun. Dei ulike fargenyansane skuldast inneslutningar av sub-mikroskopiske Fe- og Fe-Ti-oxid, og reflekterar nødvendigvis ikkje feltspatkjemien (Wanvik, 1999). Unntaket er den lett gjenkjennelege kvite og finkorna anortositten ein mellom anna finn i grenseområdet mellom anortositten og dei mangerittiske gneisane. Anortositten her er natriumrik og har eit anortitt-innhald på omlag 20 prosent (Wanvik, 2000).

Ulike gangbergartar opptreer regelmessig i øvre del av Jotundekket. Ein finn tidlege gabbroide gangar, i tillegg til enkelte pegmatittar (Wanvik, 1999). I området frå Kaupanger til Årdal har ein granittiske gangar som varierer i breidde frå centimeter til titals meter (Lundmark & Corfu, 2008). Gangbergartane i dette området har tidlegare har vore feilaktig tolka til å vere trondhjemitiske gangar av prekambrisk alder (Koestler, 1982) men nyare dateringar synar at gangane er knytt til den kaledonske orogonesen (Lundmark & Corfu,

2008). Disse gangane er svært interessante i geologisk samanheng fordi dei er analoge til intrusjonar ein finn i andre skyvedekker, dei er berre tilstade i den øvre delen av Jotundekket og fordi dei viser teikn til deformasjon som gjenspeglar kaledonsk tektonikk (Lundmark & Corfu, 2008).

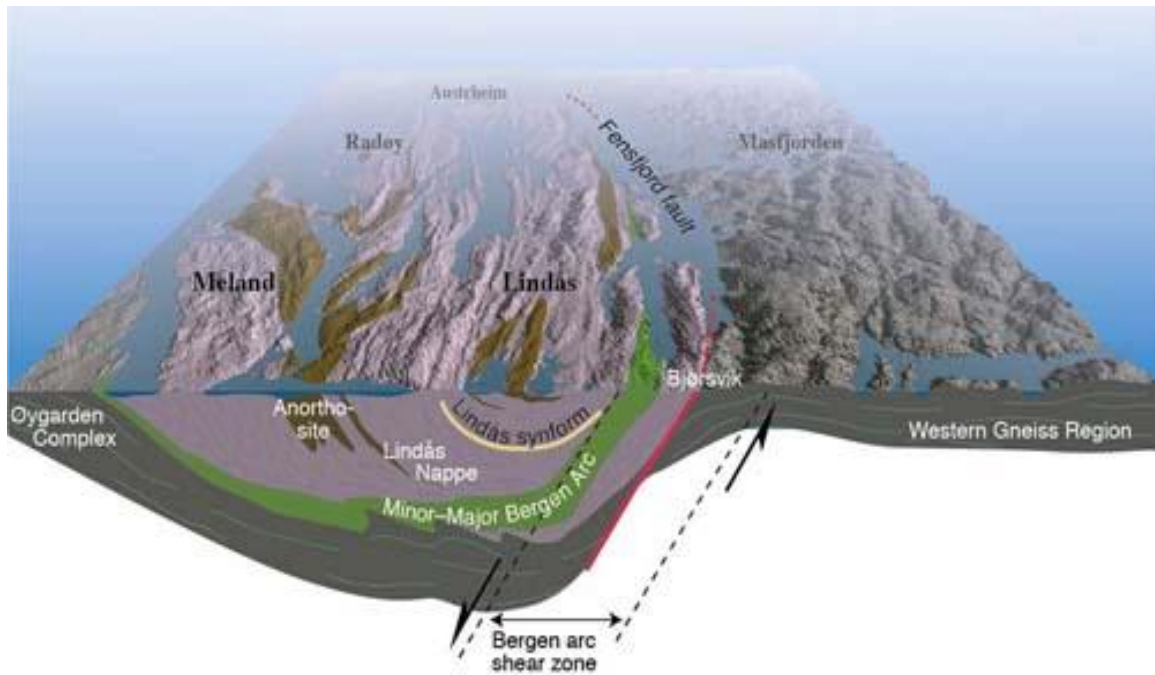
2.2.2 Lindåsdekket

Lindåsdekket er eit kaledonsk skyvedekke plassert i ein fasinerande geologisk provins namngitt Bergensbuene (figur 2.2.7). Lindåsdekket er òg eit kaledonsk skyvdekke som består av polydeformerte anortosittiske, mangerittiske, charnokittiske og gabbroide bergartar og som minner om Jotundekket både i litologi og metamorfosegrad (Lundmark & Corfu, 2008) (Lundmark A. , Corfu, Spürgin, & Selbekk, 2007) (Lundmark & Corfu, 2008). Anortosittane i Lindåsedekket dekkjer eit areal på ~75 km² og utgjer saman med andre kaledonske dekker Bergensbuene (Wanvik, 2000). Dette er ein storskala boge-liknande struktur ytst i Hordaland som opnar seg mot Norskehavet og omkransar Bergen by.



Figur 2.2.7: Bergensbuene (Bryhni, Nøttvedt, Ramberg, & Rangnes, 2013, s. 226).

Her opptrer lindåsedekket over andre skyvedekker tolka til å være ein del av øvre allokton (Kühn, Glodny, Austrheim, & Råheim, 2002). På grunn av mange likskapar har det gjennom tida vore mykje debatt om kva grad Lindåsdekket kan korrelerast med Jotundekket, og vert reikna som midtre allokton.



Figur 2.2.8: Eit snitt av Bergensbuene frå Haakon Fossens heimeside (Fossen, NA)

Mineralogien og strukturar i dei to skyvedekka vitnar om forskjellige deformasjonsforløp under den kaledonske orogonesen. Lindåsdekket vart i eit tidlig stadium av den kaldeonske fjellkjedefoldinga pressa ned til ekstreme trykkbetingelser (Kühn, Glodny, Austrheim, & Råheim, 2002). I ein liten del av Lindåsdekket på Holnsøya finnein i dag ekologittiserte skjærsoner som vitnar om djupdykket under kontinentkollisjonen. Ekologitt er endå ikkje kjent frå Jotundekket og medan det er usikkert kva som skjuler seg djupt i dei sentrale delane av Jotundekket, tydar utspring av den fyllittiske glidesona på ein mindre belasta posisjon i kaledoniene (Milnes & Corfu, 2011).

Dei to skyvedekka har på tross av dette mykje til felles og dei har blitt sett i samanheng frå dei først blei omtalt som Bergen-Jotun stammen av V.M Goldschmidt i 1916 (Wanvik, 1999). Dei har den same litologiske samansetninga (AMCG) som har vore gjennom fleire av dei same før-kaledonske metamorfosehendingane (Lundmark & Corfu, 2008) (Griffin,

1971). Lindåsdekket har ein minimumsalder på 951±2 millionar år, fastslått på grunnlag av ein datert jotunittisk intrusjon. Denne er igjen tolka til å vere relatert til AMCG-magmatisme og dateringa er ikkje langt unna alderen til Sogn-Voss anortositte (Lundmark & Corfu, 2008).

Det som taler i mot eit felles opphav i den baltoskandiske marginen, er at Lindåsdekket kviler på den øvre dekkeserien. Dersom dei to skyvedekka kom frå same plass skulle det utifrå enkel «tektonisk logikk» bety at dei fekk den same tektonostratigrafiske posisjonen i kaledoniane. I diskusjonskapittelet vil vi gå litt nærmare inn på korleis dei ulike anortositteprovinsane i Noreg kan vere relatert til kvarandre og kva slags bevis som ligg til grunn for dei ulike samanlikningane.

Med tanke på utvinning av aluminiumsråstoff er anortositteane i Bergensbuene lite interessante på grunn av sitt låge kalsium- og aluminiumsinnhold ($An_{<50}$) (Wanvik, 2000). Sulfidmalmar er vanlig i dei proterozoiske anortositteførekommene og utvinning av kobbar, nikkell og jern har tidlegare vore ei viktig næring i området. I dag er dei fleste gruvene nedlagt og kommersielt sett er det begrensa interesse for anortositteane i området (Porter, 2014).

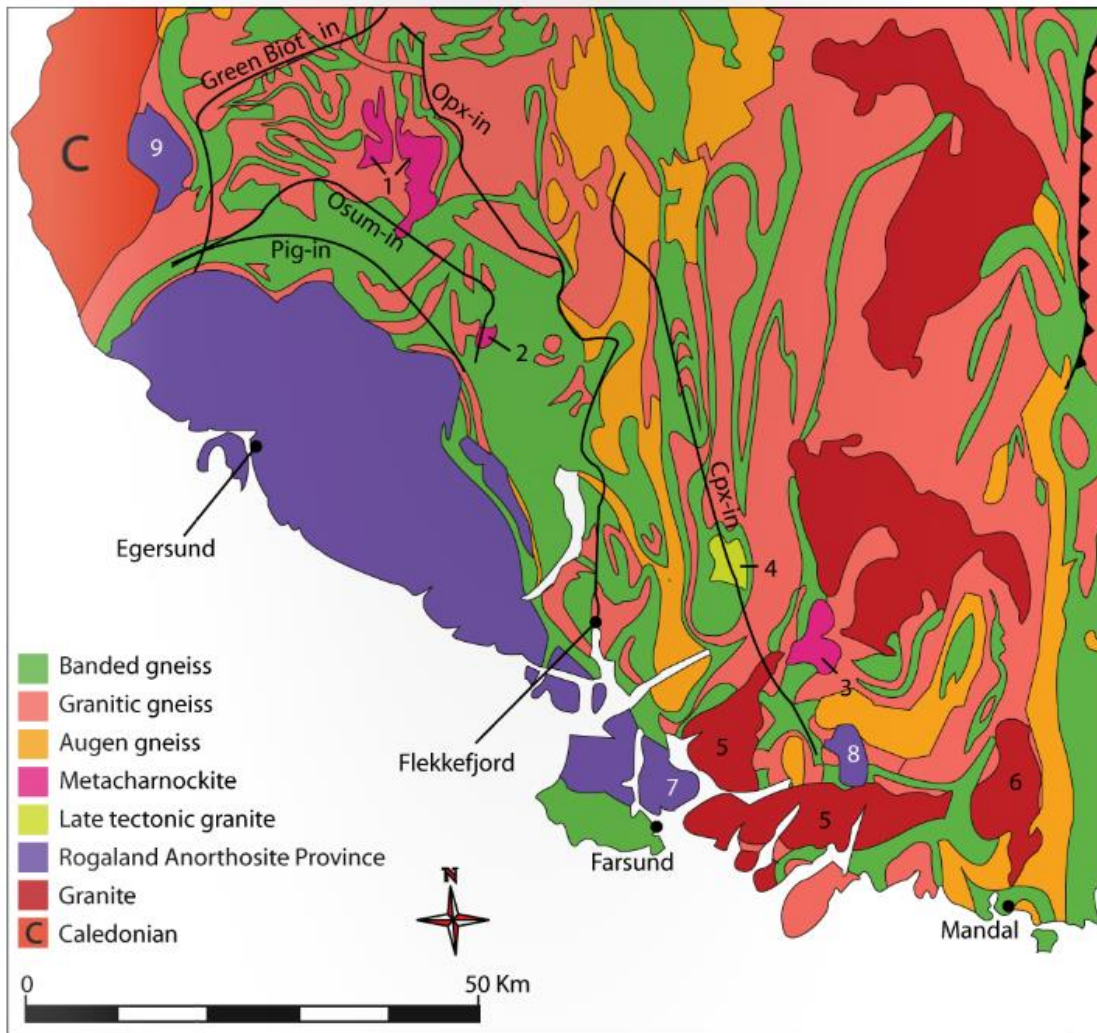
2.2.3 Rogaland anortositteprovins

Rogaland anortositteprovins består av fleire dypbergartskroppar, der tre av disse er distinkte massiv-type anortositteplutoner. Området ligg på sørvestlandet og strekkjer seg frå Jæren i Rogaland til Farsund i Vest-Agder. Det har eit samla areal på 1700 km² (Bryhni, Nøttvedt, Ramberg, & Rangnes, 2013) og anortositteane utgjer omlag 500km² (Wanvik, 2000).

Plutonane tilhøyrar det stadeigne grunnfjellet og danner eit heiet terreng med lavt relieff og sparsam vegetasjon. Uran-bly dateringar av dei ulike massivane gjev ei gjennomsnittleg alder på 932±3 millionar år (Schärer, Wilmart, & Duchesne, 1996). Rogaland anortositteprovins er dermed ein av dei yngste førekommene i det verdsomspennande beltet med proterozoiske anortosittekompleksar (Schärer, Wilmart, & Duchesne, 1996).

Provinsen består av fleire ulike størkningsbergartar, først og fremst anortositte og noritt, men også mangeritt og granitt (Bryhni, Nøttvedt, Ramberg, & Rangnes, 2013). Gangar av monzodiorittisk (jotunittisk) samansetning gjennomfører dei fleste kroppane. Bergartane rundt intrusjonane består hovudsakelig av ulike typar eldre gneisar. Desse vertsborgartane

bærer preg av dei magmatiske intrusjonane som trengte seg opp i skorpa for nær ein milliard år sidan. Varmen frå smelta førte til kontakt-metamorfose i ein titals kilometer brei sone rundt intrusivane (Bryhni, Nøttvedt, Ramberg, & Rangnes, 2013). Ein finn mellom anna det sjeldne mineralet osumilitt i migmatittiserte gneisar i utkanten av provinsen.



Figur 2.2.9: Geologisk kart over sørvestlandet. Henta frå ekskursjonsguiden til Magma Geopark (Wilson, Robins, & Thjømmøe, 2008).

Bergartane i Rogaland anortositprovins gjev eit godt innblikk i korleis størknings-bergartar blir til og kva slags prosessar som føregår i eit magmakammer. Eit prakt eksempel ser ein i den lagdelte Bjerkreim-Soknedalintrusjonen. Magmakroppen vart danna på omtrent 20 km-skorpedjup og vart avkjølt over lang tid (Wilson, Robins, & Thjømmøe, 2008). Dette har ført

til ein lagvis oppbygging, som skyldast vekslingar mellom periodar med fraksjonert utkrystallisering og periodar med ny tilførsel av magma. Intrusjonen består av heile den anortosittrelaterte AMCG-bergartserien og har av den grunn vore viktig for forståelsen av dei magmatiske prosessane som ledar til plagioklasakkumuleringar. Fordi fjellgrunnen i Sør-Rogaland er eit snitt gjennom magmakammeret, tilbyr den fantastiske studiemuligheiter- Området er i dag ein del av det UNESCO støtta globale geopark nettverket (GGN) som har til hensikt å formidle geovitenskap (Wilson, Robins, & Thjømmøe, 2008).

Rogaland Anortosittprovins har i forhold til Sogn-Voss anortositten ein meir natriumrik samansetning (An_{40-55}) og er derfor mindre eigna til syreløysing og aluminautvinning (Wanvik, 1999). Anortosittførekosten i Rogaland har likevel ein enorm verdi som kjelde for råstoff og naturstein. Massiva har store førekomstar av Titianoksid, og uttak av ilmenitt føregår i dag ved Tellnes. Ein en av verdas største titangruver Titania A/S finn ein i provinsen. Denne gruva dekker nærmare 7 prosent av verdens titankonsum (Wanvik, 2010). I Rogaland finn ein i tillegg anortositt med labradorisering som på grunn av sitt flotte fargespel (figur 2.2.10) vert tatt ut i blokkformat og brukt til natursteinsformål.



Figur 2.2.10: Anortositt frå Hidra med labradorisering. Bilete pryder forsida av boka «Norges mineraler» (Hovland, 2011)

Danninga av fleire proterozoiske massiv-type anortosittkompleks er knytt til den Svekonnorvegiske-Grenvilliske-orogonesen. Tidlegare var magmatiske prosessar i forbindelse

med fjellkjedesykluser den mest anerkjente årsaksforklaringa til danninga av anortosittmassiv. Dateringa av Rogaland anortosittprovins ga derimot ein alder som ikkje korrelerar med ein slik fase i den Svekonorvegiske orogonesa og dateringar i Rogaland anortosittprovins vore med å bygge opp under den anorogene danningsteroa av anortositt (Schärer, Wilmart, & Duchesne, 1996) (Lundmark & Corfu, 2008).

2.2.4 Andre førekomser

Som nemnt har Noreg fleire Anortosittførekomster. Dei tre som er beskrive i dette kapittelet er dei største og truleg dei viktigaste i nasjonal samanheng. Ein har mellom anna fleire betydelige førekomstar i Nord-Norge. Desse finn ein ved Lofoten og Vesterålen i Nordland, på Ringvassøy i Troms og på Øksfjordhalvøya i Finnmark (Korneliussen, 2012), men ressurpotensialet i desse førekomstane er mindre kjent. Uansett er ikkje hensikten med dette kapittelet å ramse opp alt ein veit om alle Noregs førekomstar. Tanken var å gjengi litt av den omfattande litteraturen om Noregs største anortosittprovinser med tanke på geografi, historie og særtrekk i høve til Sogn-Voss anortositten.

2.3 ANORTOSITTEN SOM EIN RESSURS

Sogn-Voss anortositten er ein nasjonal ressurs både med tanke på dagens nytteområder og førekomstens framtidige potensiale. Bergarta er både egna som byggeråstoff og den er godt kjent som eit alternativt råstoff for aluminiumsproduksjonen i Noreg (Wanvik, 1999). Førekomsten har vore av stor industriell i lang tid, og er gunstig til mange formål på grunn av beskaffenhet, volum og nærleik til dypvannskaier. Anortositten har ei lang rekkje av potensielle bruksområder, og følgjande liste gir eit inntrykk av mangfaldet (Wanvik, 1999):

- Syreløysing av anortositt kan gje: polyaluminiumklorid (polymer), aluminiumsulfat, kalsiumkarbonat, kalsiumsilikat, kalsiumnitrat, silikagel, zeolittar, ammoniumnitrat, aluminiumhydroksid og alumina.
- Sinterprosessar av anortositten kan gje: alumina, kalsiumsilikat, sement, wollastonitt og zeolitt.

- Direkte elektrolyse av anortositten kan gje: aluminium- og silisium-metall.
- Eldfast materiale, som sperreskikt i aluminiumsomnar.
- Slaggdanner ved ferrosilisiumsproduksjon.
- Råstoff for steinull-produksjon.
- Pukk.
- Tilslag i lyse vegdekker og betongelement.
- Abrasiver, skuremiddel i såpe, tannkrem.
- Fyllstoff i platt o.l.
- Råstoff i keramikk.
- Råstoff i keramiske fliser
- Fluksmiddel i porselen
- Industriegolv

Mest merksamhet har førekomsten fått når det gjeld som råstoff for aluminiumsframstilling, og det var dette som fanga interessa vår. Vi vil derfor følgje opp denne kortfatta innleiinga med ei gjennomgang av dagens aluminiumsbransje og det framtidige potensialet til anortosittførekomstane i Sogn og Hordaland.

2.3.1 Dagens aluminiumsproduksjon

Aluminium er eit av dei viktigaste metallane som vert nytta i samfunnet. Metallens kombinasjon av fysiske eigenskapar gjer at det egner seg i eit mangfald av produktar. I det moderne dagleglivet treng ein berre å kaste eit kjapt blick rundt seg for å få eit inntrykk av metallens betydning. I tillegg til øl- og hermetikkboksar finns det og døme på viktigare nytteområder. På grunn av si lette vekt og elektriske konduktivitet vert for eksempel aluminiumstråd anvendt til langdistanseoverføring av elektrisitet (Menzie, et al., 2010, s. 4). Aluminium si styrke, låge vekt og allsidighet har og mange nytteområder i transportsystem som bilar, jernbanevogner og fly, noko som er med på å redusere forbruk av drivstoff og tilhøyrande forureining og utgifter.

2.3.1.1 Bauksitt

Metallisk aluminium opptre på grunn av sin reaktivitet ikkje i naturen, men bundet til andre grunnstoff finns det i større mengder enn noko anna metall. Råstoffet til aluminiums-

industrien er aluminiumsoksid (alumina), som hovudsakleg vert framstilt av den raude jord/bergarten bauksitt som vert danna ved kjemisk nedbryting av ulike silikatbergartar. (Hydro i Norge, 2013)

Bauksitten kan innehalde over 50 prosent aluminiumsoksid (Al_2O_3) (Plunkert, 2000) og teknisk og økonomisk sett er bauksitt det mest rasjonelle råstoffet for framstilling av aluminium. Jordarten opptre vesentleg i tropiske- og subtropiske strøk kvar varmt og fuktig klima fører til omfattande kjemisk forvitring. Store bauksittførekomstar finn ein i land som Guinea, Brasil, Australia og Jamaica, der dei ligg som eit fire til seks meter tjukt lag under eit tynt stykke jord og vegetasjon (Breivik & Carlsen, 2011).

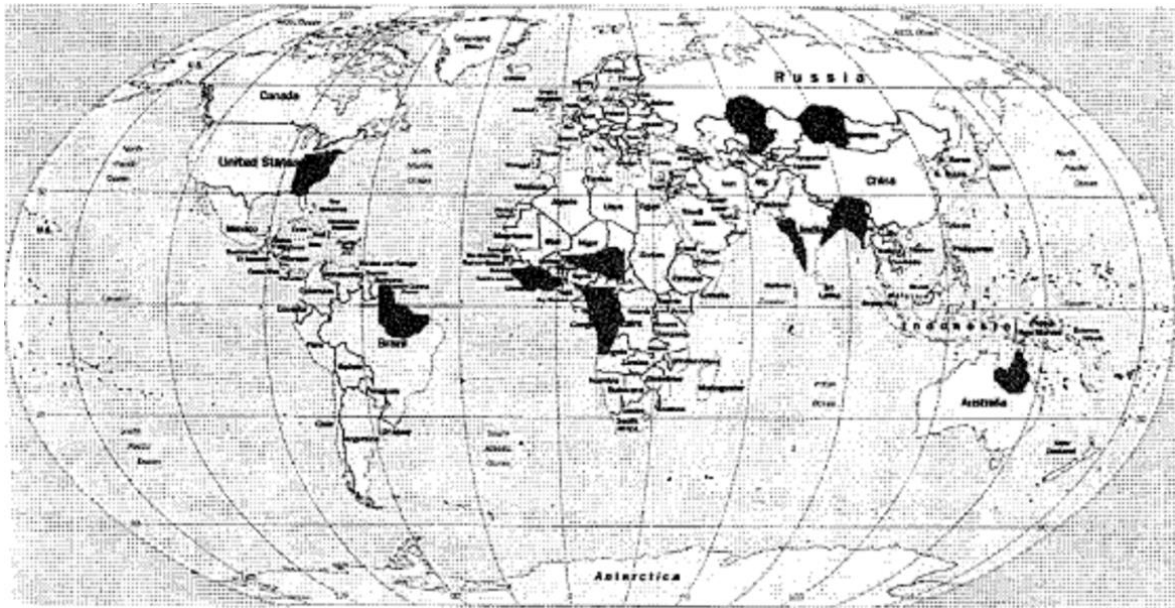
Bauksitt er ein hetrogen jordart og består hovudsakelig av eitt eller fleire aluminiumhydroksid-mineral, samt kvarts (SiO_2), jernoksid (Fe_2O_3), titanoksid (TiO_2), ulike aluminiumsilikat samt bergartsfragmenter og diverse ureinheiter. Dei viktigaste aluminiumhydroksid-minerala som opptre i bauksitten er Gibbsitt ($\text{Al}(\text{OH})_3$), böhmitt ($\text{AlO}(\text{OH})$) og diaspor ($\text{AlO}(\text{OH})$) (Plunkert, 2000). Hovudforskjellen mellom disse tre formane er at gibbsitt er eit trihydrat, medan böhmitt og diaspor er monohydrater. Trihydrat inneheld om lag 50 prosent aluminiumsoksid, medan monohydratene inneheld rundt 30 prosent. Gibbsitt vert oftast funne i djuptgåande gruver, medan monohydratene finst i gruver lengre mot overflata (Breivik & Carlsen, 2011).

2.3.1.2 Bauksitt i eit globalt perspektiv

Fordelinga av bauksittproduksjonen reflekterer den geologiske historia og dei klimatiske faktoreane som favoriserer danning av bauksitt (figur 2.3.1) samt dei økonomiske omsyna i høve til lønnsutgifter, skattar og andre reguleringer. Basert på data frå MYB (USGS Minerals Yearbook) vart drygt 183 millionar tonn (Mt) bauksitt produsert i 2006 (tabell 2.3.1) (Menzie, et al., 2010, s. 9).

I følge heimesida til Hydro er dagens (2013) kjente bauksittreserver på om lag 29 milliardar tonn. Reservane er anslått til å kunne forsyne oss med aluminium i meir enn 100 år. Hydro meiner vidare at det kan vere uoppdaga reserver som vil auke det samla omfanget til 55 – 75 milliardar tonn og dette utvidar i så fall tidsperspektivet til 250 – 340 år (Hydro i Norge, 2013). Detaljer i slik «kvalifisert gjetting» skal ein ikkje legge for stor vekt på. Etterspørselen av aluminium er til dømes knytt til befolkningsvekst, velstandsutvikling,

innovasjon, nye bruksområder, politisk utvikling og andre faktorar som ein treng overnaturlige evner for å fastslå. I tillegg er store delar av dei totale reservane (29 mrd. tonn) rekna som økonomisk utilgjengelig i dag (Breivik & Carlsen, 2011). Desse kan verte lønnsamme på sikt, men auka priser vil og gjere eit substitutt for bauksitten meir ettertrakta. Poenget med å trekkje fram desse tala er for å syne at ein har store bauksittførekomstar samtidig som ein ikkje har uendeleg tilgang på råstoffet.



Figur 2.3.1: Verdas bauksittførekomstar (Johansen, 2012).

2.3.1.5.2 Raffinering av buksitten - Bayerprosessen

Aluminiumsoksidet alumina Al_2O_3 utgjør 30 – 50 prosent av minerala i bauksitten og det fins fleire måtar å ekstrahere aluminaen frå minerala. Den mest etablerte metoden vart utvikla av austerriske Karl Bayer rundt 1890 og er kjent som bayerprosessen.

Det første steget i prosessen er å fjerne jernoksid og silikat frå råstoffet. Bauksitten vert behandla med kaustisk soda (lut, sterkt basisk) under temperaturar på ~270 grader (Hind, Bhargava, & Grocott, 1999). Størsteparten av dei aluminiumsrike minerala vil da bli løyst opp. Ved å tilsette litt gibbsitt under avkjøling av gjørma setter ein i gong ein «spireprosess» av dette mineralet (Hind, Bhargava, & Grocott, 1999), medan silikat vert felt ut som til dømes albitt ($NaAlSi_3O_8$) frå den natriumrike massa (Stølen, NA).

Etter avsetning vil ein få ein naturleg sortering og ved vidare filtrering kan ein skilje dei ulike komponentane. Gibbsitten ($\text{Al}(\text{OH})_3$) blir fjerna frå dei sær s basiske restmassane. Deretter vert det «glimmerliknande» hydroksidmineralet vaska og deretter «kalkbrent» for å fjerne krystallvatnet i mineralet utvinne alumina (Hind, Bhargava, & Grocott, 1999).

«Kalkbrenning» er gamalt omgrep frå mørtelbransjen som også nyttast i nokre andre samanhengar. I forbindelse med å gjere gibsitten om til alumina er ein vanleg prosess å steike gibsitten under høg temperatur (>1000 grader) under atmosfæriske forhold (The International Aluminium Institute, 2012).



Som nemnt i første avsnitt utgjer aluminaen rundt 30 – 50 prosent av bauksitten. Det betyr at ein sit igjen med 1-1,5 tonn restmasse for kvart tonn alumina. Oppløyte organiske komponentar som til dømes røter gjev restmassa ein mørkeraud farge. Denne avfallsmassa er kjend som «red mud», er sær s basisk og inneheld kjemiske komponentar som er problematiske i høve til menneske og miljø.

2.3.2 Vidare prosesseing; aluminiumsframstilling

2.3.2.1 Kraftforbruk ved elektrolyse

Nesten heile verdas aluminiumsproduksjon vert framstilt ved Hall-Héroult-prosessen. I denne prosessen vert aluminium framstilt frå aluminiumsoksid ved ein kominasjon av elektrolyse og reduksjon med karbon (Stølen, NA). Elektrolysen skjer ved cirka 1000 °C og er sær s energikrevjande. Aluminiumsbransjen er svært forskingsintensiv og teknologiske forbedringar har redusert energiforbruket frå 40 kWh per kilo produsert aluminium i byrjinga av 1900-talet til om lag 12 – 14 kWh i dei mest effektive anlegga i dag (Stølen, NA). Det er i dag stor variasjon i framstillingsevne per verk i høve til energiforbruk, mellom anna på grunn av stor innovasjonssatsing. Dømet på neste side illustrerer eit typisk energiforbruk ved elektrolyse av alumina, og er tatt med for å teikne eit bilde av kva slags incentiv som driv utvikling og lokalisering av aluminiumsverk (dømet er lånt frå Breivik og Carlsen 2011)

Straumstyrken som vert ført gjennom anoden ved ein typisk elektrolyseprosess variera frå 50.000 til 350.000 amper, medan spenninga er på mellom fire og fem volt. Effekten (watt) vert berekna ved å multiplisere straumstyrken med spenninga. Effekten for ein elektrolyseomn med straumstyrke 200 kA (kiloamper) og fire volts spenning vil då vere:

$$200kA \times 4V = 800kA$$

På ein time vil denne omnen bruke 800 kWh (kilowattimar). Årsforbruket til den eine omnen vert dermed:

$$800kWh \times 24t \times 365dg = 7.008.000kWh = 7.008MWh = 7GWh$$

Ut frå eksempelet kan ein elektrolyseomn forbruke over 7GWh (gigawattimar) på eitt år.

For å sette kraftforbruket til elektrolyseprosessen i perspektiv, kan vi samanlikne dette forbruket med kraftforbruket til ein gjennomsnittleg norsk husstand, som i 2009 låg på 20.400 kWh årleg. Dette tilseier at éin elektrolyseomn har same kraftforbruk som 340 husstandar. Dersom vi antek at eit aluminiumsverk har 300 omnar, noko som det ofte har, vil verket bruke:

$$7GWh \times 300omnar = 2100GWh = 2,1TWh/år. \text{ Og dette berre frå elektrolysen.}$$

Til samanlikning brukte heile Bergen kommune 2 TWh (terawattimar) i 2009.

Endring i pris og grad av tilgang til energi fører til skiftande lokalisering av aluminiumsverk. Tilgjengelegheita til naturgass har til dømes ført til oppblomstring av betydelege produksjonsanlegg i Bahrain og De Forente Arabiske Emiratene. Begge landa produserte over 850 000 tonn aluminium i 2006 (Menzie, et al., 2010, s. 12). Nye aluminiumsverk har vorte utbygd på Island på grunn av tilgjengelegheita til vass- og GEO-termisk kraft, medan fleir verk har vore nedlagt i USA på grunn av auke i energikostnadar (Menzie, et al., 2010, s. 12).

Det er stort sett markedskrefter som avgjer lokaliseringa av aluminiumsverka. Endringar i karbonavgifter og utgifter relatert til karbonutslepp kan i framtida påverke plasseringa til aluminiumsverk (Menzie, et al., 2010, s. 12). Dette kan kanskje gagne den norske aluminiums-industrien som er basert på hydroelektrisitet, men å spekulere i slike scenarior er ikkje vårt fagfelt, og vi prøver å holde oss til relaterte tema. Meiniga bak denne

bakgrunnsdelen er å syne bauksitt som aluminiumsråstoff, faktumet at det finnes alternative aluminakjelder og at en over tid har bygd opp ein betydelig aluminiumsindustri i Noreg.

2.3.2.2 Aluminiumsproduksjon i Noreg i dag

Noreg er i dag Europas største produsent av primæraluminium med ein produksjon på om lag 1,2 millionar tonn per år. Dette på tross av mangel på råstoffet bauksitt og lange transportavstandar til verdsmarknaden. Det er den vasskraftbaserte elektrisiteten som var grunnlaget for den kraftkrevjande industrien som vaks fram frå byrjinga på 1900-talet (Stølen, NA). Anlegga i Noreg er lokalisert i nærleik til rennande vasskraft og skipskaier der det er tilgang til isfrie havnar året rundt. Primæraluminiumsverka i Noreg vert rekna som eitt av dei største brukarane av elektrisk kraft i landet og nokre av anlegga har til og med sine egne hydroelektriske kraftverk (Skotner, NA).

I dag er det sju aluminiumsverk i Noreg som produserer primæraluminium, samt nokre spesialiserte verk som vidareforedlar aluminium.. Den norske aluminiumsindustrien er hovudsakelig basert på import av alumina og vidareforedling gjennom elektrolyse og deretter eksport av produktmateriale. Bedriftene knytt til den norske industrien står for om lag fire prosent av verdsproduksjonen av aluminium. I tillegg har fleire aluminiumsverk betydeleg kapasitet i forhold til omsmelting og resirkulering av metallet (Skotner, NA)

2.3.2.3 Resirkulering av aluminium

Resirkuleringsegenskapane er eit av dei største fordelane med aluminium. Heile 95 prosent av energibruken vert redusert ved omsmelting samanlikna med framstilling av primæraluminium (Breivik & Carlsen, 2011). Gjennbruket er også med på redusere endringar i landskap som følger av gruvedrift og raffinering. Brukt aluminium kan resirkulerast i det «uendelige» utan tap av kvalitet, og ein kan sei at aluminium vert meir og meir energieffektivt for kvar gang det vert resirkulert. Av all aluminium produsert frå slutten på 1800-talet til i dag er rundt 75 prosent fortsatt i bruk, og av all aluminium på marknaden i dag består ein tredjedel av resirkulert aluminium (Breivik & Carlsen, 2011). Av den globale aluminiumsproduksjonen i 2006 på om lag 45,9 Mt vart det utvinna 11,8 Mt

sekundæraluminium frå skrap generert i produksjonsprosessen til aluminium og gamalt aluminiumsmateriale til gjenvinning (Menzie, et al., 2010, s. 11).

2.3.2.4 Ulemper ved dagens aluminiumsproduksjon

I høve til eit dagsaktuelt miljøperspektiv er forbrenning av fossilt brensel eit stort miljøproblem. I 2006 utgjorde klimagass-utsleppa 51 milliardar tonn på verdsbasis. Til saman stod aluminium, kobbar, nikkel og stålindustrien for 2,62 gigatonn, eller rundt 5,2 prosent av dei samla klimagassutsleppa. I følgje U.S. Geological Survey sitt anslag i 2008, medverka aluminiums-industrien med 0,45 gigatonn CO₂. Betydelege mengde klimagassar, her i form av karbondioksid og perfluorkarbon (PFK), vert sloppe ut i forbindelse med gruvedrift, raffinering, elektrolyse og resmelting av metallet (tabell 2.3.1) (Menzie, et al., 2010, s. 31).

Tabell 2.3.1: Framstilling av aluminium frå bauksitt samanlikna med framgangsmåtar for framstilling av andre metall med hensyn til generering av klimagassar (Menzie, et al., 2010, s. 33).

Metal industry	Production, in million metric tons	Greenhouse gas emission, in billion metric tons of CO₂e	Share of world greenhouse gas emissions, in percent	Share of fossil fuel greenhouse gases, in percent
Aluminum	33	0.41	0.8	1.2
Copper	13.5	0.04	0.1	0.1
Nickel	1.4	0.04	0.1	0.1
Steel	1,250	2.13	4.2	6.3

I tillegg til klimagassutslepp fører aluminiumsproduksjon med seg fleire miljømessige ulemper. Eit velkjent problem er handteringa av dei store avfallsmassane frå bauksitt-utvinninga. Frå 2/3 til halvparten av massene frå Bayerproseesen er avfall. Den kjemiske utlutingsprosessen av bauksitten fører til at ei sterkt basisk og raud avfallsgjørme vert produsert (Menzie, et al., 2010, s. 4). Gjørma vert vidare deponert i basseng som risikera utsig

og bristing. Eit eksempel på dette er utsleppet som skjedde i byen Ajka i Ungaren i oktober 2010, der eit bauksittbasseng på om lag éin million kubikkmeter brista og store mengder av raudt bauksittslam fløyma over fleire nærliggande landsbyar, jordsmonnsområder og vassdrag (figur 2.3.2) (Lim, 2014). Problemstillingane i forhold til restmassane er alvorlige og har ført til mange løysingsfokuserte og innovative idear (døme: vannreinsking med den kjemiske massa (Brunori, Cremisini, Massanisso, Pinto, & Torricelli, 2005)). Likevel vert handtering av «red mud» fortsatt ansett for å vere eit av dei største problema knytt til aluminautvinninga i dag.



Figur 2.3.2: Bristing av bauksittbassenget i Ajka i Ungaren i oktober 2010. (Bilde 38 av 38, Gyöergy Varga) (NCB News, 2010)

Andre miljøproblem som følgje av bauksittutvinning kan vere (hydro.com):

- Endring av landskap og innverknad på mangfaldet i det aktuelle økosystemet.
- Landskap som vert påverka av erosjon og avrenning frå gruver når stein og jordsmonn vert fjerna.
- Forstyrning av vassbalansen der bevegelse, kvalitet og fordeling av grunnvatn vert endra.
- Støv og støy forårsaka av gruveverksemd og transport.

- Når det opnast opp nye områder for utgraving av bauksitt fører det ofte til ulovleg tømmerhogst, jakt og liknande.

2.3.3 Anortositten i Sogn-Voss som ei mogleg aluminiumskjelde

Etter V. M. Goldschmidt lanserte ideen om ei aluminaframstilling frå anortositt i 1917 har ein vurdert Sogn-Voss anortositten som ei mogleg kjelde til alumina (Wanvik, 1999).

Wanvik formidlar vidare at anortosittane ein finn her inneheld opptil 30 prosent alumina og kan utvinnast ved å blant anna løyse bergartane i syre. Førekomstane i Sogn-Voss er derfor grundig undersøkt, og ein har nedskrivne rapportar som strekkjer seg over eit tidsrom på over hundre år. Ulike prosessløyisingar har vore prøvd ut, men alle tidligare prosjekt har havarert.

Under 2. verdskrig vart ein fullskala gruve- og transportfasilitet utbygd i Kinsedalen og rundt 400 mann vart satt i arbeid (Wanvik, 2010). Dette var ein ekstraordinær situasjon der råvarepris vart kalkulert saman med sjansen for torpedering av skipslaster og dette førte til at ein satsa stort på å finne ei nær råvarekjelde. Anortositten frå Kinsedalen vart frakta til Hydros fabrikklegg på Herøya, men i 1944 satt eit flyangrep stopper for vidareforedlinga (Søgnen, 2001). Kva slags raffineringmetodar som vart nytta av Hydro er usikkert og vi har heller ikkje funnet ut kva mengder aluminium som vart utvunne under krigsåra.

På midten av syttitalet hadde ein fornya oppmerksomheit rundt anortosittane i Sogn. Som ein reaksjon på opprettinga av Interational Bauxitt Assosiation i 1974 vart Sogn-Voss anortositten på nytt trekt fram som mogleg bauksittsubstitutt (Wanvik, 1999). Organisasjonen vart danna av bauksittleverande land for å styrke forhandlingsposisjonen deira ovanfor utanlandske aluminiumsprodusentar som til dømes Hydro (Deal, 1978). Aluminiumsprodusentane frykta auka utgifter og Anortal-prosjektet som føregjekk i perioden 1975 – 1980 hadde som mål å finne ei alternativ råstoffkjelde til bauksitten.

Prosjektet var eit samarbeidsprosjekt av fleire norske interesser mellom anna Elkem og gjekk ut på å kartleggje Sogn-Voss anortositten samt å finne ein kostnadseffektiv metode for utnytting av bergartane. Den geologiske kartlegginga av området var storstilt og involverte mellom anna uttak av 4000 meter med borkjerner (Wanvik, 2010) og mykje rapportmateriale

vart produsert. Prosjektet var suksessfullt på fleire måtar og ein fann både eigna områder og gjorde mange framsteg teknologisk (Wanvik, 2010). Prosjektet vart til slutt avslutta då ein ikkje fann ein metode som kunne konkurrere i pris med bauksitten.

Etter dette har arbeidet med den teknologiske biten fortsett og i 2016 tok Nordic Mining patent på ein prosess utvikla i samarbeid med Institutt for Energi Teknikk (IFE) som dei hevdar kan vere økonomisk levedyktig (Nordic Mining ASA, 2016). Sjølv om det er litt utanfor vårt kompetanseområde vil prosessen bli omtalt i grove trekk i denne biten av oppgåva. Størst fokus har vi naturleg nok på dei geologiske føresetnadene. Det viktigaste ein ser etter i vurderinga av ein anortositt-førekost til aluminiumsutvinning er ei kalsiumrik ($An > 70\%$) plagioklassamansetning med minst mogleg ureinheiter som til dømes innhald av mørke mineral og ulike gangbergartar (Wanvik, 1999).

2.3.3.1 Anortitt-innhald

I forbindelse med industriell nytteevne som aluminiumsråstoff er ein ute etter anortositt med eit høgt anortittinnhald. Det er fordi anortositt med ei kalsiumrik samansetning er syreløyselig (nær fullstendig ved $An > 70\%$)

og inneheld ein større vektprosent aluminium (Wanvik, 1999). Eit nyttig resultat frå Anortal-prosjektet var at ein gjennom eksperimentering med ulike plagioklassamansetningar kom fram til ei løysingskurve for anortositten (figur 2.3.3).

Diagrammet (2.3.3) syner at plagioklas har ein dårleg syreløysingsevne med eit anortittinnhald på mindre enn 50 prosent, men med ei meir kalsiumrik samansetning skyt grafen i været. Dette skuldast strukturelle og kjemiske eigenskaper som vi ikkje vil gå nærmare inn på her (Utdypa i (Wanvik, 2010)).

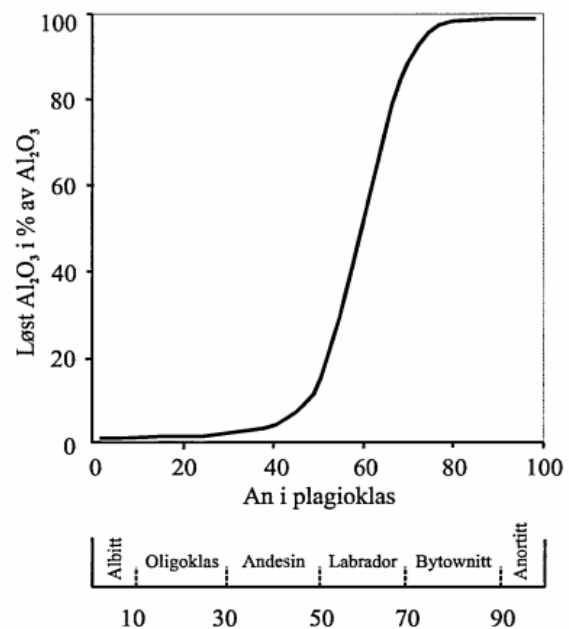


Fig 2.3.3: Graf som illustrerer syreløysing av plagioklas i forhold til An-innhald. Langs Y-aksen er det oppgitt løselig alumina i forhold til bergartens totale innhald av alumina. (Wanvik, 2000)

Wanvik som både har deltatt i Anortal-prosjektet og som har jobba mykje med anortositten i Sogn i løpet av si karriere, formidlar at førekomstane i Sogn og nordlige delar av Hordaland er av framtrekande kvalitet med omsyn til anortittinnhald (Wanvik, 1999 s. 89, 2000, 2010). Anortositten har nokre stadar eit anortittinnhald på nær 70 prosent og er derfor syreløyselig og eigna for aluminautvinning.

På grunn av regionale variasjonar av anortittinnhald i Sogn-Voss anortositten er det berre mindre områder i dei sentrale og nordlege regionane som har optimale løyselege eigenskapar (figur 2.3.4). Resten av dei nordlege områda er moderat til dårleg løyseleg. I sør finn ein derimot store førekomstar med god kvalitet. I Gudvangen-Mjølfjell massivet (nedst på figur 2.3.4) finn ein anortositt dominert av An_{65-78} og store delar av dette massivet er dermed godt eigna. Den deformerte anortositten ved den basale skyvingssona av massivet er eit klart unntak (Wanvik, 1999). I tillegg til aluminiumspotensialet har ei òg fleire andre bruksområder for syreløyselig-anortositt vist i tabell 2.3.2 (Wanvik, 1999).

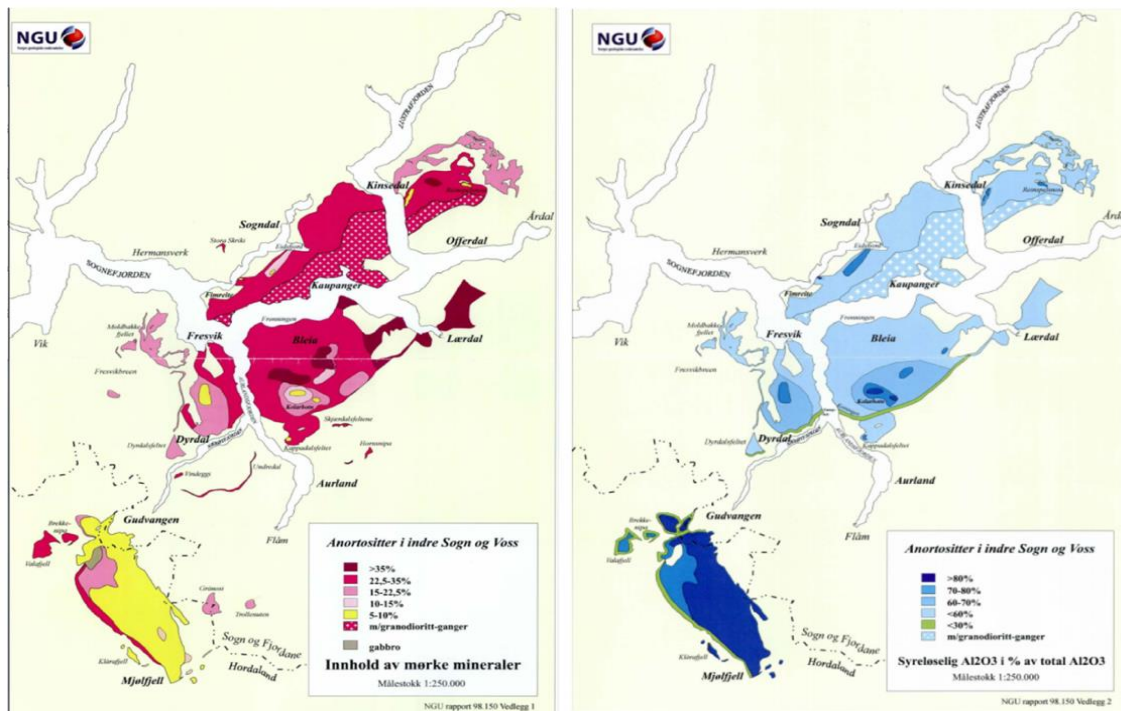
Tabell. 2.3.2: Ei oversikt over dei viktigaste kriteria for anortositten som råstoff i ulike relevante industrielle anvendelsar (Wanvik, 2000)

Use	Acid solubility	Al	Fe	Ca	LOI	Other criteria	Quantity needed
Al production	high	high	low				large
Al +Si +Ca (CO ₂ -free gas power process)	high	high	low				large
Water cleaning	high	high	low			not quartz	medium
Si + Al production (electrolysis)		high	low			high Si, low P, B and K	large
Refractory		high	low	high	low	not quartz	small
Ceramics			low		low	low melting point	medium
Mineral wool		high		high		low Si	medium
Aggregates						whiteness, mechanical qualities	medium/large
Dimension stone						fracturing, block size, colour	small

2.3.3.2 Mørke mineral

Anortositt er ein intrusiv bergart som i tillegg til plagioklas også fører andre mineral. Desse minerala er i hovudsak mafiske og har mellom anna olivin, pyroksen og amfibol i bergarten avhengig av omdanningsgrad (Griffin, 1971). I rapportar angående anortositt som ei mogleg kjelde som aluminiumsråstoff kjem det fram at andre mineral er uønska, men det er i liten grad bergunna (Til dømes: (Wanvik, 1999) (Bryhni, Brastad, & Jacobsen, 1983))). I og med at vi anser den nyaste metoden som mest aktuell har vi funne ei mogleg forklaring i patentbeskrivinga for denne prosessen (Norsk Patent: 337196. (2016)). Her kan ein mellom anna lese at mafiske kation frå ureinheiter vert utfelt på same måte som aluminiumet under raffineringa og at dette er eit problem i forhold til økonomiske omsyn. Prosessen går også ut på å tilsetje CO₂ for å binde gassen til oppløyste kalsiumion og få utfelling av salgbar kalk. Det kan tenkast at det er ugunstig med ureinheiter i høve til dette prosesstrinnet. For å spekulere litt kan ein kanskje med magnesium i blandinga få utfelt dolomitt (CaMg (CO₃)₂), men dette er berre antagelser.

I betraktning til det høge innhaldet av mafiske mineral samt dei kaledonske gangbergartane i dei nordlege delane av Sogn-Voss anortositten, er det områder i sør som er av størst kommersiell interesse (figur 2.3.4). Her har ein enkelte områder kor mafiske mineral berre utgjør 3 – 5 prosent av bergmassane.



Figur 2.3.4: Oversiktskart over dei anortosittiske førekomstane med omsyn til innhald av mørke mineral og syreløselegetheit (Wanvik, 1999, ss. 56-57).

2.3.3.3 Gangar av andre bergartar

Som nemt i førre kapittel har opptret gangar av andre bergartar i Jotundekket. Ein har mellom anna granittiske gangar danna i forbindelse med den kaledonske innskyvinga (Lundmark & Corfu, 2008). Ein har og eldre gabbro og granat-amfibolittgangar i anortosittprovinsen som førekjem som lag og linser av varierende tjukkeleik og frekvens (Wanvik, 2000) samt pegmatittiske gangar, men desse er sjeldne og har lite å sei for anortosittkvaliteten. Utbreiinga av dei ulike intrusjonane ekskluderer mange områder for utnytting som elles er av optimal kvalitet utifrå eit «aluminiums-perspektiv». (Wanvik, 2000).

2.3.3.4 Alumina frå anortositt - ny teknologi med Aranda-Mastin prosessen

Ein kan lese i patentsøknaden frå Nordic Mining (Norsk Patent: 337196. (2016)) at det eksisterer fleire tidligare patentar med omsyn til oppløysing og framstilling av alumina frå anortositt. I søknaden kjem det fram at sjølv om fleire av dei tidligare teknologiske løysingane har vore vellykka med tanke på produktutvinning, har dei enten ikkje vore konkurransedyktige i forhold til Bayerprosessen eller så har dei berre fokusert på delar av prosessen. Den føreliggande løysinga til Nordic Mining er delvis hemmelighaldt, men i patentsøknaden er det publisert ein forenkla gjennomgang av prosessen (figur 2.3.5).

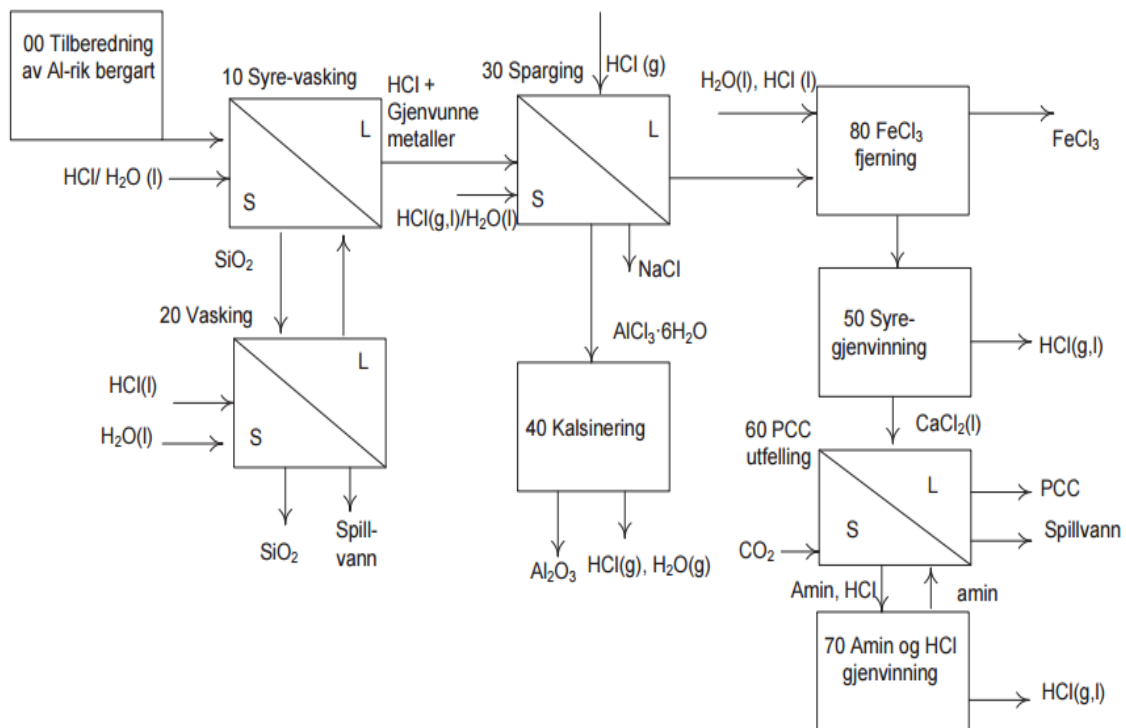
Først vert anortositten knust opp til ein kornfraksjon mindre enn 20 mm, deretter vert mesteparten av dei mafiske minerala og ureinheiter fjerna med magnetisk separasjon eller optisk sortering. Vidare vert anortositten oppløyst i saltsyre (HCL) under høgt trykk og høg temperatur i ei gitt tid (trinn 10, fig 2.3.6).



Etter oppløysinga blir faste reststoff, til dømes SiO_2 og partiklar som ikkje har vorte angripne av syra skilt frå løysinga ved sentrifugering. Amorft silika vil vere eit salgbart produkt frå denne delen av prosessen (trinn 20, figur 2.3.6). Den resterande væska vil hovudsakleg innehalde Al^{3+} og Ca^{2+} -ion. Ved å tilføre ein gass som inneheld HCl (sparging) aukar Cl⁻ konsentrasjonen og ein vil få utfelling av ulike salt, til dømes NaCl og ACH-hydrert aluminiumsklorid (trinn 30, ACH = $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). For å gjenbruke HCl-gass og produsere

alumina blir ACH-saltet oppvarma i ein to-trinns prosess som krevjer høge temperaturar (trinn 40, figur 2.3.6). Væska som vert igjen etter utskilling av dei forskjellige salta gjennomgår fleire trinnvise prosessar, både destillering og tilsetjing av organiske forbindelsar (aminer) for å sikre gjenbruk av syra. Ein nøkkelfaktor i denne delen av prosessen er tilføyning av CO₂. Utnytting av klimagassen vil ha store miljømessige fordelar og samstundes vere lønnsamt. Ved å tilsette CO₂ i den kalsiumsrike blandinga vil ein få utfelling av kalsiumkarbonat (PPC, precipitated calcium carbonate) som kan omsetjast eller lagrast trygt.

I pressemeldinga i forbindelse med den nye patenteten (Nordic Mining ASA, 2016) kjem det fram at prosessen vil utnytte cirka 500 000 tonn CO₂ per million tonn alumina. Ein har gjennomført alle trinn i prosessen på laboratoriumskala, og om ein skal tru på uttalelsen frå samarbeidspartnarane er det ein sær sars lovande metode for utvinning av alumina som vil vere konkurransedyktig i forhold til dagens etablerte aluminaframstilling.



Figur 2.3.5: Gjennomgang av Aranda-Mastin prosessen. Norsk Patent: 337196. (2016)



Figur 2.3.6: Det er i hovedsak disse to som har utviklet prosessen hos IFE. Prosjektleder Johann Mastin til høyre og post. Doc. Maria Asuncion Aranda Sanchez til venstre (Nordic Mining, NA)

2.3.4 Anortositten som ein ressurs i dag

2.3.4.1 Pukk

Den kvite anortositten har vore greve ut til aggregat i fleire tiår. Dei gode mekaniske eigenskapane og den lyse fargen gjer den særskilt attraktiv (Wanvik, 2000). Både i Rogaland og i Gudvangen i Sogn og Fjordane har store parti av bergarten vorte deformert til kvit anortositt. Denne vert blant anna utnytta i keramikkindustrien og matvareindustrien, men volummessig dominerar pukk av kvit anortositt som tilslagsmateriale i lyse vegdekker og betong (Meyer, 2015).

Den er særst gunstig som tilslag i asfaltdekke fordi den gir vegbana ei lys overflate av betydning for trafikksikkerheit. Bergartane er slitesterke og relativt motstandsdyktige. Analysar av prøvar gjev ein særst god poleringsverdi, noko som betyr at bergartane har ein høg friksjonsmotstand (Ulvik, Riiber, Erichsen, & Dahl, 2009). På sikt kan det bli ein ytterlegare etterspurnad etter kvit anortositt sidan den ikkje inneheld kvarts. Kvarts er ein viktig faktor for utviklinga av silikose, og det kan i framtida innførast strengare krav til mineralinnhald i byggeråstoff ut frå helse- og miljø-messige tilhøve (Marker, 2004). Generelt er all anortositt fri for kvarts, men mineralet kan opptre spreidd rundt eller som sprekkefyllingar i dei sterkast omdanna og forgneisa partia, særst i nærleik av tektoniske soner som botn av Sogn-Voss-massivet (Wanvik, 1994).

I tillegg til asfalt har betongelementa for ytterveggjar, samt gate- og trafikk-formål vert produsert med kvit anortositt som ein viktig ingrediens. Den Na-rike varianten, frå både Sogn-Voss og Rogaland, har også vert brukt som eit tilleggsprodukt i vaskepulver og som slipemiddel i tannkrem (Wanvik, 2000).

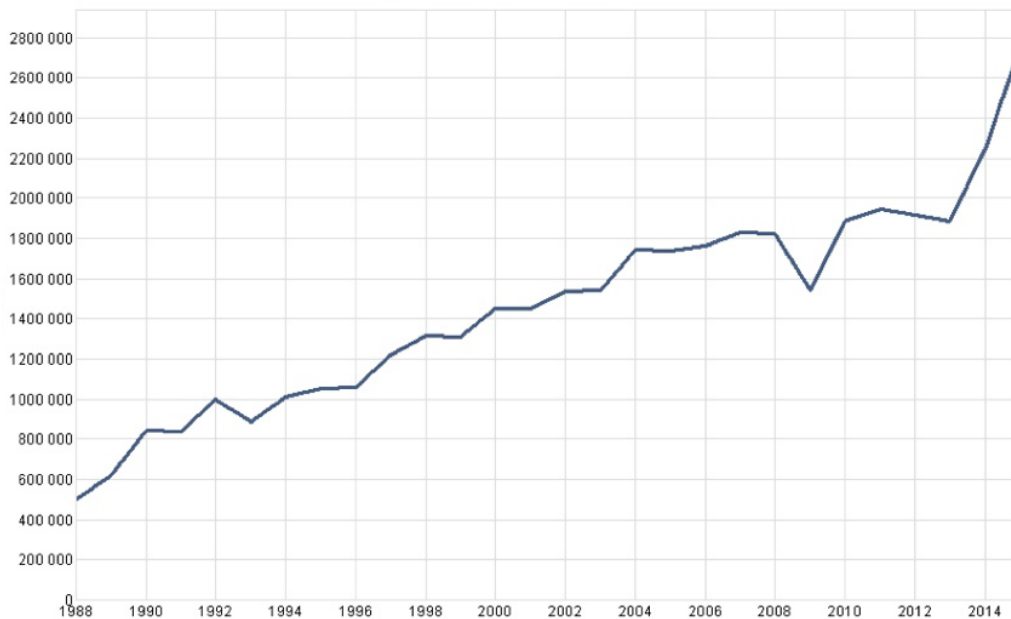
Fargen på anortositten gir ingen bestemt indikasjon på kvaliteten. Sjølv om deformert låg-An anortositt er kvit (finkorna med matt glans), kan udeformerte typar også vere kvite (middles til grovkorna og krystallinske). Grå og lillagrå variantar er mest vanleg, men mørk fiolett og mørkebrune variantar kan også førekome. Dei to sistnemte typane er vanlegvis høgkalsium varianter og passar til dei fleste industrielle bruksområder, men det er ofte funne innhald av store mengder mikroskopiske slutningar av jernoksid som kan vere ei ulempe for nokre bruksområder (Wanvik, 2000).

Utvinning av Pukk til byggeråstoff er det største mineralske næringa i Noreg og ein har både eit stort marknad innanlands og ein vaksande eksportetterspørsel (Neeb, et al., 2015). Ein tredjedel av Noregs pukk vert eksportert til nærliggande europeiske land som til dømes Storbritannia, Tyskland, Danmark, Baltikum og Russland. Der vert den norske steinen brukt til vegbygging, vindmølleparkar, offshoreanlegg ol. På tross av økonomisk turbulens i Russland og eurosona samt auka bevissthet rundt resirkulering av til dømes asfalt, har ein sett ei betydelig auke i etterspurnaden for norsk pukk (sjå figur 2.3.6 frå SSB).

I perioden 1997 – 2007 auka eksporten med heile 95 prosent (Erichsen, Ulvik, Wolden, & Neeb, 2008). Under finanskrisa fekk utviklinga eit lite knekk, men i løpet av perioden 2011 til 2014 auka eksportsalet til 21.8 millionar tonn, med ein samla verdi på 1.3 milliardar kroner (Neeb, et al., 2015). Dei siste par åra har den norske krona vorte betydelig svekka og

dette har gjort konkurransevilkåra enda gunstigare i forhold til eksport, men vi har ikkje kjelder på at dette kan relaterast til den bratte veksten frå 2014 i figuren under.

Norsk eksport av stein, grus og sand (1988 – 2015)



Figur 2.3.7: Graf lagd på SSB.no. Hensikta er å illustrere trenden i eksportmarkedet. Y-aksen viser norske kroner og X-aksen viser år. I 2015 var verdien for eksport av stein, grus og sand på 2 751 688 NOK.

2.3.4.2 Blokk- og naturstein

Anortositten i Indre Sogn og Voss er dominert av betydeleg oppsprekking og er derfor ugunstig for blokkuttak. Det er ikkje lokalisert store nok parti i området for økonomisk gevinst. Om ein ser bort i frå kløveigenskapane til bergarten, som ikkje er sær gode, er det fortsatt moglegheiter for produksjon av gate- og kantstein der det er nødvendig med mindre blokker. Gudvangen har gjort nokre prøveuttak av blokker, men det har ikkje vorte nokre stor suksess (Wanvik, 1999).

2.3.4.3 Andre bruksområder

På starten av 1990-talet introduserte selskapet A/S Polymer (No Polymer AS) produksjonen av polymer koagulant (polyaluminimsklorid) for å renske drikke- og kloakkvatn ved å bruke anortositt som råstoff. Prosessen baserer seg på syreløysing av råmaterialet. Tidleg på 2000-talet gjennomførte selskapet eit pilotprosjekt utvikla i Polen. Resultatet var lovande og var i fyrsteomgang planlagt for å renske det høgt forureina avfallsvatnet frå Polsk og Aust-Europeisk industri (Wanvik, 2000).

Eit av produkta frå syreløysinga av anortositten er ein kvit, høgporøs, amorf silikagel med låg tettleik. Denne har potensial til å vere fyllmasse i maling-, plastikk- og papirindustrien, samt bindingsmateriale i sementproduksjon. Den høge porøsiteten gjer den også passande som ein absorbent for forskjellige produkt, inkludert radioaktive partiklar (Wanvik, 2000).

Silikatproduktet frå syreløysing er også interessant som eit alternativt råstoff i ein ny og innovativ industriell prosess, som rundt tusenårsskiftet vart utviklet av selskapet Norwegian Silicon Refinery AS. Silisiumproduktet er av høy reinhet og kan nyttast i til dømes solcellepanel (Wanvik, 1999).

Produksjon av eldfast materiale med den kalsiumrike Sogn-Voss anortositten som råstoff vert utført av Borgestad Fabrikkar. Fleire parti av Gudvangen-Mjølfjell massivet kan vere aktuelt for vidare produksjon. (Wanvik, 1999). Den udeformerte anortositten i Sogn-Voss er også favorisert av det svenske selskapet Paroc AB som råstoff i mineralullproduksjon (Wanvik, 1999).

2.3.5 Uttak i drift i Sogn-Voss-området

2.3.5.1 Sogndal-Kaupanger

Bergartane vert i dag utvinna ved to pukkverk i området rundt Eidsfjord. Det største steinbrotet ligg ved Valeberg (figur 2.3.8) mellom Sogndal og Kaupanger. Førekomsten her består av laucogabbro med veksling mellom heilt lyse parti (anortositt) og mørke gabbroide parti. Bergarten opptre over eit større område og er godt eigna for uttak. Granatar med størrelse på opp til 1/2 cm opptre hyppig. Bergarten er sterk tektonisert og inhomogen men i følge NGU sin pukkdatabase vert ressursen sett på som ”meget viktig” og dagbrotet drives i dag av Fredheim Maskin (NGU, 2008).

Daglig leiar Anders Fredheim kunne fortelje oss på telefon at pukken vert brukt lokalt. Årlig uttak estimerte han til å vere på om lag 20 – 30000 tonn avhengig av etterspørselen. I dag leverar dei mellom anna massar til den nye Loftesnesbrua som går over til Sogndal. Brotet har vore i drift sidan 1984 og ein finn dei utsprengte anortosittiske bergartane igjen fleire plassar i Sogndal. Til dømes er dei nytta som erosjonsvern langs Sogndalselva og som grus ved høgskulen.



Figur 2.3.8: Steinbrotet ved Valeberg sett frå austsida av Eidsfjorden. Den kvite anortositten er i sterk kontrast til den mørke barnålskogen.

2.3.5.2 Gudvangen Stein

Sør for Jordalsnuten, rett ved Nærøydalselvi, har ein bergverksdrift på den omdanna bunnsålen mellom øvre og nedre del av Jotundekket. Materialet vert brukt til vegdekke, betong, hageheller, splittstein, fasadestein og litt i keramikkindustrien (NGU, NA).

Pukkverket opna i 1966 med underjordsdrift inn i Jordalsnuten og Øvsthusnipa. Drifta i dag vert i følge NGU sin pukkdatabase sett på som nasjonalt viktig (NGU, NA) og er dreve av Gudvangen Stein AS som kjøpte det opp av Nordic Mining i 2013. Dei gode mekaniske eigenskapane og den kvite fargen gjer den særst attraktiv (Wanvik, 1999).

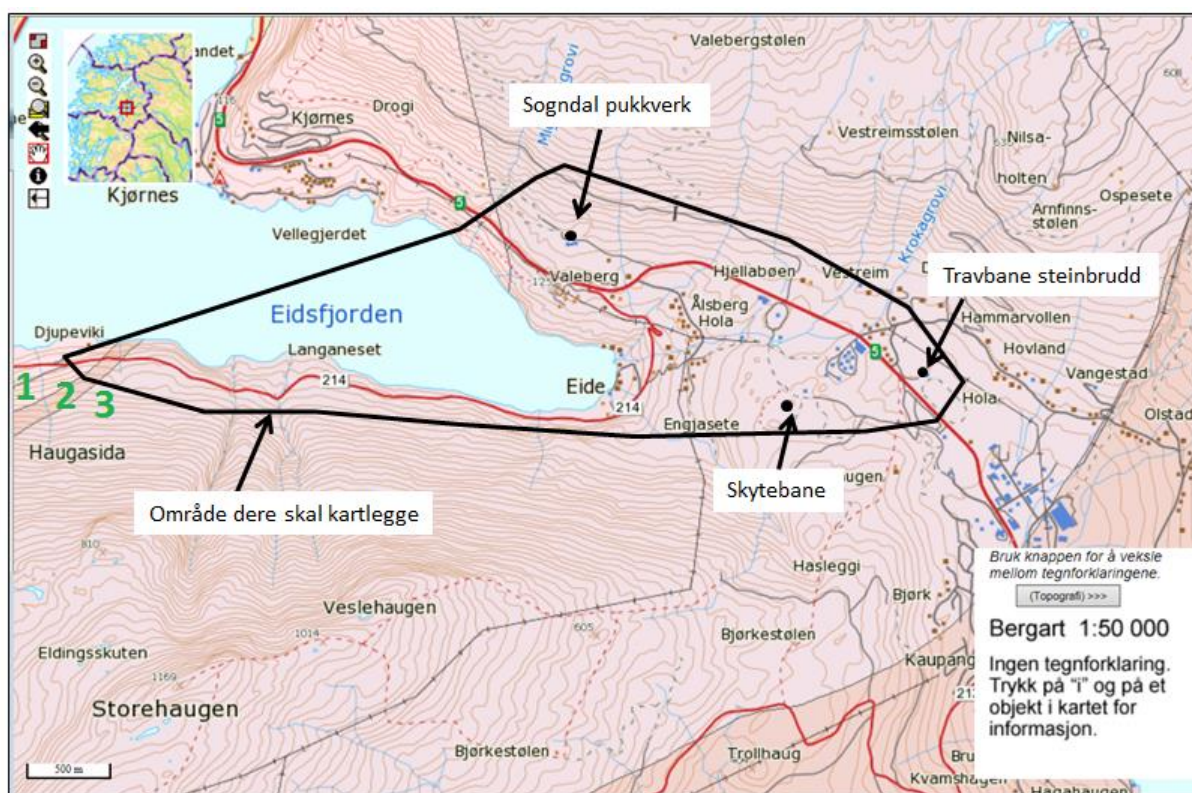


Figur 2.3.9: Oppknusing av den kvite bunnsåla ved gudvangen stein. (Sæle, 2008)

3.0 RESULTAT

3.1 GEOGRAFISK OG GEOLOGISK OVERSIKT OVER FELTOMRÅDET

Området vi har undersøkt ligg ved Eidsfjorden i Indre Sogn, få kilometer frå Sogndal. I to steinbrot og langs vegane i området finst det gode blottningar som vi har brukt mykje tid på å undersøke. Hovudvegen RV5 er uoversiktleg og har tidvis mykje trafikk. Av sikkerheitsomsyn har vi ikkje gått langs denne vegen, men vi har kjørt forbi og observert bergartane gjennom bilruta.



Figur 3.1.1: Bergrunnskart (1:50000 frå NGU) vi fikk utelt frå vegleder med kartleggingsområdet markert med svart. Innanfor området er det frå før definert tre bergartsklasser. Disse er markert til venstre i kartet med grønne tal. 1 = Gneis, stadvis mangerittisk og massiv, 2=Gabbro-noritt, granulitt, amfibolitt, de fleste stader forgneisa 3= Anortositt, gabbro-anortositt, anortositt-gabbro (NGU, NA).

Dei eksisterande bergrunnskarta over området er grovt inndelt, og det er få nyansar i den geologiske samansetninga. Kartet frå NGU er ikkje feil, men bergartane i området er delt inn i sekkeposter som rommar breitt. Vi har jobba med å kartlegge området meir i detalj.

Ved å klassifisere dei ulike bergartane og trekkje grenser mellom dei ulike bergartsonene har vi blitt litt klokare på geologien i området med tanke på ressurspotensialet og geologisk utvikling.

Dei anortosittiske førekomstane i Indre Sogn er godt undersøkt, og i litteraturen finn ein inndelingar av dei ulike bergartstypene. Vår inndeling baserar seg på dei undersøkingane vi har gjort, og dei hjelpemidla vi hadde til rådighet. Til dømes har vi ikkje skilt mellom ulike pyroksenmineral. I litteraturen kan ein mellom anna lese at anortosittiske bergartar ofte er assosiert med hypersthenførande bergartar som til dømes noritt og mangeritt (Lundmark & Corfu, 2008). Vi har ikkje hatt tilgang på tynnslip og mineralogien er tolka på bakgrunn av det ein kan sjå med lupe. Noritt er i vårt kartarbeid tolka til å vere gabbro medan mangeritt er klassifisert som monzonitt.

Den lange geologiske historia til bergartane i området, med eit breitt spekter av ulike trykk- og temperaturforhold, har ført til at bergartane har ein polymetamorf karakter. Sjølv om mesteparten av berggrunnen vi har kartlagt er omdanna i varierende grad, har vi utelatt å bruke prefikset «meta» framfor bergartsnamna.



Figur 3.1.2: Vegard framfor ein «koronitt». Dei fullstendig omdanna linsene er omdanna i amfibolittfacies og blir dratt inn mot ein amfibolittisk «flytande» skjærstruktur

3.1.1 Dei litologiske sonene

3.1.1.1 Monzonittiske gneisar

Bergartstypen er lokalisert i den vestlege ytterkanten av feltområdet, og dekker derfor berre ein liten bit av berggrunnskartet. Bergarten (figur 3.1.3) har ein raudlig farge og mineral-samansetninga varierer mellom rosa/raude, kvite og mørke mineral. Dei rosa minerala dominerer, og ser ut til å utgjere 50 – 60 prosent av bergarten. Dei mørke minerala utgjer mesteparten av dei resterande prosentane. Dei kvite minerala utgjer rundt 5 – 10 prosent.

Korna i bergarten varierar mellom å vere finkorna og grovkorna og dei opptrer i både centimeterstørrelse og millimeterstørrelse. Dei rosa og kvite minerala varierer òg mellom å vere korn og matriks i bergarten, medan dei mørke ser ut til å opptre som korn og band. Desse rosa minerala har glasglans, ei hardheit som ligg under 7 på Mohs-skala og ser ut til å ha ujamne avblandingsslameller i krystallane. Observasjonane tyder på at dette sannsynligvis er alkaliefeltspat.



Figur 3.1.3: Prøve frå ei stor mylonittisk skjærsone i overgangen mellom mangerittisk gneis og amfibolitt.

Dei lyse minerala har ein mjølkekvit farge som ser ut til å variere i styrke, men den blir aldri heilt gjennomsiktig. Korna har elles same hardheit som alkaliefeltspaten og har glasglans. Utifrå mineralogien i området, og dei eigenskapane dette mineralet har, så er det ikkje usannsynleg at dette er plagioklasfeltspat. Dei mørke minerala ser ut til å ha ein svartaktig farge som varierer med mørkegrøne tonar. Kornforma variera mellom ujamne, runde og til tider rektangulære krystallar, og har glasaktig glans i ferske brot. Det er ikkje lett å sjå kva slags mineral det er. Nokre korn har eit kløv med ein vinkel på 60/120 grader, noko som tyder mot amfibol. Bergarten er duktilt deformert og har gneisbånder og mylonittbånd.

3.1.1.2 Anortosittane (>90% Plagioklasfeltspat)

Anortositten opptrer i fleire fargar og med varierende kornstørrelse, innhald av mørke mineral og strukturar. I felt har vi observert at anortositt hovudsakelig førekjem i fire forskjellige variantar:

- 1) Ein har anortositt med det vi tolkar som ein primær fanerittisk tekstur. Denne krystalline varianten består tilsynelatande berre av plagioklasfeltspat og opptrer i fargenyansane raud, fiolett og blåaktig (figur 3.1.4- øvst til venstre). Den er stort sett jamnkorna, men den er ofte kvit langs korngrensene noko som gjer det litt vanskelig å definere kvar korngransa eigentleg går. Denne varianten opptrer sporadisk i fleire deler av det kartlagde området. Dei største førekomstane av denne typen finn ein i forbindelse med dei minst deformerte førekomstane av anortositt. Til tross for det finn ein varianten til dømes også som relativt upåverka «inneslutningar» i enkelte deformerte områdar (figur 3.1.4- nede) . Anortosittvarianten har ei avgrensa utstrekning, sjeldan meir enn ein kvadratmeter.
- 2) Med aukande innhald av mørke mineral, blir anortositten meir finkorna og plagioklasen vert kvit eller lys grå. Denne flekkete varianten inneheld mørke mineral som er vanskelig å identifisere. Kornstørrelsen ligg på 1 – 5 mm og kategoriserast som middelskorna. Mineralfoliasjonen følgjer ofte hovudlineasjonane i området, men vi har også observert meir tilfeldige mineralogiske lineasjonsforhold.

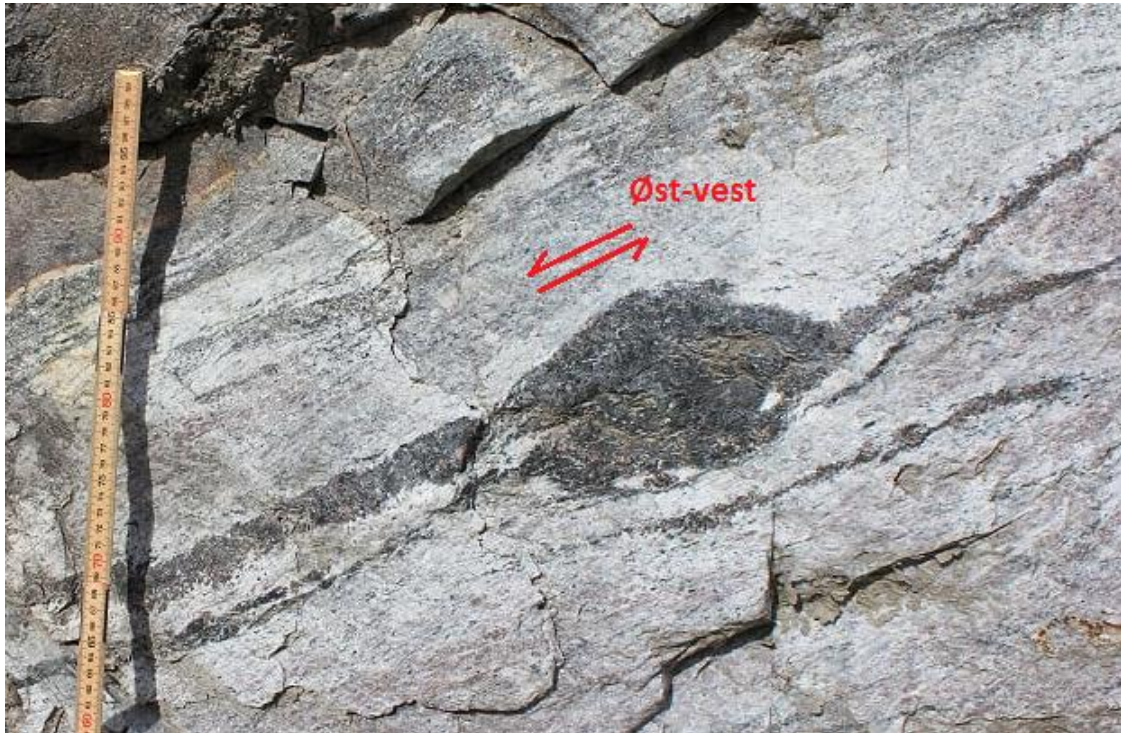


*Figur 3.1.4: Øvst til høgre: Rein anortositt. Til venstre: grovkorna kvit anortositt frå blotning
Nede: Inneklemt anortositt, som har unnsluppet mineralreaksjon*

- 3) Anortositt førekjem også med svarte band (figur 3.1.7). I denne varianten er feltspaten stort sett kvit til lys grå og har ein middelskornet tekstur. Mineralfoliasjonen følgjer bandingen. Dei mørke banda består først og fremst av amfibol, men også pyroksen. Der dei mørke minerala hovudsakelig er amfibol har minerala eit meir grøntaktig skjær. Bergarten er også litt mattare og har eit ofte eit flytande utsjåande. Kvar ein har pyroksen er bergarten i større grad grovkorna og ein har meir granat i forbindelse med dei svarte banda. Granatkorna kan ha ein diameter på opptil 1 – 2 cm.

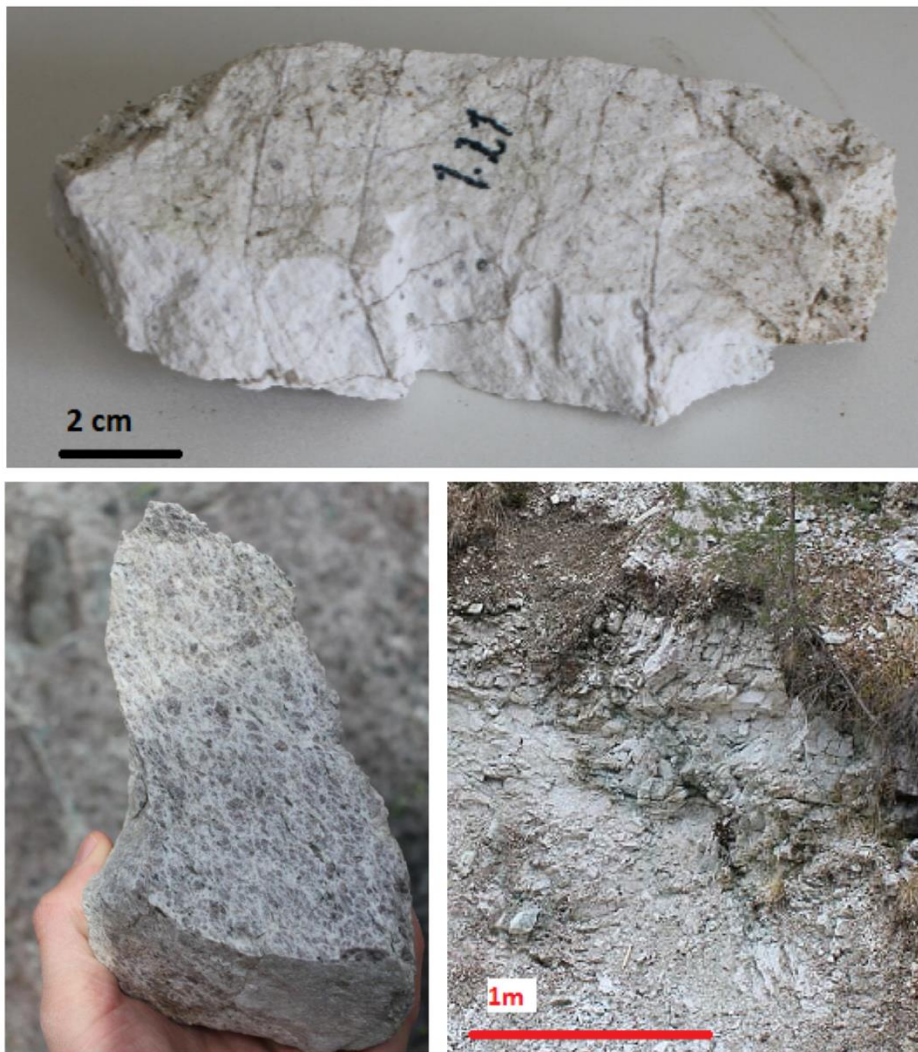
Banda er ikkje alltid heilt samanhengande og dei varierer i tjukkeleik og frekvens. Fleire stadar ser ein at dei mørke banda har opphav i mørke utdratte linser (figur 3.1.5). Avhengig av kva skala ein ser på, vil bergarten variere frå anortositt til

gabbro, men i vår litologiske inndeling har vi prøvd å avgjere innhald av mørke mineral på «blotningsnivå». Med vegledars velsigning har vi valt å berre bruke namnet banda anortositt, sjølv om ein i området kanskje vil finne banda gabbro-anortositt og banda anortositt-gabbro.



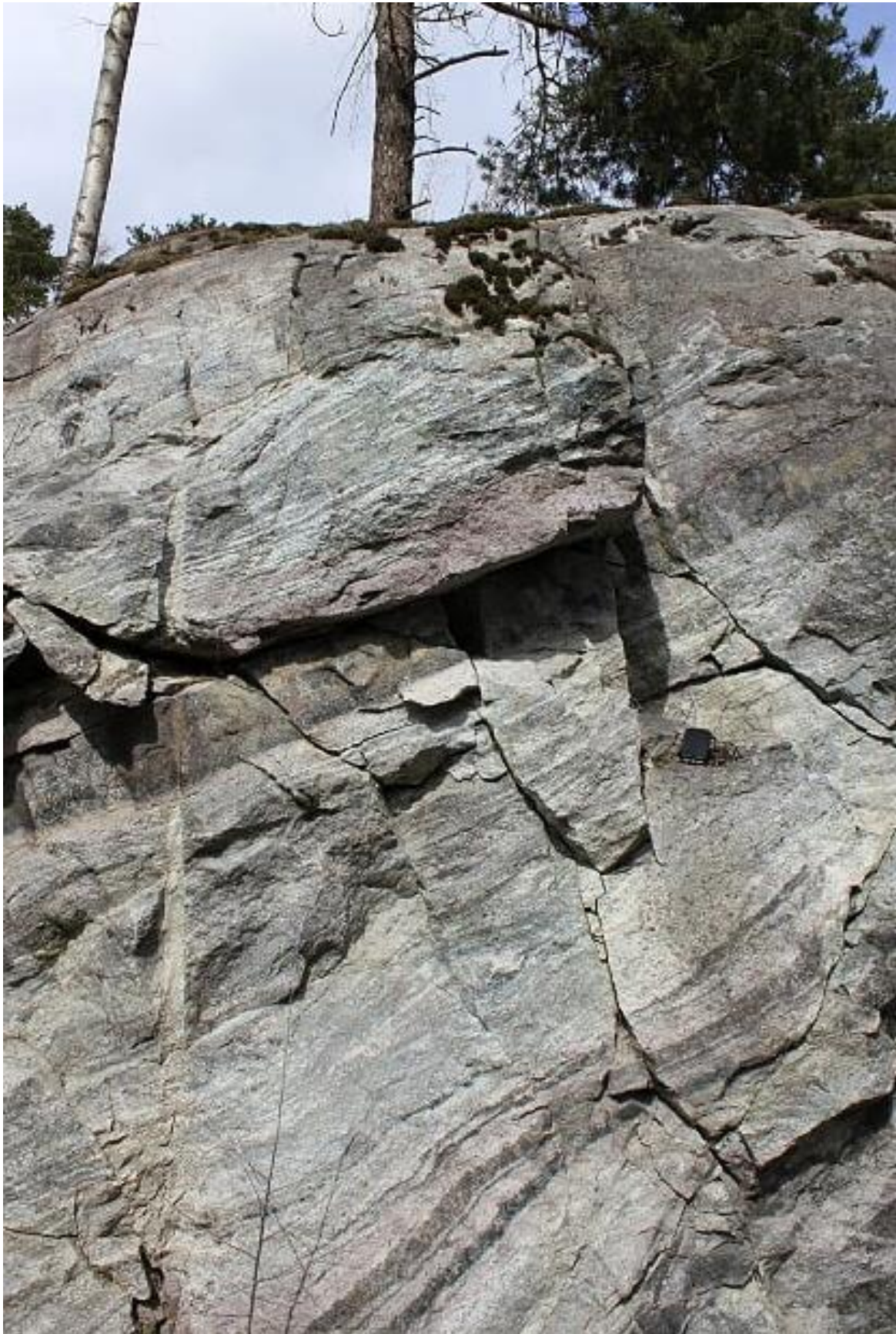
Figur 3.1.5: Utdratt linse som danner band og som synar ikkje-koaksial deformasjon

- 4) Anortositt opptre òg som ein mjølkekvit og finkorna variant (figur 3.16- øvst). For å identifisere plagioklaskorna var vi nødt til å bruke lupe. Om ein ser nøye etter ser ein at bergarten inneheld submikroskopiske mørke mineral, men ved eit kjapt blikk er denne anortositten heilt kvit og homogen. Varianten førekjem i fleire forkastningar og den finkorna teksturen tyder på at dette kan vere ein tektonisk omdanna variant (forkastningsmel kanskje). Samtidig ser vi at dei reine anortosittane med ein primær magmatisk struktur (1) også har ein varierende overgang til denne bergartstypen langs korn grensene. (figur 3.1.6- nede til venstre) Dette kan tyde på at varianten er kjemisk omdanna og at det ikkje nødvendigvis er dei tektoniske kreftene som er årsaka til danninga av bergartstypen. Sprekkjer og knusingssonar har gjerne god hydraulisk leiingsevne og fluider kan ha omdanna bergartane i desse sonene til den kvite finkorna varianten.



Figur 3.1.6: Øvst: helt omdanna anortositt frå feltet. Nede til venstre: delvis omdanna anortositt frå feltet. Nede til høgre: Anortositt i forkastning frå feltet.

Dei ulike anortosittvariantane opptrer ofte saman, og ein kan finne alle variantane i ei lita blotning. Den første varianten med ein primær magmatisk tekstur utgjer ofte ein liten del av blotningane. Av den grunn er det hensiktsmessig å ha ei gruppe som rommar både denne varianten og den flekkete anortositten. Denne gruppa kalla vi enkelt for «anortositt». Den andre anortosittgruppa er den meir forgneisa typen (3) som vi kalla «banda anortositt». Den tredje gruppa er den finkorna varianten og får namnet «omdanna anortositt». Sjølv om dei ulike variantane gjerne opptrer side om side, har vi delt inn området etter den typen som dominerar i blotninga.



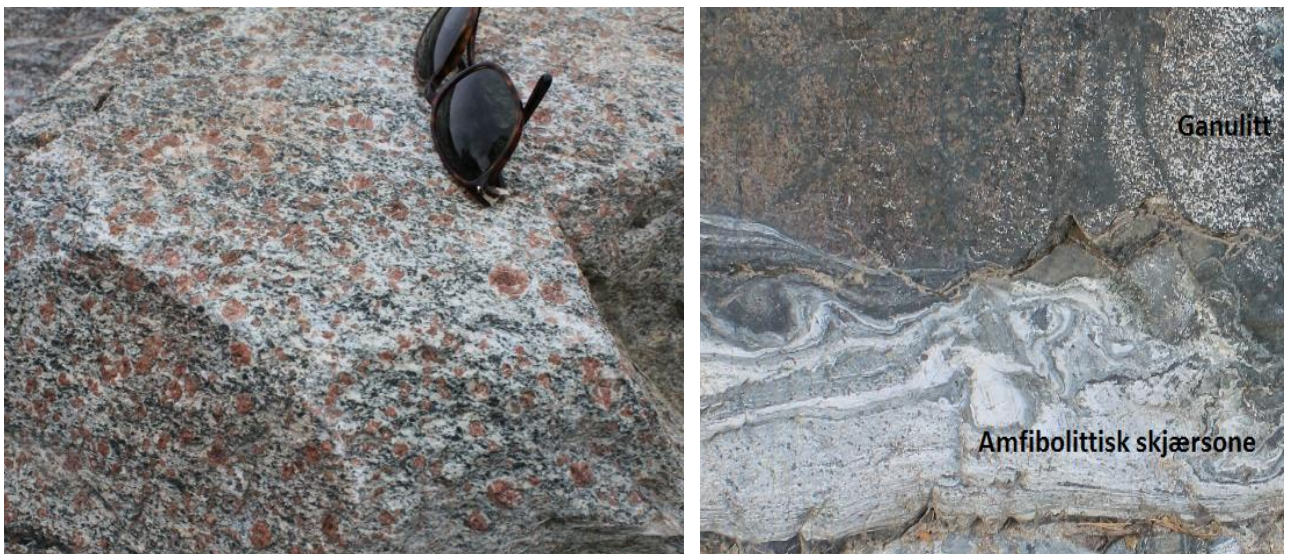
Figur 3.1.6: Banda anortosit från feltet.

3.1.1.3 Dei gabbroide sonene

I vår petrologiske undersøking har vi ikkje hatt tilgang til tynnslip og minerala er identifisert på ved hjelp av enkelt identifikasjonsutstyr. Det er derfor ikkje tatt omsyn til om dei gabbroide bergartane inneheld ortopyroksen eller klinopyroksen. For å gjere det litt enkelt har vi kalla bergartane i gabbrofamilien for gabbroanortositt, anortosittgabbro og gabbro, sjølv om dei i meir inngåande undersøkingar ofte får endinga noritt. Det er også vanlig i geologisk litteratur å nytte seg av omgrepet leucogabbro for plagioklasrike bergartar med eit innhald på 10 – 30 prosent mørke mineral. Vi har valt å bruke ei meir nyansert inndeling i håp om at det kan bidra til eit betre heilheitsbilete. Denne inndeling har vore basert på ein tabell i (Wanvik, 1999, s. 7):

Gabbro-anortositt	10 – 22.5% mørke mineral
Anortositt-Gabbro	22,5 – 30% mørke mineral
Gabbro	>30% mørke mineral

Dei ulike gabbroide bergartane opptrer med varierende metamorf påverknad. Ein finn granulittiske gabbrobergartar saman med meir amfibolittiserte variantar. Dei granulittiske variantane er grovkorna og inneheld ofte større granatporfyroblaster i kontakt med pyroksenmineral. Dei amfibolittserte sonene har ein meir flytande karakter, inneheld mindre korn og har ofte eit grønaktig skjær (figur 3.1.7).



Figur 3.1.8: Til venstre har ein granulittisk gabbro. Til høgre ser ein en eit døme på korleis variasjon mellom ulike mineralfacies førekommer side om side.

3.1.1.4 Amfibolitt

På kartet er det eit felt som vi har klassifisert som amfibolitt. (figur 3.1.9) Dette feltet ligg i overgangen frå dei monzonittiske til dei meir anortosittiske bergartane. Sona har ei relativt lita utstrekning, men er interessant på grunn av folding og plastiske deformasjonsstrukturar. Sona burde kanskje heitt forgneisa amfibolitt, men vi har gjort det enkelt og berre kalt den amfibolitt. Mineralogien i feltet er dominert av det vi tolkar til å vere amfibol (~70%) og plagioklas. Ein finn og enkelte spreidde kvartskorn som utgjer ein neglisjerbar prosentdel av bergarten. Bergarten har ei klar grense mot dei monzonittiske gneisane, men med ein meir gradvis overgang til dei anortosittiske bergartane.



Figur 3.1.9: Prøve frå det deformerte amfibolittfeltet

3.1.1.5 Koronittar

Mørke utstrekke linser med ein koronittisk/konsentrisk mineralstruktur finn ein i store delar av den anortosittiske bergrunnen i kartleggingsområdet (figur 3.1.10). Dei har ein varierende størrelse på 5 – 50 cm i diameter og 5 – 60 cm i lengde. Linsene opptrer i ei forholdsvis plagioklasrik, men inhomogen grunnmasse. Sjølvve koronaene har ei kjerne av det vi tolkar som serpinitisert olivin omkransa av konsentriske lag med til dømes pyroksen, granat og amfibol (figur 3.1.11). Fleire plassar er koronaene utdratte og danna band. Der ein har banding vil ein også finne mindre sonar med koronittar. Det har derfor vore litt vrient å trekke klare grenser mellom dei banda anortosittane og koronittane.



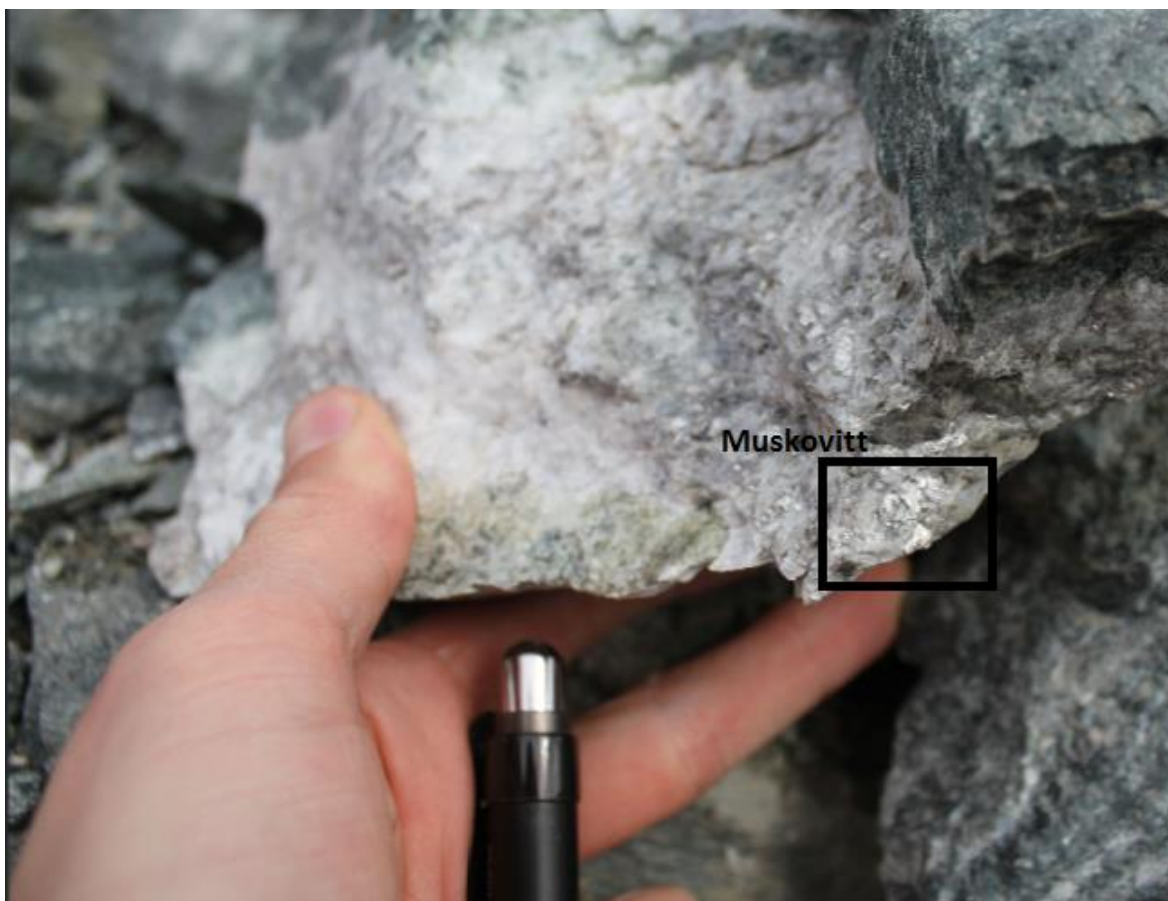
Figur 3.1.10: Den største koronaen vi fant i felt. Rundt koronaen var det opp til 5 cm store granatkorn



Figur 3.1.11: Øvst: Mineralogi i den største koronaen. Nede til venstre: amfibolisert korona. Nede til høyre: granulitfacies-korona som dannar s-c struktur.

3.1.1.6 Tonalittiske/Granodiorittiske gangbergarter

I pukkverket heilt aust i feltområdet fann vi to framande gangbergartar som var finkorna, og skilte seg ut i forhold til form og mineralogi. Det var vanskelig å identifisere matriksmineralane, og vi har diskutert om det var mest kvarts eller plagioklas i matriksen. Vi observerte begge deler, men det var vanskeleg å slå fast mengdeforholdet. Vi gjekk for ein relativt kvartsfattig matriks og derfor har vi kalla bergarten for tonalitt. Sjølv om matriksen var veldig finkorna fann vi 1 – 2 cm store muskovittflak (figur 3.1.12). Ein kunne kanskje tenke seg at desse har fått tid til å vekse seg store i ei smelte med lavt smeltepunkt. En indikasjon mot at matriksen består av kvarts. Vi meiner likevel at ein først og fremst har plagioklas i matriksen. Gangane inneheldt lite mørke mineral, og det var berre biotitt vi klarte å identifisere av dei mørke mineralane



Figur 3.1.12: Muskovittflak i gangbergart



Figur 3.1.14: Gangbergarter frå Sogndal pukkerk med omfattande retrograd omdanning i amfiboltt facies. Nokre stadar fann vi og indeksmineral frå endå lågere facies. (kloritt)

3.2 DEFORMASJON OG STRUKTURAR I FELT

Under feltarbeidet vart det fort klart at bergartane i området var sterkt deformert og viste teikn til både plastisk- og sprø deformasjon. Den plastiske deformasjonen dominerte og var merkbar gjennom nesten heile feltområdet i form av foldar, foliasjonar, lineasjonar osv. Sprø deformasjonen var meir avgrensa og opptredde oftast i form av oppsprukne bergflater og forkastningar. Dei ulike strukturane i området har opphav frå monge forskjellige deformasjonshendingar som har satt sitt preg på bergartane i området. Nokre deformasjonsaspekt er i vår oppgåve viktigare enn andre og er tillagt større merksemd. Mineralogien er særst viktig fordi det avgjer ressurspotensialet og fortel om hendingar i bergartanes utvikling. Ein har og fleire viktige strukturar som synar feltets oppbygning og historie. Feltet innehald mange strukturar og det har vore vanskelig for ferskingar og notere alle, i tillegg har vi og vore nøydt til å avgrense oss på med omsyn til tidsbruk.

3.2.1 Plastisk deformasjon

Plastisk deformasjon er den mest dominerande deformasjonsvarianten i feltet. På dei aller fleste stadar i feltet har vi støtt på ein eller anna form for duktil deformasjon, frå parallellstilte mineralkorn til mylonittisering. Vi har observert både planære og lineære deformasjonsstrukturar og derfor har vi delt opp dette delkapittelet i to; ein planær del og ein lineær del. Dei tilhøyrande strukturane blir beskrive slik vi observerte dei i felt, og tilhøyrande strukturmålingar er representerte i stereoplott.

3.2.1.1 Planære strukturar

Planære struktur i området har vi også delt opp. Med diskontinuerlege foliasjoner meiner vi for eksempel parallellorienterte mineral, flattrykte koronaer og usamanhengande band. Ein kan sjå på nokre av dei planære strukturane som forstadier til kontinuerlige plan som til dømes banding. Fleire dømer på det kunne ein sjå på koronalinser som hadde vorte utdratt til mørke band

Diskontinuerlig foliasjon

Samanlikna med for eksempel foliasjonar som gneisbånding og mylonittar (figur 3.2.2) opptredde parallellstilte «førstadier» i relativt få blotningar. Strukturane bestod av enten mørke enkeltmineral i ein lysare matriks eller deformerte koronastrukturar i form av flattrykte minerallinser (figur 3.2.1). Vi observerte også usamanhengande band nokre stader. Dei ulike variantane har ei meir eller mindre felles orientering som ser ut til å samanfalle med hovudfoliasjonen i dei ulike blotningane.

Både dei mørke minerala og koronane viste teikn til varierende deformasjonsgrad, der nokre viste teikn til rotasjon, medan andre viste formforandring i form av pur skjær. Dette kunne ein blant anna observere ved stopp 7 (figur 3.2.1), der dei forvittra koronittklumpene som stod ut av rundsvaet hadde ei omtrentlig orientering mot aust og såg ut til å vere flattrykt og forlenga.



Figur 3.2.1: Figur som viser deformerte koronittar. Koronittane oppstår her som flattrykke klumpar med raudmørkt materiale. Dette vart funne på stopp 7 i blotningskartet.



Figur 3.2.2: Eitt bilete av strukturen ved stopp 2 i blotningskartet.

Kontinuerlege foliasjonar

Kontinuerlege foliasjoner utgjør store delar av feltområdet, sær i form av gneisbanding. Deformasjonen er varierende frå soner med «svak» banding til sonar prega av intens deformasjon kvar ein går over til mylonittstrukturar. Foliasjonstypene har varierende bandbreidde og kornstørrelse samt forskjellig mineralkomposisjon som reflekterer dei ulike litologiske sonane dei opptrer i.

Gneisbanding

Gneisbandinga varierte i frekvens og i tjukkeleik frå 1 – 10cm. Banda var vanlegvis middelskorna, men kunne også ha ein meir finkorna tekstur. Nokre band hadde ein stor grad av parallellorientering medan andre var meir ujamne. Nokre stadar viste gneisane teikn til ein meir migmatittisk struktur. Dette kan ha vore eit resultat av seinare deformasjon av banda eller at banda vart utsatt for såpass høge trykk- og temperatur-forhold under den originale hendelsen at dei begynte å bli migmatittar. Figur 3.2.3 viser ei blotning med slike strukturar. Truleg er det smelta utsjåande vore danna i amfibolittfacies der mellom anna superkritisk vatn og andre fluid har senka smeltepunktet og bidratt til det flytande uttrykket.

Når det kjem til mineralogi, så bestod banda stort sett av amfibol og pyroksen. I tillegg hadde ein ofte tydelige porfyroblastar i form av til dømes granatkorn. For å avgjere korvidt banda bestod av amfibol eller pyroksen så vi først etter kløv, men monge stader var dette sær vanskelig. Etter kvart som vi vart kjent med bergartane i området, vart det lettere å skilje dei to minerala basert på andre trekk ved bergarta. Mellom anna vart det etter kvart lett å se forskjell på bergartar frå amfibolittfacies og bergartar med eit granulittisk preg. I bergartar med eit granulittisk utsjåande var det i større grad pyroksen som utgjorde dei mørke minerala, mens i amfibolittfacies bergartar hadde ein meir en blanding av pyroksen og amfibol.

Størrelsen på korna, saman med andre indeksmineral og fargen på desse, kan peike på ein høgare eller lågare metamorf-facies. Dette observerte vi i felt, der enkelte soner var prega av meir grønkattige mineral og mindre granatkorn, medan andre soner mangla denne grønfargen og hadde større korn. Dette representerar mest sannsynleg to metamorfe facies, der sona med

grønaktige mineral og små granatkorn representerar amfibolittfacies, medan sona med større korn og eit meir «tørt» utsjåande på minerala representerar granulittfacies.



Figur 3.2.3: Figur som viser døme på ein gneisbåndingsvariant som vi fant i felt. Migmatittiske trekk, i form av at banda er deformerte omtrent som om dei har smelta litt, meiner vi har skjedd under amfibolittfacies

Mylonittar

Mylonittar (Figur 3.2.4 og 2.3.5) observerte vi som regel i soner der gneisbånding utgjorde store delar av blottninga. Mylonittsonane vinter om intens skjerdeformasjon og slike strukturar er observert i fleire tilhøve. Dei kjenneteiknast ved at ein har veldig tynne og parallellstelte band i berget kvar formforandringa har vore så høg ut dei fleste andre markører og opprinnleg tekstur er viska ut. Dei var også meir eller mindre frie for synlige krystallar. Det var spesielt ved stopp 2 og 12 i blottningskartet (vedlegg 1) at vi gjorde detaljundersøkingar og nytta mykje tid.

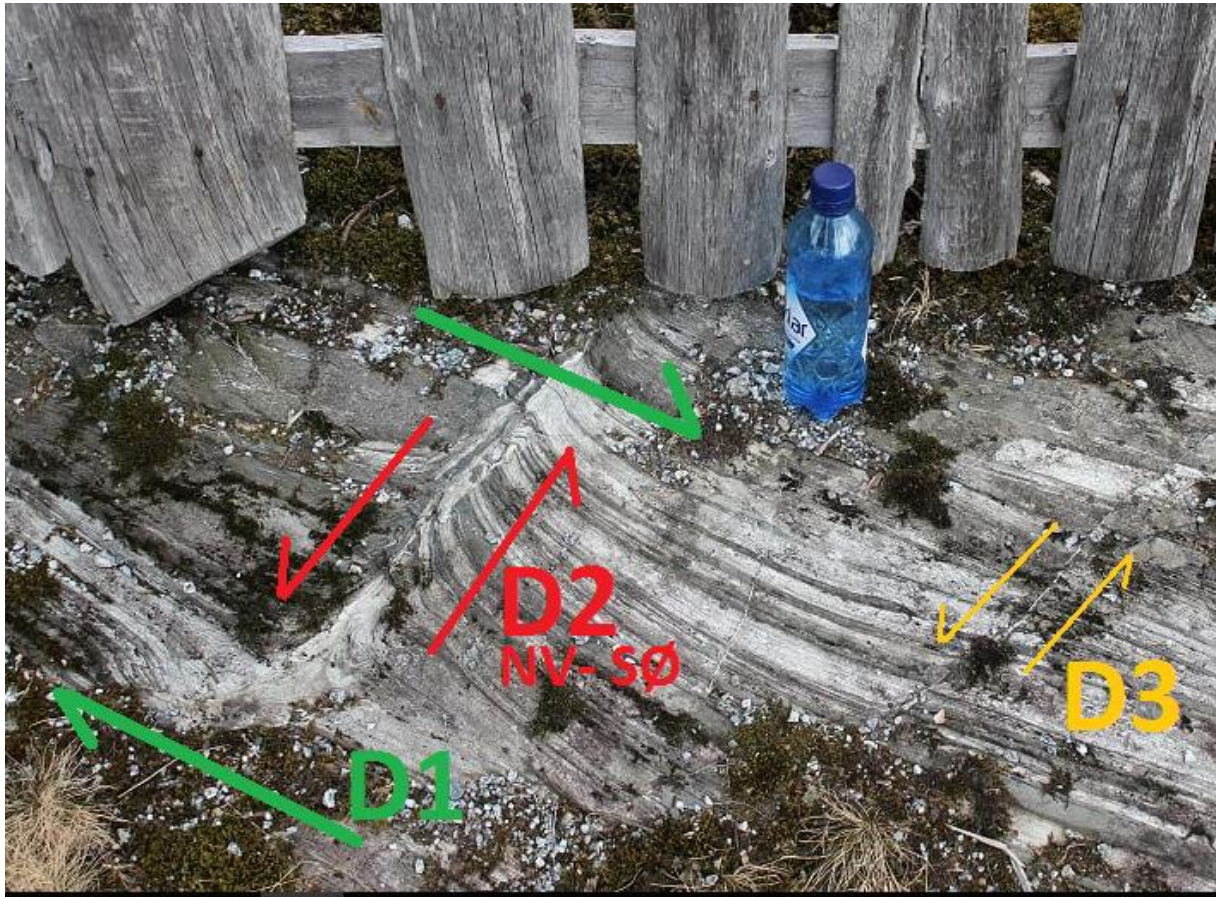
Mylonittane hadde omtrent same breidde på banda; rundt ei kvart centimeter. På lik linje med gneisbåndinga er mineralsamansetninga i banda avhengig av litologien rundt. Til dømes har mylonittane på stopp 2 (vedlegg 1) mozonittiske fargetrekk (raud og kvit). Banda var i stor grad parallellstelte, men vi observerte og soner der banda hadde vorte bøygde fleire titals

grader vekk ifrå den originale posisjonen. Sona viste teikn til fleire sterke deformasjonshendingar, noko ein kunne sjå på mindre parasittstrukturar slik som s- og z foldar med ei vergens som vi på tross av mykje diskusjon, ikkje vart heilt kloke på. Teksturen i slippflata til mylonittsona ved stopp 2 gjorde at vi til slutt vart einige om at skjærsona har ein hovudretningskomponent nord-sør.

Dei ulike mylonittane hadde også litt variasjon når det kom til størrelsen på korn i banda. Nokre hadde fortsatt godt synlige korn som utgjorde maks 50 prosent av den gjenverande grunnmassa, medan andre band var nesten reine for korn. Dette betyr at mylonittane i området varierer omtrentlig mellom det som i Fossen & Gabrielsen (2013) si blir omtaler som «mylonittar» og «ultramylonittar» (s. 139).



Figur 3.2.4: Bilde av blotning med mylonittstrukturar. Mylonittane er her representerte med nokså tynne og rette band, som vekslar mellom kvit og mørk farge.



Figur 3.2.4: Større amfibolittfacies mylonittsone som er kutta av ein mindre skjærsone(D2) med ein kaledonsk retning. D3 har vi tolka som ein sprø mikroforkastning

Større og mindre foldestrukturar

Vi observerte også strukturar som vi mistenker er delar av større foldestrukturar. Nokre av desse var vanskelige å tolke sidan blotningane var små og ofte avgrensa av vegetasjon. Men på stopp 2 og stopp 9 i blotningskartet fann vi teikn på større foldestrukturar.

På stopp 2 observerte vi ein synkande struktur som mest sannsynleg representerar den synkande delen av ein synklinal, og på stopp 9 observerte vi ein stigande versjon. Kor vidt desse representerer ein samanhengande antyklinal er heller usikkert fordi vi verken veit bølgelengda eller amplituda på den eventuelle foldestrukturen. Figuren under syner eit bilde av den eine foldestrukturen på stopp 2

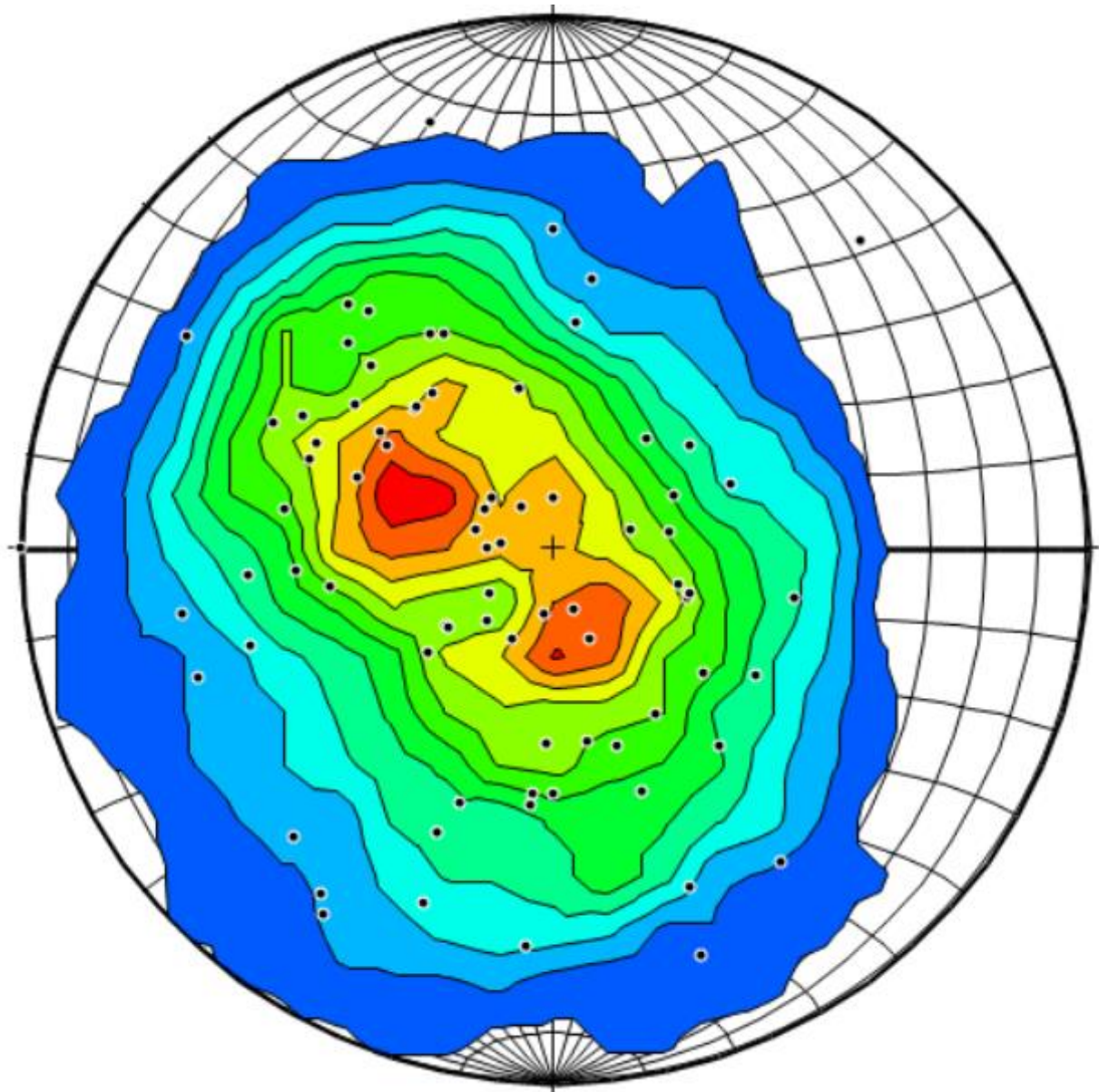
I tillegg til dei moglege storskalastrukturane, observerte vi og ein del s- og z-foldestrukturar. Desse opptredde oftast i områder med tydelig plastisk deformasjon, der nokre hadde meir eller mindre tydelige foldeaksar som vi målte. Dette kjem vi tilbake til i lineasjonskapittelet. S- og z-foldene viste elles lite variasjon i form.



Figur 3.3.5: Mylonittsona ved overgangen mellom dei monzonittiske gneisane og den forgneisa amfoblittsona. Minerallineasjonar på slippflata har ein kaledonsk retningskomponent. Denne strukturen stig gradvismot vest og kan vere ein del av foldestruktur.

Målingar

Sidan planstrukturane nemnt til no i større eller mindre grad er kobla saman, har vi valt å samle strøk- og fallmålingane under ei felles eining, nemlig foliasjon. Som vist på stereoplottet i figur 3.2.5 er det ein del spreining i data og for å bli litt klokare har vi valt å laga ein konturering i steroplot som synar hovudtendensane samt variasjonen i målingane. Dei sterkaste konsentrasjonane har ei strøketretning som peikar meir eller mindre i ei nordaustlig- og sørvestlig retning, med varierende fall både mot nordvest og søraust. Fallet til dei sterkaste konsentrasjonen ligg på cirka 10-30°.



Figur 3.2.5: Stereoplott over strøk- og fallmålingar av planstrukturar i felt. Dei svarte punkta representera polane til plana og fargelegginga bak dei er ei konturering av polane som viser spreininga i data. Raudt markerer den største konsentrasjonen, medan blå farge representerer den minste konsentrasjonen.

3.2.1.2 Lineære strukturar

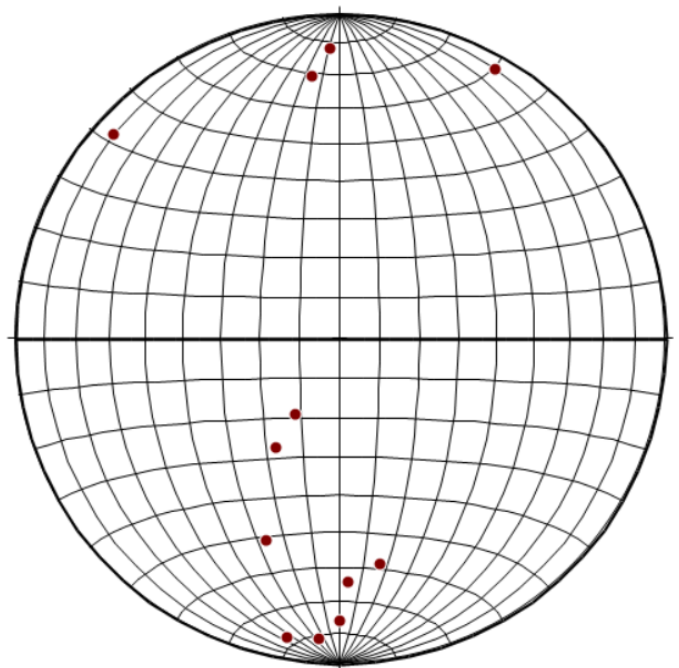
Linære strukturar har vi fokusert mindre på. Dei interessante lineasjonane har vore foldeaksar og minerallineasjonar på lagflater. Desse har vi tolka som kinematiske indikatorer som gjer eit inntrykk av deformasjonen i området.

På folesjenklar og lagflater har vi mellom anna sett etter mineralfiberlineasjonar eller penetrative minerallineasjonar. Foldeaksane i kombinasjon med slike observasjonar kan seie

nokre om vergensen til folden og kreftane involvert. Tilvarande kan ein nytta minerallineasjonane som retningsindikatorer i skjærsoner. Eit avlangt mineral kan til dømes bli vridd i minste motstands vei, altså parallellt med kreftane. Det same gjeld mineral som veks i skjærsona, til dømes som eit resultat av trykkoppløysing og rekrystalisering.

Minerallineasjonar

Lineasjonane opptrdde ofte som utdratte mineral eller mineralaggregat og danna striper på ulike lagflater. Det var ikkje alltid ein kunne sjå kva slags type lineasjon ein hadde. Som regel så var desse minerala lyse, medan berget var mørkare. Monge av flataene i feltet var prega av forvitring og fleir var også utilgjengelege for målingar. Vi har relativt få målingar og det skuldast at vi berre har gjort slike målingar på flater som viste klare lineasjonar. Målingane viste då at strekningslineasjonen hadde ei omtrentlig orientering mot nord og sør, mogleg nord nordaust og sør sørvest, med relativt slake fall på rundt 10-30°.

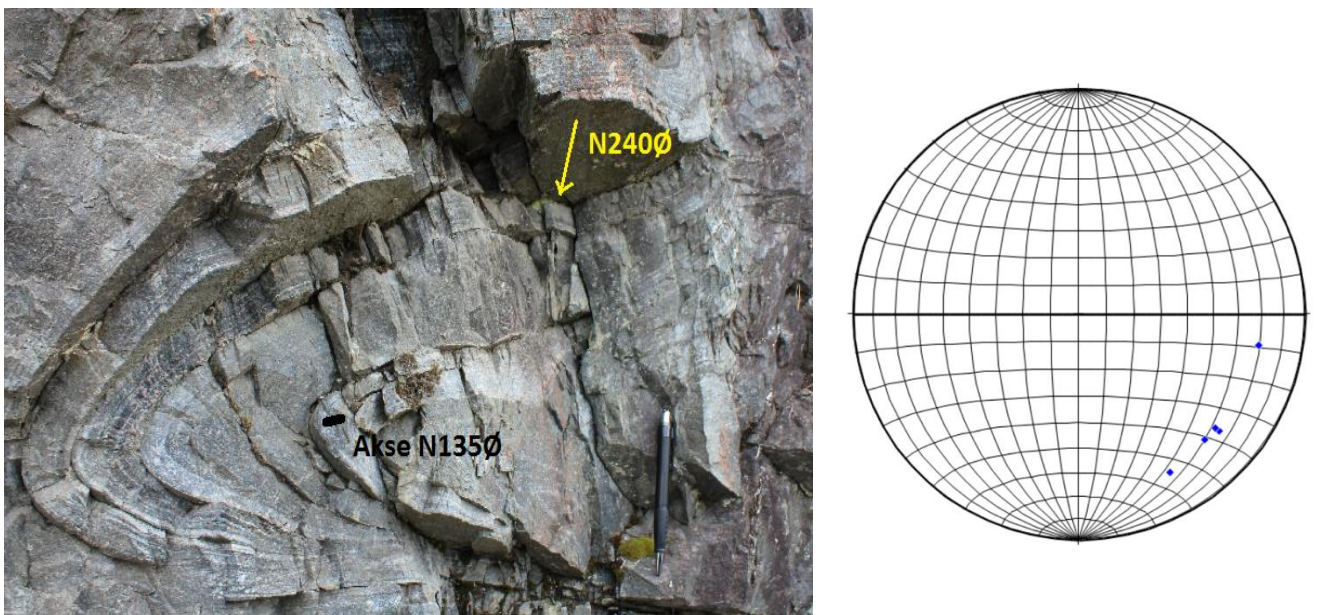


Figur. 3.2.6: Til venstre ser ein minerallineasjon på bergflate i nærleiken av stopp 2. Til høgre stereoplot av lineasjonsmålingar på bergflater og foldesjenkeler

Foldeaksar

Foldeaksar var den andre lineære strukturen vi hadde fokus på. Enkelte områder hadde mange folder og det var ikkje helt enkelt å finne kvar dei ulike foldeaksane gjekk. Dei aksane vi klarte å finne hadde varierende fall og fallretning. Aksane kan ha vore deformerte i etterkant av den originale hendelsen som skapte foldane i utgangspunktet. Dette kunne då ha bøyd heile strukturen på folden, slik at aksene peikte meir i retning foliasjonen, enn å stå cirka 90° på den sann som den i teorien skal. Vi hadde derfor nøydt å finne foldar der ein kunne sjå korleis aksene på dei fortsette innover i berget.

Når ein ser ein fold i to dimensjoner er det ikkje enkelt å finne akseretninga. I figuren under kan ein så en fold som er gunstig i høve til målingar. Folden stikker litt ut av berget, truleg som eit resultat av utsprenging av vegen og den tredje dimensjon gjer det enklare å gjere gode målingar .



Figur 3.2.7: Same som figur 3.2.6. Einaste forskjellen er at punkta representerar orientering og fall av foldeaksar, og målingane er representerte som blå punkt. Bildet til venstre viser orienteringa ein av aksane vi målte, med svart tekst. Og den gule teksta representerer ein minerallineasjon.

Småstrukturar

Ulike småstrukturar fann vi sporadisk gjennom heile området. Enkelte stadar kunne ein sjå små z og s foldar. Andre stadar kunne ein observere meir eller mindre tydelige boudinstrukturar (figur 3.2.8) der klastar og band vart utdradd i kringliggande matriks. Ein lokalitet såg ut til å ha det som vi tolka til å vere c-s strukturar. Fordi slike småstrukturar ligg utanfor oppgåva sitt fokus, så har vi valgt å nemne at vi har observert desse og ikkje gå lengre enn det. Figur 3.2.8 og 3.2.9 viser nokre dømer frå felt.



Figur 3.2.8: Figur som viser ein av dei typane småstrukturar vi observert i felt. Dette bildet syner boudinering



Figur 3.2.9: Same som figur 3.2.8, berre at her så er ein anna struktur vist fram. Dette mistenker vi til å vere ein slags c-s struktur, der dei utstrekte koronittane har vorte overskjerte av skjærbånd, som ein kan sjå der koronittane har vorte forflytta og deformert langs ei linje.

3.2.2 Sprø deformasjonar

Dei sprø deformasjonstrukturane vi observerte i felt hadde varierende utstrekning og opptrednad. Hovudsakelig hadde ein ulike typar sprekkar, forkastningar og tilhøyrande forkastningsbreksjer. Vi har ikkje hatt så stort fokus på desse strukturane. Dei representerer viktige, men nokså kortvarige hendingar i forhold til den totale deformasjonshistoria til feltområdet. I tillegg har dei i lita grad påverka den ressurspotensialet til dei anortosittiske bergartane

3.2.2.1 Sprekker

Sprekker var den sprø deformasjonsstrukturen som oftast dukka opp, og følgde som regel dei plastiske deformasjonsstrukturane som foliasjonplan og foldar. Sprekkane opptredde i store konsentrasjonar nærme soner med forkastningar eller forkastningsrelaterte strukturar og/eller bergartar. Elles fann vi ulike sprekkesett gjennom feltet som varierte i frekvens og orientering.

3.2.2.2 Forkastningar

Nokre forkastningar noterte vi oss sjølv om dette var lavt på prioriteringslista.

Forkastningane varierte i størrelse og samtlege var fylt med enten forkastningsbergartar eller mineralinfyllingar.

Den første forkastninga fant vi i området før skjærsona lengst mot vest (stopp 2, vedlegg. 1).

Forkastninga var fylt med ein grovkorna bergart som hadde liknande fargespekter som monzonittgneisen rundt. Den kantete fasongen til dei svarte fragmentene, og den sprø teksturen, gjorde at vi kategoriserte den som ein forkastningsbergart. Fordi den var kohesiv, ufoliert og innehaldt bruddstykker større enn 5 mm, konkluderte vi med at dette var ei knusningsbreksje (figur 3.2.12) (Fossen & Gabrielsen, Strukturgeologi 2. Opplag, 2013).

Forkastninga ser ut til å fortsette oppover berget mot høgde i figur 3.2.1, og strøk- og fallmålingar viser cirka ei nord-sør-retning med eit 30° fall mot aust.

Den andre forkastninga fann vi midtveis langs fjorden (figur 3.2.10). Denne var den klart største knusningsona i området, og det var tydelig at ein stor forkasting her. Her nytta vi lang tid på å lete etter ulike markørar, men sona var ikkje enkel å tyde. Etter mykje diskusjon og fleire besøk, kom vi fram til at vi observerte forkastninga frå forkastningskjerna. I fortsettinga av kjerna på bergveggen fann vi ei krittkvit bergart med rosa kubiske krystallar og nokre grå band som såg ut til å vere gjennomgåande. Dette likna det vi observerte ved den andre forkastninga (stopp 2 i blotningskartet) berre at dette området hadde ei meir anortosittisk bergartssamansetning, noko som kan forklare den sterke kvitfargen. Den andre observasjonen var ein liknande bergart utan dei kubiske krystallane, som vi fann lenger ned vegen i retning nord-nordaust. Begge tilhøyrrer nok den litologiske sona som vi kallar for omdanna anortositt, og viser muligens ein tektonisk omdanna versjon som kan ha oppstått som ein følge av forkastninga (litifisert forkastningsmjøl?).

Området hadde elles ein stor konsentrasjon med sprekker som kunne representere destruksjonssona rundt forkastninga. Sidan mesteparten av blotninga var dekt av skog og lausmasser var dei oppknuste bergartane og den finmalte anortosittiske ergarta dei einaste teikna vi hadde på at det var ei forkastning der. Vi fann ikkje noko definitivt plan, men valte å orientere strøket til forkastninga langs den dominerande strøkretninga i området, sidan dette vil stemme best overens med dei observasjonane vi har gjort.

Den siste forkastninga fann vi i brotet ved travbana på Kaupanger (stopp 21 i blotningskartet). Denne identifiserte ved hjelp av store utfellingar av mineral langs sprekker og lag i berget på austsida av brotet. Utfyllingane bestod av kalsitt der krystallane hadde ein massiv struktur med perfekte krystallar enkelte stadar. Forkastninga var ikkje godt synlig sidan vi ikkje observerte nokre tydelige knusningssoner og derfor har vi vore litt i usemje om dette faktisk er ei forkastning.

Ein har sikkert monge fleire forkastningar i området, men vi har ikkje lagt for mye vekt på slike strukturer. Vi observerte alle typar sprø deformasjonsstrukturar frå større knusingsoner til mikrostrukturar kvar ein så forflytning langs kataklasistiske skjærbånd. Det er tydelig at ein har hatt en god del sprø deformasjon i feltet i forbindelse med eit bredt spekter av spenningsregimer, frå post kaledonsk tektonikk til tertiær landheving og istidane i kvartær mm.



Figur 3.2.9: Mikrostruktur. Dette har vi tokla som ei tidlege moikroforkastningar kvar det kan se ut som at man har noe plastisk deformasjon i etterid. Til høyre finner ein klare bruddsoner men til høgre er det ikke nokre sprø brudd.



Figur 3.2.10: Bilete av ei bergeksponeing frå ei forkastning i området med monzonittiske gneisar heilt vest i feltet. Dei raude og svarte minerala tilhøyrer sannynligvis mineralskapen til monzonittgneisen rundt forkastninga.

4.0 DISKUSJON

4.1 Mineralogi og deformasjonstrukturar relatert til den geologiske historia til bergartane

Den geologiske historia til dei anortosittiske bergartane i Sogn og Nord-Hordaland er lang og kompleks. Dei første gangane vi var ute i felt vart vi pessimistiske i forhold til å kunne diskutere noko rundt den geologiske historia. Bergartene i området er inhomogene, deformerte og ein kan i same blotning sjå vekslingar mellom ulike mineralsamansetningar, som vitnar om forskjellig omdanningsgrad. I vårt bachelorprosjekt har vi berre utført enkle strukturmålingar, studert mineralogien og fokusert på kartlegginga av området med omsyn til å finne anortosittar eigna for syreløysing. Diskusjon rundt den geologiske historia vart vi delvis fråråda i møte med rettleier sida data- og kunnskapsgrunnlaget vårt er litt tynt i høve til å rekonstruere delar av den geologiske utviklinga til anortositten. Vi vil likevel presentere ein grov diskusjon av den geologiske historia til bergartane vi har undersøkt. Diskusjonen er i stor grad bygd på eksisterande forskingslitteratur, men med tanke på at dette berre er ei skuleoppgåve har vi tatt oss fridommen til å spekulere litt i våre egne observasjonar.

4.1.1 Magmatisme i ein sein fase av den Svekonorvegiske fjellkjededanninga

Dei anortosittiske bergartane vart for første gong datert av Lundmark og Corfu i 2007. Ved å måle nivået av uran og datterisotopane av bly i titanitt og zirkona, kunne dei rekne seg tilbake til når minerala nådde lukkingstemperaturen sin. Ein fann ulike aldrerar som tydar på fleire omdanningshendingar. Den eldste alderen ein fann var på 965 ± 4 millionar år og er tolka til å avspegle danninga av dei anortosittiske bergartane. Tolkinga vart underbygga av at ein fann mineraltekstur som tilsa at desse zirkonane hadde eit magmatisk opphav.

Datering peikar tilbake mot ei periode med storstilte orogenske prosessar i forbindelse med samlinga av landmasser til superkontinentet Rodina. Fennoskandia kolliderte med eit anna kontinent (mest truleg Amazonia) og samanstøyten førte til den svekonorvegiske orogonesen som forgjekk frå 1140 – 900 my (Bingen, Nordgulen, & Viola, 2008). Dersom

dei eldste resultat av den radiometriske dateringane verkeleg reflekterer danninga av anortosittane korrelerer dette med den seinorogene Dalane-fasa i den Svekonorvegiske orogonesen. Denne fasen var prega av skorpetynning som ein mistenker var drevet av ekstensjonskrefter og i mindre grad erosjon (Bingen, Nordgulen, & Viola, 2008).

Delaminasjonsmodellen er foreslått som ein mogleg årsak til proterozoisk AMCG-magmatisme i fleire av artiklane vi har lest (eks: (Bybee, et al., 2014)). Modellen går ut på at delar av den nedpressa litosfæra under ei fjellkjede losna og søkk ned i mantelen. Dette kan skje sidan ein har fått danna tette høgtrykksmineral som til dømes eklogitt, og fordi skorpa er relativt kald og tung i forhold til mantelen. Delaminasjon av botnskorpa vil føre til at fjellkjeda vert løfta opp og faren for kollaps er stor. Oppvarming av fjellkjedas rotsone vil gå kjappare og danning av smelter og intrusjonar kan tenkjast å følgje delaminasjonen (Fossen & Gabrielsen, 2013, ss. 302-305).

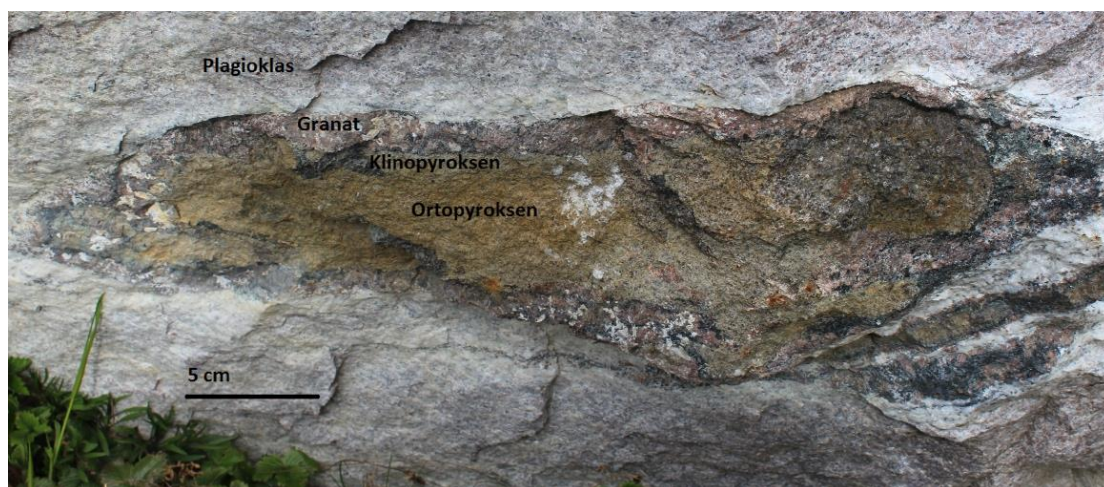
Andre som argumenterar for denne moglege dannelsesmodellen er Lundmark & Corfu (2007). Dei formidlar at modellen passar godt med ekstensjonsstrukturar og pegmatittar ein finn i øvre Jotundekket. Vidare skriv dei at oppvelling av astenosfæra og oppvarming kan ha ført til pulsar med magmatisme og metamorfose over eit lengre tidsrom. Mellom anna argumenterar dei for at høg-grad metamorfose i Jotundekket og Lindåsdekket med ein alder på 930 millionar år kan vere relatert til danninga av dei magmatiske bergartane ein finn i Rogaland anortosittprovins.

Lindåsdekket er nært beslekta med Jotundekket. Til dømes har ein kaledonske gangbergartar i begge sykvedekka, ein har ein liknande mineralogi og fleire teikn til ei liknande utvikling før den kaldoske fjellkjededanninga (Lundmark & Corfu, 2008) (Griffin, Meillini, Oberti, & Rossi, 1985). Geokjemiske spor og korreleasjonar med andre hendingar kan tyde på at ein har hatt stostilte anortosittiske intrusjonar i den baltoskandiske marginen relatert til den svekonorvegiske orogonesen (Lundmark & Corfu, 2008).

Medan anortosittane ein finn i Lindåsdekket og Jotundekket korrelerer med intrusjonar og strukturar som tydar på ein kollaps av den Svekonorvegiske (Lundmark & Corfu, 2008) er Rogaland anortosittprovins danna i ettertid av denne fjellkjedesyklusen og ein har derfor inga definert fasit på kva miljø som krevjast for å få danna store anortosittplutoner.

4.1.2 Granulittfacies omdanning etter intrusjonen: Koronittdanning

I kartleggingsområdet finn ein koronastruktur (figur 4.1.1) som inneheld viktige kjemiske avtrykk frå den gong bergarten vart danna. Ein antek at koronaene har opphav frå avrivne olivin-fragment som fløyt rundt i den plagioklasrike magmaen under intruderinga av jordskorpa (Griffin, 1971). Under subsolide forhold i jordskorpen har olivinen reagert med den plagioklasrike grunnmassa, og det har blitt danna skall av sekundære mineral som omgir den primære olivinen.



Figur 4.1.1: Koronastruktur i plagioklasmatrix. Strukturen vart truleg flatrykt under granulittfaciesforhold (Lundmark & Corfu, 2008). Legg merke til at plagioklasen blir gradvis albittisert inn mot koronaen.

Dei omringande laga med mineral er reaksjonsprodukt frå kjemiske reaksjonar som har pågått i bergdjupet. Mineral har ein definert, men ikkje statisk kjemisk samansetning. Til dømes kan kationar som er omtrent like store og har omtrent same ladning ta kvarandre sin plass i krystallgitteret avhengig av trykk- og temperaturforhold. Ved å analysere mineralas strukturelle og kjemiske samansetning kan ein få indikasjonar på kva rammevilkår som var til stede den gangen mineralet «fraus» til.

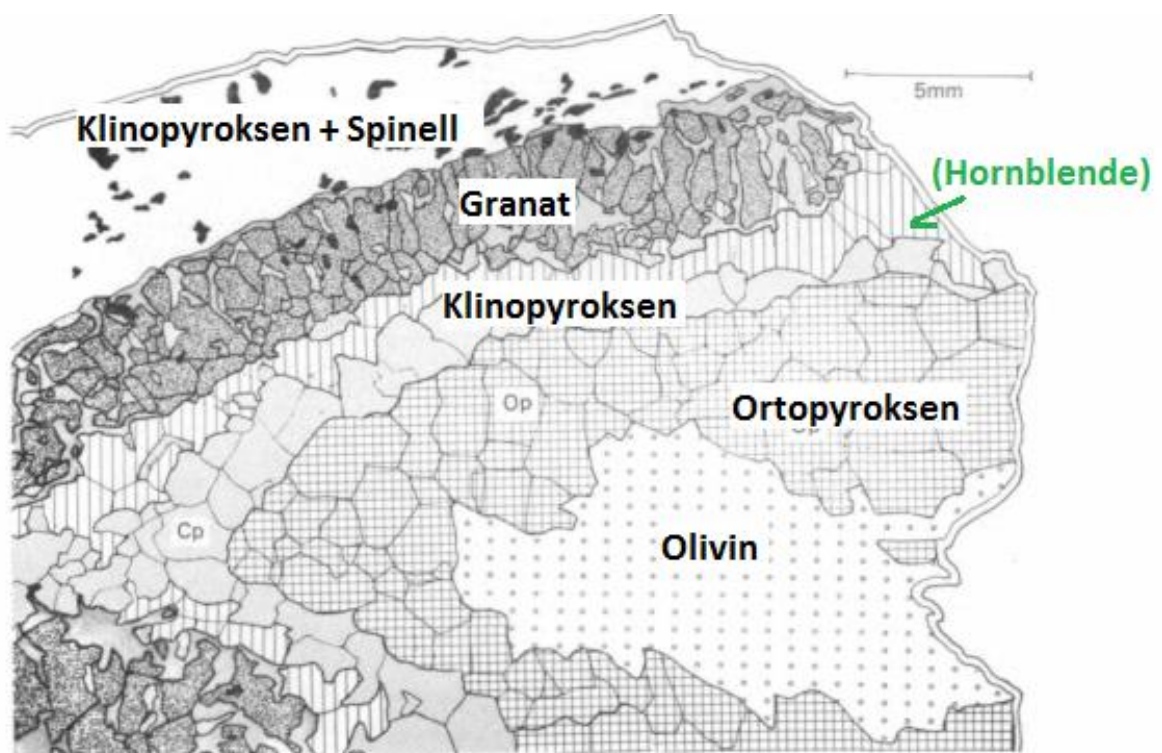
Geologiprofessor Griffin publiserte i 1971 sin første studie av koronittane i Sogn. Ved hjelp av teksturelle observasjonar kombinert med elektronmikroskopanalyser fann han dei ulike mineralreaksjons-seriane for koronane. Ved å anta at mineralreaksjonane hadde oppnådd likevekt kunne han angi trykk- og temperaturestimat. Anslaga baserte seg på eksperimentelt produserte data om korleis basaltiske samansetningar endra seg ved

varierende trykk- og temperaturforhold. Griffin (1971) formidlar at koronaene utvikla seg i to evolusjonsstadier under avkjøling av magmaet og auka trykkbetingelsar:

1) Olivin + plagioklas → aluminiumsrike pyroksen (CpxI og Opx I) + spinell

Vidare reagerte produkta frå reaksjon 1 med plagioklas og ga følgjande reaksjonsserie:

2) Aluminiumsrike pyroksen (CpxI og Opx I) + spinell + plagioklas → låg-aluminums ortopyroksen og klinopyroksen (Cpx II og Opx II) + granat



Figur 4.1.2: Frå Griffin (1971) Olivinkjerna omringet av sekundære mineral. Hornblendelaget er danna i ein seinare hydrert reaksjon mellom granat og klinopyroksen.

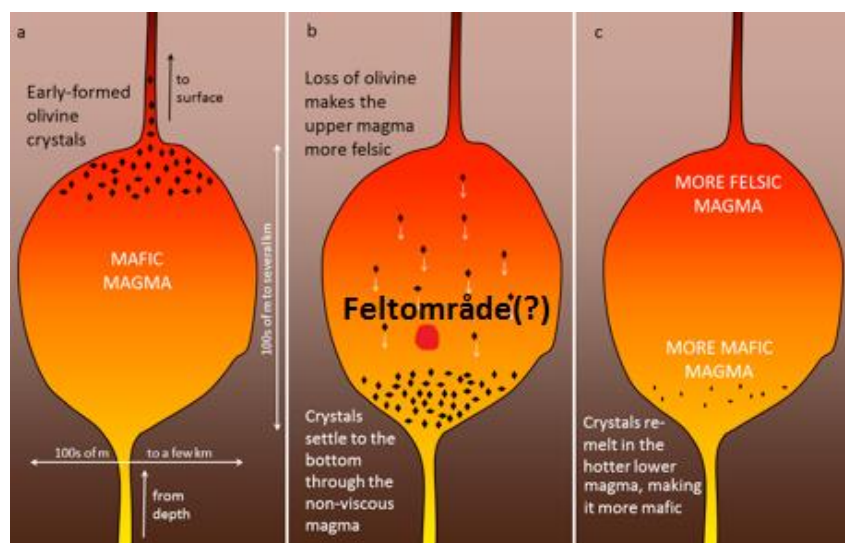
I 1985 publiserte Griffin og kollegaer ein oppfølgjande rapport om koronastrukturane der dei argumenterte for at koronaene blei danna på grunn av granulitfacies-metamorfose under avkjøling av magmaet (Griffin, Meillini, Oberti, & Rossi, 1985). P/T-estimata i rapporten varierer frå 900 til 1000 grader med eit trykk på 9 – 11 Kbar. I rapporten kjem det fram at nedkjøling av magmakroppen kan ha ført til auka trykk. Det blir mellom anna argumentert med at ein senking av temperatur vil føre til volumendring og auke i tettheit.

Videre kan tettleiksendinga ført til at magmakroppen sank ned i grunnen og vart utsatt for større trykk og granulitfacies mineralreaksjoner (Griffin, Meillini, Oberti, & Rossi, 1985).

Akkurat når og korleis disse koronastrukturane vart danna har vore omdiskutert i ettertid. Fordi dei har utvikla seg i to ulike stadier har det til dømes vore foreslått at dei to ulike reaksjonane har opphav frå forskjellige hendingar (Lundmark & Corfu, 2008).

Det at ein finn slike omdanna olivinbitar i kartleggingsområdet, samt at ein har ein relativt høg prosent mafiske mineral i berggrunnen tyder på at den intrusive berggrunnen rundt Eidsfjorden ikkje tilhøyrrer i toppen av eit magma-kammer. Vi innser samtidig at magmatiske prosessar truleg er meir kompliserte enn dei forenkla figurane av magmakammera i geologilærebøkene (figur 4.1.3). I den lagvise soknedalintrusjonen i Rogaland ser ein til dømes at magmatismen har pågått i pulsar der ein har hatt vekslingar mellom periodar med differensiering og periodar med ny tilførsel av magma (Bryhni, Nøttvedt, Ramberg, & Rangnes, 2013). Bergarta ein finn i området er svært gamle og ulike typar deformasjon frå folding til forkastningar kan skape fordreide intrykk av området.

Uansett tykjer vi det er interessant at ein også i Lindåsdekket finn slike strukturar som syner ein liknande geologisk historie (Griffin, Meillini, Oberti, & Rossi, 1985). Dette indikerer at Lindåsdekket også er ein del av midtre allokton, med same utviklingshistorie som anortositane i Jotundekket (Lundmark & Corfu, 2008).



Figur 4.1.3: Illustrerer magmatisk differensiering. Frå introduksjonsbok i geologi. Kapittel 3.3 (Earle, 2015).

Datering av anortosittane i 2007 (Lundmark & Corfu) avslørte at dei anortosittiske bergartane hadde gjennomgått fleire deformasjonshendingar i prekambrisk tid. Frå granulittfacies til seinare lokal amfibolittfacies omdanning. Med unntak frå korona-strukturane har vi ikkje kjent igjen spor etter disse deformasjonshendingane i felt og vil derfor ikkje gå nærmare inn på dette.

4.1.3 Kaledonsk påverknad

I løpet av geologistudiet har vi lært at Jotundekket vart frakta minimum tre hundre kilometer, som ei tjukk krystallinsk blokk med lite indre deformasjon under den kaledonske orogonsa. Dette ser ut til å vere den etablerte sanninga, for det same kan ein òg lesa i «landet blir til» (Bryhni, Nøttvedt, Ramberg, & Rangnes, 2013). Det at bergartane har blitt frakta så langt og vore med på å byggje opp ei fjellkjede som truleg var vel så høg som Himalaya utan å gjennomgå vesentlig omdanning er vanskelig å sjå føre seg. Vi var derfor svært spente på om vi kunne sjå spor etter denne hendinga i felt.

I nyare forskningsartiklar kan ein lese at bergartane i området har vore påverka av den kaledonske fjellkjedefoldinga. Datering av gangbergartane, ein mellom anna finn i steinbrotet ved travbana på Kaupanger, synte ein kaledonsk alder på rundt 427 millionar år (Lundmark & Corfu, 2008). Slike gangar er ikkje observert i den nedre delen av Jotundekket. Datering tyder derfor på at øvre og nedre del av Jotundekket er separate skyvedekker som vart stuva saman under den kaledonske fjellkjedefoldinga. Mellom dei to dekka finn ein mellom anna albittisert anortositt og skjærstrukturar. I områda der ein finn gangane har fluida og varme bidratt til retrograd metamorfose og lokal deformasjon. Lundmark og Corfu (2008) skriv vidare at påverknaden har ei begrensa utstrekning, men spesifiserer ikkje dette nærmare.

I den austlege delen av kartleggingsområdet finn ein grensa mellom øvre og undre del av Jotundekket (figur 4.1.4). Grenseområdet er prega av intens plastisk deformasjon. Overgangen frå dei mangerittiske gneisane til amfioblitt inneheld mellom anna ei stor mylonittisk skjærson som er 3 – 4 meter vid. Minerallineasjonane på slippflata indikerar ein sør-vestleg retningskomponent truleg relatert til den kaldonske fjellkjededanninga



Figur 4.1.4: Utsnitt av bergartskart 1:50000 frå NGU. Am står for amfibolitt. (NGU, NA)

Vidare er amfibolittsona (figur 4.1.4) folda og intenst deformert og har ein gradvis overgang mot vest til ei meir anortosittisk samansetning. Basert på mineralsamansetninga og den gradvise overgangen meiner vi at grensa mellom Jotundeckets øvre og nedre del går mellom amfibolitten og mangeritten. Dateringa av gangbergartane (Lundmark & Corfu, 2008) tydar på at øvre og nedre del i Jotundeckket blei sidestilt under den kaledonske orogonesa. I forhold til dette er det rimeleg å anta at observasjonane av dei sterkt deformerte strukturane i grenseområdet beviser at ein har hatt duktil deformasjon i kartleggingsområdet relatert til den kaledonske orogonesa. Dette underbygges også av at strukturmålingane frå feltarbeidet i sum har ei kaledonsk retning (NV-SØ).

Bergartane i området har ein metamorfosegrad som vekslar mellom granulittfacies og amfibolittfacies. Sjølv om det er en del intern variasjon, er det hovudsakelig i dei lågare delane av feltet ein har amfibolittfacies-forhold. Når vi bevegar oss høgre opp i terrenget ser vi at bergartane i større grad har eit granulittisk preg. Det kan tenkjast at desse observasjonane peikar mot at dei lågare delane, nærme skyvesona mellom øvre og undre eining av jotundeckket i større grad vart påverka av den kaledonske innskyvinga.

Ein kan lesa i litteraturen om anortosittane at ein har hatt førkaledonsk retrograd-omdanning i amfibolittfacies (Lundmark & Corfu, 2008) (Griffin, Meillini, Oberti, & Rossi, 1985). Sjølv om omdanninga skal ha vore lokal er det er ikkje utenkelig at det er ei eldre omdanningshending vi ovanfor knyttar til den kaledonske orogonesa.



Figur 4.1.5: Sterk deformasjon også i overgangen til dei meir plagioklasrike bergartane. Foldane akser som står parallellt med innskyvingsretningen under kaldoniene og kan vore danna under ei tidlegare hending (figur 4.1.8).

Dei mindre foldestrukturane i feltet (døme i figur 4.1.9) har omlag eit vinkelrett forhold mellom foldeaksane og minerallineasjonane på foldesjenklane. Sjølv om vi har få målingar frå området, trur vi at desse er representative for dei andre foldane ein finn i grenseområdet. Foldane har hovudsakelig akser som går nordvest-søraust og vinkelforholdet mellom akse og lineasjon kan kanskje tyde på at foldane ikkje er sekundært deformert.

Anortositten som blei frakta frå nordvest mot søraust under den kaldenonske orogonesa (Milnes & Corfu, 2008) burde hatt foldeaksar på tvers av skyveretninga dersom desse foldane vart danna under transporten. Foldeaksane står parallellt på transportretninga og å knytte dei til den kaledonske fjellkjedanninga er ikkje enkelt. Foldane har eit fall som kan peike mot kaledonsk påverknad, men i så tilhøve burde minerallineasjonen på foldesjenklane også følgt transportretninga.

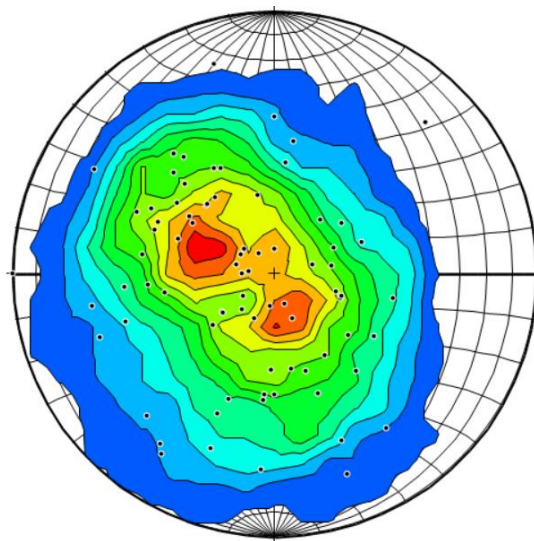
Til tross for desse mindre foldestrukturane ein finn i grenseområdet mellom øvre og undre del av Jotundekket, er det nokre spor som tydar på at bergartane i feltet er folda på ein større skala med vegens i ei søraustlig og kaledonsk retning. Det som fikk oss inn på tanken i første omgang var at ein langs vegen på sørsida av fjorden plutselig får ei endring i fallretning etter svingen ved stopp 9 (fig. 4.1.6). Her er det òg ei forkastning, og vi har

diskutert om strøk-fall-endinga kan skuldast ei fold eller vere skapt av forkastningsaktivitet.



Figur 4.1.6: Kart som synar fallretningstrender langs sørsida av Eidsfjorden.

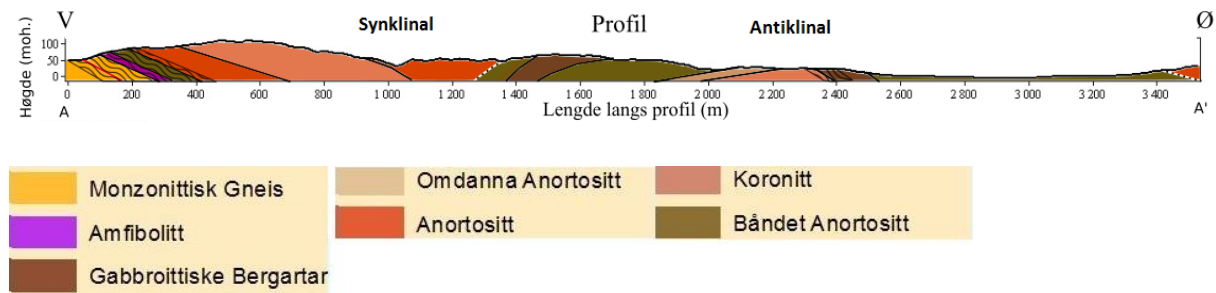
I kontureininga av foliasjonsmålingane ser ein at planpolane konsentrerast i to grupper på kvar si halvkule. (fig. 4.1.7) Sjølv om det er ein del spreing i data meina vi at dette kan underbyggje antagelsane våre om at feltet kan vere folda i ein større skala, mogleg i forbindelse med den kaldeonske orogonesa.



Figur 4.1.7: To polkonsentrasjoner kan bety at feltet er folda mot søraust.

Figur 4.1.7 viser at dei dominerande strøkplana har eit fall på cirka 10-30 grader, noko som kan bety at vi har opne til svært opne foldar i området (Fossen & Gabrielsen, 2013, s. 197). Går ein litt i dybden på desse målingane synar dei gradvis stigande og synkande lag i overnstemmelse med storstilt folding med bølglengde på fleire hundre meter.

I forbindelse med å syne eit snitt av berggrunnen i området har vi laga eit profil orientert aust-vest (figur 4.1.8). Ein pleier ofte å lage profilet vinkelrett på den gjennomsnittlige strøkretingen for berggrunnen, men vi har nytta mest tid langs vegen på austsida av fjorden og vart vi anbefalt å ha det aust-vest. Sjølv om det til dels er eit skråstilt snitt meiner vi at profilet av strekka langs Eidsfjorden synar at ein både kan ha en synklinal og ein antyklinal i området.



Figur 4.1.8: Profil frå vest til aust. Profilet skjærer gjennom foldeskulturen på skrå og derfor er laga litt utstrekke i forhold til kva dei ville vore med ei riktig projisering.

Som ein kan sjå er det nokre av laga som går igjen, medan andre ikkje gjer det. Det kan vere fleire årsakar til at laga ikkje gjentek seg slik ein ville forventa. For det første er det usikkerheit knytta til alle ledd i arbeidet med å lage dette profilet. Større område spesielt i aust er dekkja av skog og skredmasser og i vi har derfor vore nødt til å anta at laget med banda anortositt fortsetter frå omlag 2600m til ein møter på anortositten igjen. Vi er heilt ferske i høve til slikt arbeid og antagelsene våre om at feltet er folda treng nærmare undersøkingar.

Det har vore tatt mange kjerneboringer frå Sogn-Voss anortositten og rapportmaterialet frå til dømes anortalprosjektet kunne hjelpt oss med eit beitre heilhetsbilete. Tanken om ein storskala faldestruktur i området ser uansett ut til å stemme nokonlunde overens med dei rapportane vi har klart å få tak i. Til dømes har Wanvik (1999) også plassert ein antiformal i same område som oss.

4.1.4 Post-kaledonsk tektonikk?

I området finn ein fleire sprøe strukturar. I svingen ut mot Langaneset (fig. 4.1.9) var det ei stor knusingssone som vi mistenker kan vere danna i forbindelse med postkaledonsk ekstensjon. Vi fann ikkje nokre klare retningsmarkører og det var ikkje heilt enkelt å bli klok på knusingssona

Etter ein del diskusjon kom vi fram til at det er mest logisk at forkastningen går parallelt med strøket til bergartane vi fann i knusingssona. Denne orienteringa fører til at forkastninga får same retning som andre posttektoniske ekstensjonstrukturar ein finn i regionen, til dømes Lærdal-Gjende forkastninga (Milnes & Corfu, 2008). Om ein har hatt plastisk deformasjon i området under den kaledonske innskyvinga ville ein kanskje i mindre grad hatt sprø tektonikk. Vi tenkjer derfor at dette er ein sein til postorogen struktur. På dette stadiet av fjellkjedesyklusen har ein fått ei reversering av spenningsfeltet samstundes med at mykje av overliggande masse er erodert vekk. (Bryhni, Nøttvedt, Ramberg, & Rangnes, 2013). Dette gjer at ein muligens i større grad vil få danna sprø normalforkastningar.



Figur 4.1.9: Mogleg normalforkastning frå felt danna i forbindelse med kollaps av den kaledonske fjellkjeda.

4.2 RESSURSPOTENSIALET I KARTLEGGINGSOMRÅDET

Hovudmotivasjonen for å skrive denne oppgåva var å finne ut meir om anortosittens ressurspotensial. Vi har undersøkt bergrunnen rundt Eidsfjorden for å få trening i geologisk kartlegging og for å undersøke om bergartane kan vert nytta som aluminiumsråstoff eller til andre ressursformål.

Ein ressurs er ei kjelde til forsyningar som kan avvendast til å skape godar eller nytte (Miller & Spoolman, 2011). Ressursar er med andre ord eit vidt omgrep som ikkje berre er knytt til økonomisk verdiskapning. Til dømes er arbeidsplasser i distrikta eit uttalt politisk mål ein kan sjå på som ei gode. Ei berekraftig utvinning av aluminiumsråstoff vil vere særst nyttig for å nå klimamåla og mål om å bevare regnskog. Andre vil hevde at alle typar bergverksdrift fører med seg ulemper og at ein heller bør satse på «urban mining», resirkulering og gjenbruk.

I høve til problemstillinga for oppgåva kan ein vri og vende på omgrepet «ressurs» og i spørsmålet om området eigna seg for råstoffutvinning eller ikkje kan ein trekkje fram utallege momentar. Vår hovudoppgåve var å undersøke det geologiske grunnlaget for råstoffutvinning av bergartane rundt Eidsfjord og i den følgdene diskusjonen har vi prøvd å halde oss innanfor vårt fagfelt.

4.2.1 Aluminiumspotensialet

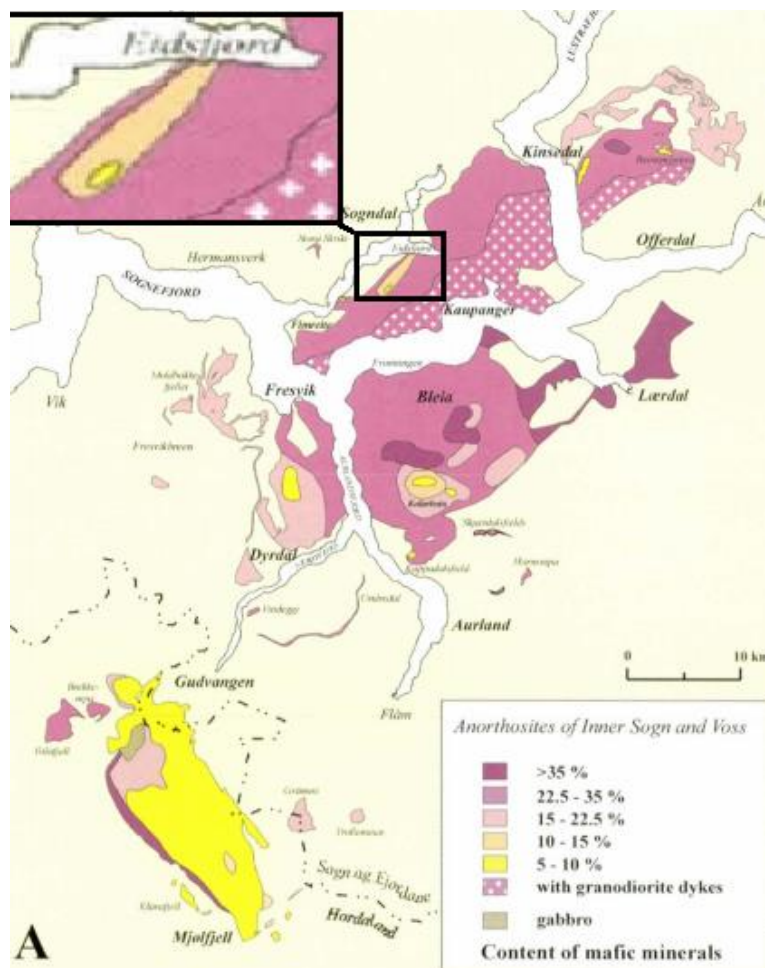
For at anortositten skal vere eigna som kjelde til aluminiumsråstoff må ein ha ei mest mogleg kalsiumrik plagioklassamansetning. Eit lågt kalsiumsinnhald betyr at ein har mindre vektprosent alumina, og vert dermed mindre syreløseleg og ein vil få større utfelling av NaCl under utvinningsprosessen (Norsk Patent: 337196, (2016)). Sjølv om plagioklasen i området har ei gunstig kalsiumrik samansetning (Wanvik, 1999), er det innhaldet av andre mineral som reduserer kvaliteten til dei anortosittiske bergartane rundt Eidsfjord. Det er da hovudsakelig amfibol, pyroksen og granat som gjer anortositten urein.

Bergartane i kartleggingsfeltet har stort sett ei leucogabbroid samansetning og er i samanlikning med dei reinare områda i Gudvangen/Mjølfjell-komplekset mindre

ettertrakta i høve til utvinning av alumina. Under kartlegginga fant vi nokre områder med rein anortositt. Hovudsakelig vil vi trekke fram områder på sørsida av Eidsfjorden som kan ha eit utvinningspotensial. Vi har berre observert desse i blotningar og mektigheita er ukjent. Førekomstane ligg gunstig til ved fjorden med gode moglegheiter for utskipping.

Tidlegare arbeid har påvist anortositt som eigna seg for syreløysing i same område. Det var først Goldschmidt som i 1917 rapporterte om «en temmelig brukbar labradorstein» på sørsida av Eidsfjorden. Under andre verdenskrig vart det tatt fleire prøver frå området og analysar avslørte at plagioklasen hadde ei bytonwittisk samansetning og dermed eigna for syreløysing (Wanvik, 1999).

Inge Brhyni følgde i 1980 dette feltet opp skråninga mot Storehogen. Konklusjon hans var at feltet var mindre interessant, og skriv i rapporten sin; «Over Eldingsknuten (ovanfor Langaneset) synes å vere en antiform slik at benker av gabbroanorthositt faller langs fjellsiden ned mot fjorden. Noen særlig tykkelse av de evt. renere anorthosittlag er det derfor ikke tale om»



Figur 4.1.12: Kart over Sogn-Voss anortositten som syner innhald av mørke mineral (Wanvik, 2000)

Wanvik har i arbeidet med samlerapporten frå NGU i 1999 vore i området og bekrefta Brhynis observasjonar. Han skriv også at ein har reinare områder lengre vest for Langaneset der ein finn anortositt med ein oppløysingsgrad på mellom 83 og 93 prosent. Det er truleg dette området vi har sett oss ut og som er markert på bergrunnskartet vårt som anortositt. Wanvik formidlar at feltet ikkje er heilt utan ressurspotensial, men det er nødvendig med betre undersøking og prøveboring.

Uavhengig om laget er tjukt førekommer det nokre mørke mineral, hovudsakleg amfibol, i blotningane med anortositt. Problemet når det gjeld aksessoriske mineral er at dei vil tilføre den kjemisk oppløyste blandinga kationer som vil på same måte som aluminiumen binde seg til klor under spragingsprosessen (Norsk Patent: 337196, (2016)). Dette resulterer at ein sitt igjen med til dømes aluminiumsklorid, magnesiumsklorid og jernklorid i ein blanding som igjen må skilles frå kvarandre. Vi har ikkje funnet ut kva slags prosesser som finnes for å reinse blandinga, eller kva det har å sei for lønsamheita. Men det kjem tydelig fram i dei fleste rapportar at aksessoriske mineral er uønska og redusera potensialet betydelig (Døme: (Wanvik, 1999)).

Vi har også observert at i samanheng med mørke mineral som til dømes band og koronastrukturar vertr anortositten kvit og meir finkorna. Det kan tenkast at denne typen er albittisert gjennom retrograd deformasjon (ref: Bowens reaksjonsseirer).

Utnytting av bergartane rundt Eidsfjorden til aluminaproduksjon ligg langt fram i tid. Dersom aluminautvinninga blir realisert er det truleg dei reinare førekomstane i Gudvangen/Mjølfjell-området som vert aktuelle for utnytting. Det er Nordic Mining som i dag har patent på Aranda-Mastin-prosessen. Denne prosessen er lovande, men er enda ikkje gjennomført i stor skala. Gruveselskapet har per i dag inga inntekt, og må truleg komme seg på fote økonomisk før aluminiumsprosjektet vidareføres. Poenget er at ein kanskje i framtida har betre metodar for å reinska ut uønska bestanddelar i anortositten og at bergartane rundt Eidsfjorden kan ha eit utvinningspotensial ein gong i framtida.

Sjølv om det var moglegheitene for ei berekraftig aluminiumsproduksjon som fekk oss tent på oppgåva, skal ein ikkje underkjenne ressurspotensialet i høve til pukkverksdrift og utnytting av bergarten som byggeråstoff. Knust berg, også kalla pukk, er i forhold til kommersiell verdi og sysselsetting den viktigaste mineralske råvara i Noreg. I 2013 vart

det utvinna om lag 65 millionar tonn pukk til en verdi av 4.6 milliardar kroner i Noreg og rundt 3000 personer var tilsett i forbindelse med uttak og drift (Neeb, et al., 2015). Det er og det berekna at kvart årsverk i høve til uttak, betyr 3 – 4 årsverk til andre næringar, hovudsakelig til transportnæringa (Neeb, et al., 2014).

Pukk vert stor sett nytta til ulike byggtkniske formål. Pukk har ei høg hydraulisk gjennomstrøymingsevne og vert nytta i fundamentering av bygg- og anleggsprosjekter, slik at ein til dømes unngår innsynking og telehivproblem. Om lag halvparten av pukk-konsumet i Noreg går til vegbygging, der materialet vert nytta både i asfalt og til godt drenerte underlag for vegen.

Det er den fysiske kvaliteten til bergartane som avgjer kva formål dei kan nyttast til. Asfaltbetong (også omtalt som asfalt) består av opp mot 90 prosent steinmasser blanda med det seige hydrokarbonet bitumen. Avhengig av asfaltens bruk vert det stilt ulike kvalitetskrav til steinmaterialet i asfalten (Erichsen, Ulvik, Wolden, & Neeb, 2008). Til dømes vert asfalt i vegdekk utsatt for stor slitasje av partiklar mellom bildekk og asfalten. Vegdekket er kostbart og for å sikre lang levetid bør ein nytte bergartar med ei høg abrasjonsstyrke. Bergartar med gode friksjonsegenskaper er også ettertrakta, samstundes som ein vil unngå for mykje dekkslitasje ved vanleg køyring. Ein kombinasjon av materialval, kornfraksjon og blandingsforhold skapar asfaltens ulike eigenskaper (Erichsen et al 2008). Ulik bruk krev ulik blanding, og avhengig av ønskelege eigenskaper vert det stilt forskjellige krav til steinmaterialet som vert nytta.

Grunnen til at vi trekk fram asfalt som eksempel er fordi det illustrera dei ulike mekaniske og fysiske eigenskaper ein må tenkje på ved val av steinmassar på ein god måte. Andre bruksområder, til dømes steinmasser som fyllmasse, still færre krav til massanes mekaniske eigenskapar.

Ein anna årsak til at vi brukar asfalt som døme er fordi dette formålet er særskilt aktuelt for dei anortosittiske bergartane rundt Eidsfjorden. Ulvik et al (2009) formidlar at bergartane frå pukkverket hovudsakelig går til vegformål og at analyser viser ei særskilt god poleringsverdi for anortositten. Denne verdien er ettertrakta i høve til vegdekk sida det betyr at bergarta har ein god friksjonsmotstand og at som fører til auka trafikksikkerheit. Spesielt blir den kvite omdanna varianten trekt fram i høve til poleringsverdi (Ulvik, Riiber, Erichsen, & Dahl, 2009). Denne bergarten er fin-korna og homogen med ei hardheit på 6-7 (våre undersøkingar, Mohs-skala). Vi har berre funnet mindre førekomstar av denne

anortosittvarianten rundt Eidsfjord og utifrå våre observasjonar vert ikkje varianten utnytta av dei lokale steinbrota.

Bergartane ein finn i steinbrota har ei ulik mineralogisk samansetning. Ved travbana har ein retrograderte bergartar, medan dei som brytast på Valeberg har ein meir høgmetamorf karakter. I brotet ved travbana finn ein i større grad lågmetamorfe mineral, som til dømes kloritt, biotitt og andre sjiktsilikat. I høve til bruk i vegdekke tenker vi oss at desse kan skape problem på fleire måtar. Dei har ei låg motstandsevne og særskild ugunstige fiksjonsegenskapar. Aksessoriske mineral ein finn i brotet på Valeberg er hovudsakelig pyroksen med gode mekaniske eigenskaper. Ein finn òg mykje granat som mellom anna vert anvendt som slipemiddel og som utifrå vår tankegang også bør vere eigna i vegdekke. I begge brota er bergartane banda, noko som vi trur kan vere ei ulempe i forhold til motstand mot oppknusing. Vi vil uansett påpeike at bergartane ved Valeberg er meir eigna i forhold til bruk som stiller krav til mekanisk slitastand.

Eit anna poeng med høve til anortositt i vegdekker, er at bergarten har ein relativt lys farge. Lyse vegdekker er gunstige fordi dei reduserer behov for kunstig belysning. På vestlandet har ein trange dalar og mange tunellar, noko som gjer at ein har behov for opplyste vegar. Mange av vestlandsvegane er landevegar med relativt lite trafikk og kor installering og drift av belysning vil vere vanskelig å forsvare økonomisk.

Dei anortosittiske bergartane kan truleg vert nytta til dei fleste bygg- og anleggsformål. Som nemnt tidlegare leverar Pukkverket på Valeberg råsprengte masser til fundament for den nye Loftesnes-brua som går over til Sogndal. Nytteområdet kan tyde på at bergartane relativt sett er kjemisk motstandsdyktige og tåler å ligge i fjordvatnet, sjølv om vi tviler på at anortositten er godt eigna i eit surt miljø.

Dagleg leiar for pukkverket var relativt kortfatta og beskjeden då vi spurte han om pukkverkets betyding og framtidsutsikter. Sjølv om det er litt utafor vårt fagfelt er det eit par utviklingstrekk vi vil nemne med betyding for etterspørsel etter bygggråstoff i regionen. Det første er tilflytting til kommunen.

I kommuneplanen til Sogndal kommune kan det nesten virke som befolkningsvekst er hovudmålsettinga. Visjonen til kommunen er «Fleir innbyggjarar og auka trivsel i Sogndal». Tal frå Statistisk Sentral Byrå (SSB) syner at Sogndal-regionen har auka folketalet med 17 prosent i perioden 2000 – 2016 på tross av ei sterk sentraliseringstrend

mot større byar i same periode. Med høve til dette er pukkverket ein viktig ressurs i regionen på fleire måtar. For det første er pukkverket ei viktig distriktsnæring som skaper arbeidsplasser og derfor viktig med tanke på kommunens mål om befolkningsvekst. For det andre vil befolkningsvekst truleg føre til auka behov for byggeråstoff.

Det andre utviklingstrekket vi vil nemne er den auka satsinga på vegprosjekt i Noreg. På vegvesenets heimeside kan ein lese planar om enorme oppgraderingar av vegane på Vestlandet. Ein skal bygge ferjefri E39, ny RV55, og oppgradere delar av RV5 som går gjennom kartleggingsfeltet. Fleire tunellar vil verte bygd og store mengder masse kan hentast derfrå. Om pukkverka i feltet er eigna til levering av masser til desse prosjekta skal vi ikkje spekulere meir i, men vi vil nemne at vegane treng asfalt og her eigna anortositten seg særst godt.

Sjølv om ein kanskje ikkje har eit framtidig multimilliard-føretak på Valeberg, er utgraving av dei anortosittiske bergartane i steinbrotet og ved travbana viktig i lokal samanheng. Det blir presisert i ein rapport frå NGU (Ulvik, Riiber, Erichsen, & Dahl, 2009) at pukkverket på Valberg er kommunens viktigaste førekomst når det gjeld byggeråstoff. Potensialet for utviding av brota er det utifrå våre observasjonar med omsyn til kvalitet, inga hindring for. Når det er sagt handlar dette potensialet om meir enn berre råstoffets beskaffenheit, men den debatten overlèt vi til andre.

5.0 KONKLUSJON

I indre delar av Sogn finn ein anortosittiske bergartar med ei lang geologisk utviklingshistorie. Bergartane vart danna som størkningsbergartar djupt i jordskorpa i forbindelse med den svekonorvegiske orogonesa for om lag ein milliard år sidan. Danninga vart følgd av fleire deformasjonshendingar som ein finn spor av i bergrunnen. Mellom anna kan ein sjå spektakulære koronastrukturar som viser at bergarten har vore omdanna i granulitt- og seinare i amfibolittfacies. Enkelte plassar kan ein å sjå spor etter klorittfacies, men dette er veldig lokalt. Omdanningsgraden er mest retrogradert i dei lågareliggende områda og ved Sogndal pukkverk, der vi også fann gongbergartar danna under den kaledonske innskyvinga.

Under den kaledonske fjellkjededanninga vart bergartane frakta langt og stuva saman med andre skyvedekker over det baltiske kraton. Ut i frå observasjonar av deformasjonsstrukturar og mineralogi meiner vi det er sannsynleg at hendinga hadde stor innverknad på bergartane i området.

Det som er spesielt med desse bergartane er at dei er særskild rike på ein kalsiumrik variant av plagioklas. Dette mineralet har vore gjenstand for stor kommersiell interesse fordi det inneheld ei stort mengde av aluminiumsråstoffet alumina, som med ny teknologi lar seg utvinne. I høve til bergrunnen rundt Eidsfjorden, som vi har undersøkt, fann vi kun mindre områder som eigna seg for aluminautvinning.

Eit anna aktuelt og verdiskapande nytteområde for bergarten er pukk. Pukkdrift er den viktigaste mineralnæringa ein har i Noreg, og anortositten har gode fysiske og mekaniske eigenskapar som gjer den ettertrakta til bygg- og infrastrukturformål. I høve til dei geologiske eigenskapane som vi har sett etter, er det eit stort nyttepotensial for bergrunnen rundt Eidsfjord som byggeråstoff. Ein har i dag to pukkverk i området, der ein hovudsakelig i pukkverket ved Valler finn særskild god kvalitet. Dette skuldast at litologien i større grad er høgmetamorf og minerala er tettare og har større slitastjendstand.

Sjølv om vi konkluderte med at bergartane rundt Eidsfjorden har eit høgt innhald av mørke mineral til å klassifiserast som ei mogleg aluminakjelde, tilhøyrar bergartane Noregs største anortosittprovins, som har fleire aktuelle områder for aluminautvinning.

Dei store voluma pur anortositt ein til dømes finn i Nærøydalen og sørover mot Mjølefjell er av

spesielt god kvalitet. Sogn-Voss anortositten er derfor ein nasjonal ressurs med fleire nåverande bruksområder i tillegg til eit stort framtidig potensial som aluminiumsråstoff. Når ein sumerar opp faktorar som volum, reinheit, syreløyslegeheit, nærleik til sjøtransport og den infrastrukturen som er bygd opp i forbindelse med aluminiumsindustrien på Vestlandet, set ein igjen med eit ressurspotensial i særklasse.

Vi må ikkje gløyme at rekneskapet som er nemnt over også inneheld ein del atterhald. Råstoffutvinning er forbundet med ei rekkje miljømessige ulemper, frå stygge sår i landskapet til støy og risiko for forureining. Dei aktuelle områda for utvinning tilhøyrar eit særskilt landskapsområde. Som eit døme er områda rundt Nærøyfjorden rekna for å vere ein typelokalitet for fjordlandskapa i verda og fikk verdsarvstatus av UNESCO i 2005 (Knagenhjelm, Bøthun, & Bjørnstad, 2009).

Etterord/Feilkjelder

Arbeidet med denne bacheloroppgåva har vore ein omfattande men morosam prosess. Vi har lært mykje både om samarbeid og reint fagleg. Vi vil nytte litt plass her til slutt for å reflektere kort rundt arbeidet og trekkje fram nokre lærdommar og moglege feilkjelder.

Ein viktig grunn til oppgåvevalet var iveren til å lære noko nytt og vi hadde lite forkunnskap i forhold til oppgåvetematikken. Det vart derfor nødvendig med ein god del førebuing som involverte studering av relevant fagstoff knytta til bergartane i området. Dette forarbeidet har nok påverka både merksemda vår i felt og resonnementa våre i høve til forståelsen av feltområdet. Ein har ordtak som seier «den som leter finner» og «den som vet hva han leter etter finner det alltid». På den andre sida så hadde vi neppe vore i stand til å trekkje nokre fornuftige slutningar utan den eksisterande litteraturen frå området.

Samstundes som det kanskje er noko vi ubevisst har leita etter, tykkjer vi det har vore veldig interessant å få kaledonske retningskomponentar i feltresultata. Desse har vi tolka til å vere danna under orogonsesyklusen, men dette er umulig å vite sikkert. Som nemnt tidlegare er det usikkerheitsmoment knytta til alle ledd av undersøkinga. Bergartsgrenser er til dømes bestemt basert på vår subjektive oppfatning og det var ikkje mogeleg å trekkje slike sylskarpe grenser i felt som ein kan få intrykk av i kart og i profilet. Grensene saman med litologien er nokre av grunnlaget for vår oppfatning av området og her kan det liggje fleire feilkjelder.

Vidare trur vi også det kan være fleire feilkjelder ved strukturmålingane våre. Til dømes viste stereoplotta stor spreing i data og kontureringa er basert på 80 foliasjonsmålingar. Sjølv om vi har hatt ei innføring i statistikk er vi usikre på om målingsomfanget kan gje signifikante tolkingar i betraktning av den store spreinga i data, usikkerheitsmomentet i forhold til målingar og størrelsen på området vi har kartlagt. Det er mange ting vi vidare kunne nemnt om feilkjelder og liknande, men vi skal ikkje strekkje denne avslutninga til det uendelege.

Før vi rundar av vil vi nemne at sjølv om arbeidet med oppgåva til tider har vore krevjande, føler vi at det i sum har vore veldig gøy å arbeide sjølvstendig på denne måta. Vi har vore tre studentar om oppgåva, og medan ein av oss har vore busatt i Sogndal, har to av oss haldt til i Oslo området dette sist studieåret ved HiSF. Sjølv om dette har medført nokre ulemper har lært mykje om samarbeid og vi har klart å komme i mål takket være internett og god rettleiing.

Referanser

- Ashwal, L. D. (1993). *Anorthosites*. NA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bingen, B., Nordgulen, Ø., & Viola, G. (2008, Januar NA). A four-phase model for the Sveconorwegian orogeny, SW Scandinavia. *Norwegian Journal of Geology Volume 88*, pp. 43-72.
- Breivik, Ø., & Carlsen, C. L. (2011, Juni 20). Prosjektanalyse av aluminiumsindustri. Kan vi forvente nyinvesteringer i norge? *Selvstendig utredning Institutt for Foretaksøkonomi*. Bergen, Hordaland, Norge: Noregs Handelshøgskule .
- Brunori, C., Cremisini, C., Massanisso, P., Pinto, V., & Torricelli, L. (2005, Januar 14). Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility. *Journal of Hazardous Materials Volume 117, Issue 1*, pp. 55–63.
- Bryhni, I., Brastad, K., & Jacobsen, V. W. (1983, NA NA). Subdivision of the Jotun Nappe Complex between Aurlandsfjorden and Nærøyfjorden, South Norway. *Geological Survey of Norway 1858-1983. 125-year anniversary volume*, pp. 23-33.
- Bryhni, I., Nøttvedt, A., Ramberg, I. B., & Rangnes, K. (2013). *Landet blir til: Norges geologi 2. Utgave*. Trondheim: Norsk Geologisk Forening.
- Bryhni, I. (2009, 02 14). *Mohorovičićs diskontinuitet*. Retrieved from Store Norske Leksikon: https://snl.no/Mohorovi%25C4%258Di%25C4%2587s_diskontinuitet

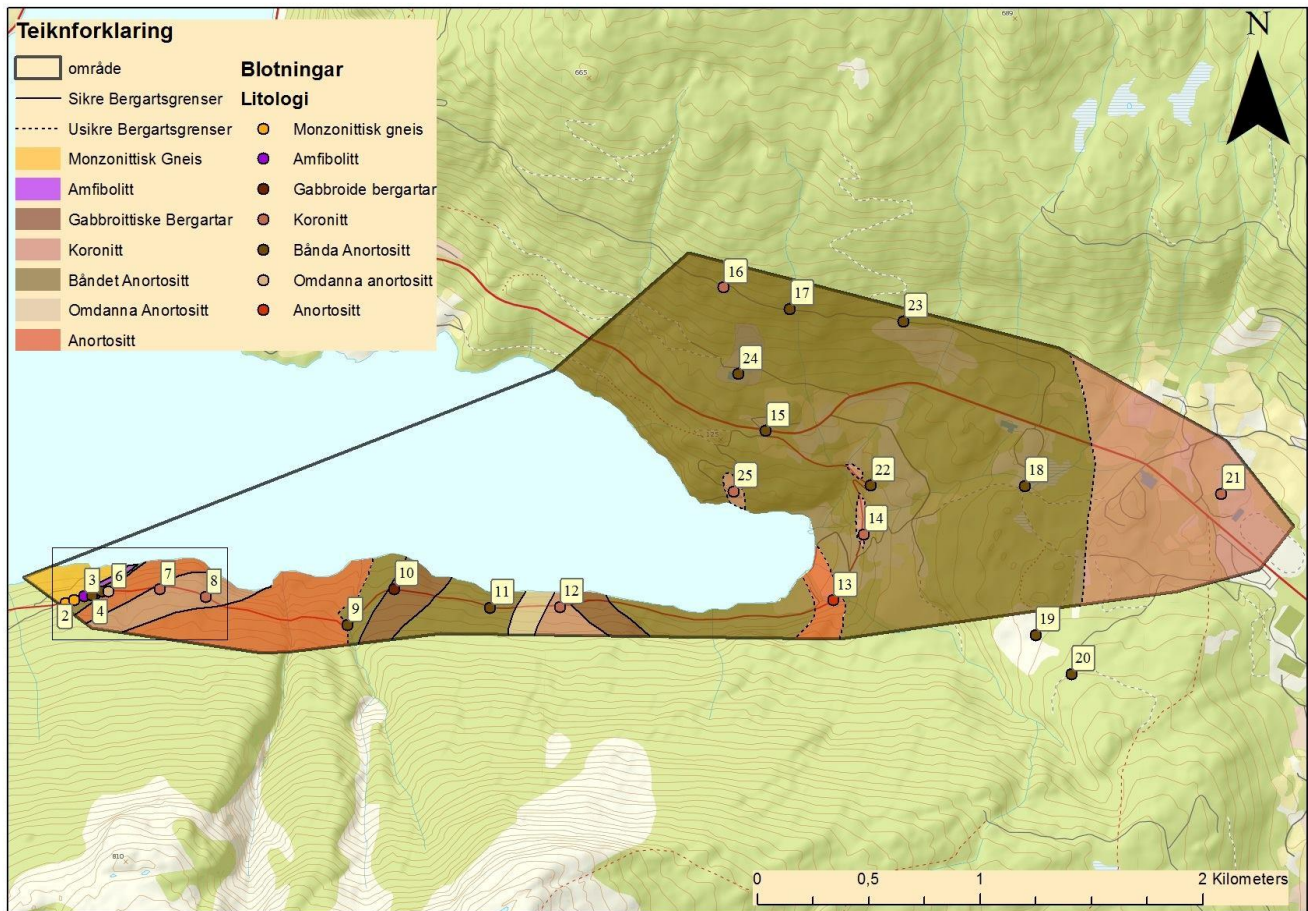
- Bybee, G., L.D.Ashwal, S.B.Shirey, M.Horan, T.Mock, & T.B.Andersen. (2014, Mars 1). Pyroxene megacrysts in Proterozoic anorthosites: Implications for tectonic setting, magma source and magmatic processes at the Moho. *Earth and Planetary Science Letters Volume 389*, pp. 74-85.
- Carstens, H. (2007, Mai NA). Ny Milliardindustri. *GEO 10. Årgang, Nr.3*, pp. 24-27.
- Charlier, B., Duchesne, J.-C., Auwera, J. V., Storme, J.-Y., Maquil, R., & Longhi, J. (2010, November 23). Polybaric Fractional Crystallization of High-alumina Basalt Parental Magmas in the Egersund-Ogna Massif-type Anorthosite (Rogaland, SW Norway) Constrained by Plagioclase and High-alumina Orthopyroxene Megacrysts. *Journal Of Petrology*, pp. 2515-2546.
- Corfu, F. (2004, Juli 22). U–Pb Age, Setting and Tectonic Significance of the Anorthosite–Mangerite–Charnockite–Granite Suite, Lofoten–Vesterålen, Norway. *Journal of Petrology Volume 45, Issue 9*, pp. 1799-1819.
- Deal, M. (1978, Januar NA). United States Dependence on Caribbean Bauxite and the Formation of the International Bauxite Association. *Maryland Journal of International Law Volume 4. Issue 1*, pp. 68-76.
- Earle, S. (2015, NA NA). *Physical Geology*. Retrieved from BC Open Textbooks: <https://opentextbc.ca/geology/>
- Erichsen, E., Ulvik, A., Wolden, K., & Neeb, P.-R. (2008, NA NA). Aggregates in Norway—Properties defining the quality of sand, gravel and hard rock for use as aggregate for building purposes. *Geological Survey of Norway, Special publication 11*, pp. 37-46.
- Fossen, H. (NA, NA NA). *Geology of the Bergen area*. Retrieved from Haakon Fossen Website: <http://www.folk.uib.no/nglhe/BergenGeo.html>
- Fossen, H., & Gabrielsen, R. H. (2013). *Strukturgeologi 2. Opplag*. Bergen: Fagbokforlaget Vigmostad & Bjørke AS.
- Frost, B., & Frost, C. (2013). *Essentials of Igneous and Metamorphic Petrology*. New York: Cambridge University Press.
- Griffin, W. L. (1971, Juni NA). Genesis of Coronas in Anorthosites of the Upper Jotun Nappe, Indre Sogn, Norway. *Journal of Petrology Volume 12, Issue 2*, pp. 219-243.
- Griffin, W. L., Meillini, M., Oberti, R., & Rossi, G. (1985, Desember NA). Evolution of coronas in Norwegian anorthosites: re-evaluation based on crystal-chemistry and microstructures. *Contributions to Mineralogy and Petrology Volume 91, Issue 4*, pp. 330-339.
- Herak, D., & Herak, M. (2005, NA NA). *About Andrija Mohorovičić*. Retrieved from Andrija Mohorovičić's memorial rooms: <http://www.gfz.hr/sobe-en/andrija.htm>
- Herz, N. (1969, Mai 23). Anorthosite Belts, Continental Drift, and the Anorthosite Event. *Science*, pp. 944-947.

- Hind, A. R., Bhargava, S. K., & Grocott, S. C. (1999, Jaunar 15). The surface chemistry of Bayer process solids: a review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects Volume 146, Issues 1–3*, pp. 359–374.
- Hovland, K. M. (2011, Jaunar 7). *Norges 17 nye mineraler*. Retrieved from Teknisk Ukeblad: <http://www.tu.no/artikler/industri-norges-17-nye-mineraler/249389>
- Hydro i Norge. (2013, Oktober 16). *Utvinning av bauxitt*. Retrieved from Hydro i Norge: <http://www.hydro.com/no/Hydro-i-Norge/Om-aluminium/Aluminiumens-livssyklus/Utvinning-av-bauxitt/>
- Hynes, A., & Rivers, T. (2010, Juni 4). Protracted continental collision — evidence from the Grenville Orogen. *Canadian Journal of Earth Sciences Volume 47, Issue 5*, pp. 591-620.
- Johansen, H. (2012, Juni 8). Aluminium. *Kompendium / Høgskulen i Gjøvik nr.5*. Gjøvik: Høgskulen i Gjøvik.
- Knagenhjelm, T. K., Bøthun, S. W., & Bjørnstad, K. (2009). Parkplan for Nærøyfjorden Verdsarvpark. Strategi for verdiskaping basert på berekraftig utvikling. *Rapport 6 - 2009*. Aurland: Aurland naturverkstad AS.
- Koestler, A. G. (1982, NA NA). A Precambrian age for the Ofredal granodiorite intrusion, Central Jotun Nappe, Sogn, Norway. *Norwegian Journal of Geology Volume 62, Issue 3*, pp. 225-228.
- Korneliussen, A. (2012). *Muligheter for verdiskaping ved CO₂ - basert prosessering av mineralske råvarer: Egnede forekomster i Nordland*. Trondheim: NGU.
- Kühn, A., Glodny, J., Austrheim, H., & Råheim, A. (2002, NA NA). The Caledonian tectono-metamorphic evolution of Lindås Nappe: Constraints from U-Pb, Sm-Nd and Rb-Sr ages granitoid dykes. *Norwegian Journal of Geology Vol 82*, pp. 45-57.
- Lim, K. L. (2014, Oktober 17). *Hungary's rivers in recovery after red mud disaster*. Retrieved from Royal Society of Chemistry: <http://www.rsc.org/chemistryworld/2014/10/hungary-ajka-red-mud-river-system-recovery>
- Lundmark, A. M., & Corfu, F. (2008, Juli NA). Emplacement of a Silurian granitic dyke swarm during nappe translation in the Scandinavian Caledonides. *Journal of Structural Geology Volume 30, Issue 7*, pp. 918-928.
- Lundmark, A., & Corfu, F. (2008, Februar NA). Late-orogenic Sveconorwegian massif anorthosites in the Jotun. *Contributions to Mineralogy and Petrology Volume 155, Issue 2*, pp. 147-163.
- Lundmark, A., Corfu, F., Spürgin, S., & Selbekk, R. (2007, November 15). Proterozoic evolution and provenance of the high-grade Jotun Nappe Complex, SW Norway: U–Pb geochronology. *Precambrian Research Volume 159, Issues 3–4*, pp. 133-154.
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., & Tasa, D. (2012). *Essentials of Geology 11th Edition*. NA: Pearson Education, inc.
- Marker, M. (2004). *Anortositt for pukk i Rogaland Anortosittprovins*. Trondheim: NGU.

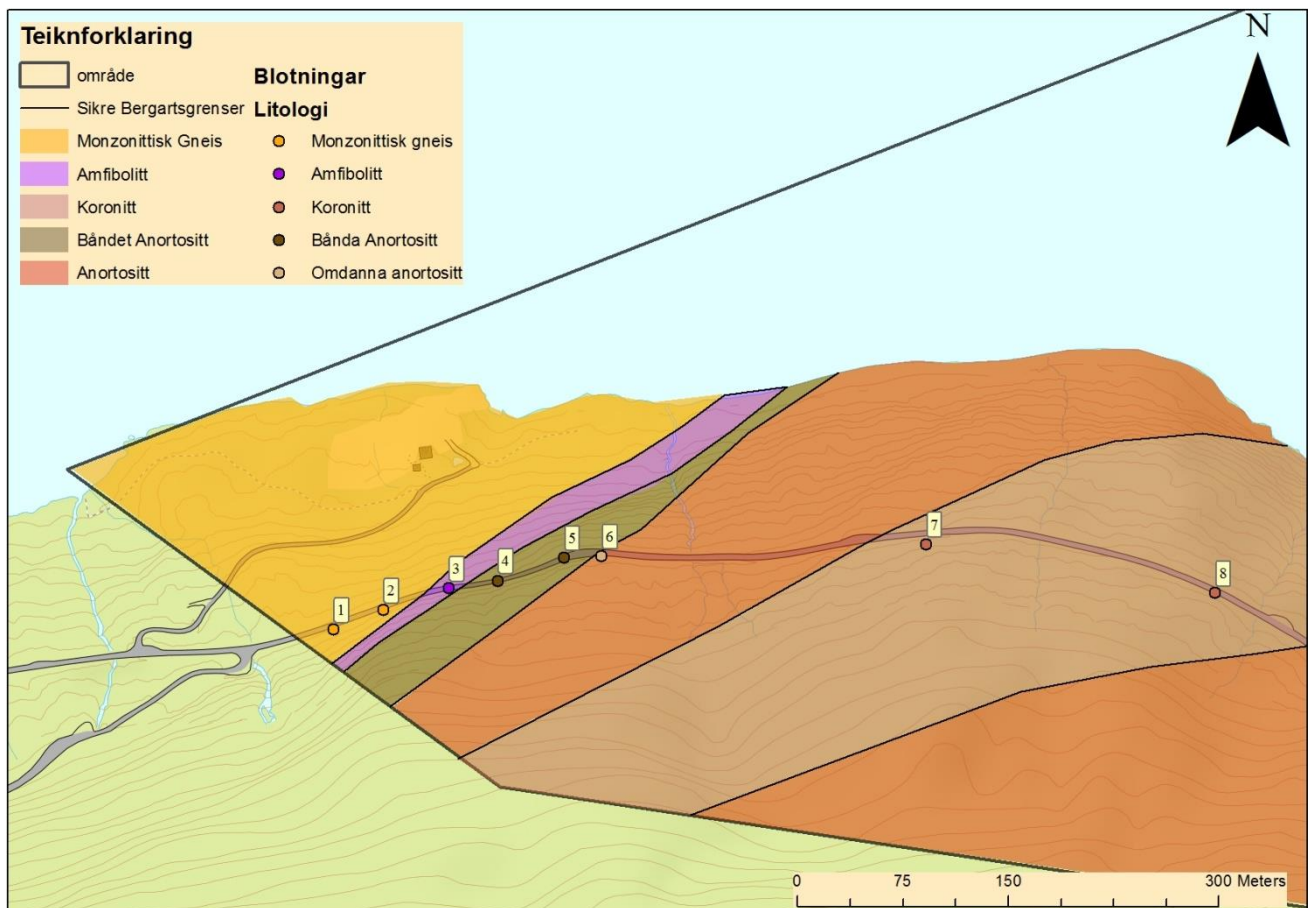
- Menzie, W., Barry, J., Bleiwas, D., Bray, E., Goonan, T., & Matos, G. (2010). *The Global Flow of Aluminum From 2006 Through 2025*. Reston: U.S Geological Survey.
- Meyer, G. (2015, Juni 10). *Anortositt*. Retrieved from GEO 365:
<http://www.geo365.no/geoturisme/anortositt/?fromCategory>
- Miller, G. T., & Spoolman, S. (2011). *Living in the Environment: Principles, Connections, and Solutions, 17th Edition*. NA: Cengage Learning.
- Milnes, A. G., & Corfu, F. (2008, NA NA). *No. 28. Structural geology and tectonic evolution of the Sognefjord transect, Caledonian Orogen*. Retrieved from International Geological Congress - 33:
<http://iugs.org/33igc/fileshare/filArkivRoot/coco/FieldGuides/No%2028%20Sogenfjord%20traverse%20med.pdf>
- Milnes, A. G., & Corfu, F. (2011). *Structural Geology and Tectonic Evolution of the Sognefjord Transect, Caledonian Orogen, Southern Norway—A Field Trip Guide*. NA: Geological Society of America.
- NCB News. (2010, 11 10). *Human negligence: Toxic sludge boss arrested*. Retrieved from NCB News:
http://www.nbcnews.com/id/39610356/ns/world_news-europe/t/human-negligence-toxic-sludge-boss-arrested/#.V0w7gL7whaj
- Neeb, P.-R., Tangstad, R., Libach, L., Dahl, R., Sandvik, G., Strand, G., . . . Kaasbøll, B. (2014). *Mineralressurser i Norge 2013. Mineralstatistikk og bergindustriberetning*. Trondheim: NGU.
- Neeb, P.-R., Tangstad, R., Libach, L., Dahl, R., Sandvik, G., Strand, G., . . . Kaasbøll, B. (2015). *Mineralressurser i Norge i 2014. Mineralstatistikk og bergindustriberetning*. Trondheim: NGU.
- Nesse, W. D. (2012). *Introduction to Mineralogy: International Second Edition*. New York: Oxford University Press.
- NGU. (NA, NA NA). *Berggrunn (1:50000)*. Retrieved from NGU: <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/>
- NGU. (NA, NA NA). *Grus og Pukk Karttjeneste*. Retrieved from NGU:
http://geo.ngu.no/kart/grus_pukk/
- Nordic Mining ASA. (2016). Norsk Patent: 337196: En ny fremgangsmåte for fremstilling av alumina og karbonat fra aluminiumrike materialer med integrert CO2 utnyttelse. Oslo: Patentstyret.
- Nordic Mining ASA. (2016, Oktober 6). *Pressemelding: Patentsøknad om ny teknologi for aluminaproduksjon er godkjent*. Retrieved from Institutt for Energiteknikk - IFE:
https://www.ife.no/no/ife/ife_nyheter/2015/joint-press-release-patent-application-for-new-alumina-technology-approved
- Nordic Mining. (NA, NA NA). *Alumina from Anorthosite*. Retrieved from Nordic Mining:
<http://www.nordicmining.com/alumina-from-anorthosite/category8.html>
- Plunkert, P. A. (2000). *Bauxite and Alumina*. NA: US Geological Survey.

- Porter, J. K. (2014, Desember NA). Reactions involving S-scapolite and sulphides during reworking of granulite facies anorthosites, Lindås Nappe, western Norway. *Master's Thesis, Departement of Geosciences*. Oslo, Oslo Kommune, Noreg: University of Oslo.
- Qvale, H. (1980). *En oversikt over Jotundekketts anorthositt-forekomster I Nordhordaland og Indre Sogn*. Trondheim: NGU.
- Schärer, U., Wilmart, E., & Duchesne, J.-C. (1996, April NA). The short duration and anorogenic character of anorthosite magmatism: U-Pb dating of the Rogaland complex, Norway. *Earth and Planetary Science Letters Volume 139, Issues 3–4*, pp. 335-350.
- Skotner, K. R. (NA, NA NA). *Aluminium*. Retrieved from Norsk Industri: <https://www.norskindustri.no/Bransjer/Aluminium/>
- Stølen, S. (NA, NA NA). *Fremstilling:Al:Periodesystemet.no*. Retrieved from Universitetet i Oslo: <http://www.mn.uio.no/kjemi/tjenester/kunnskap/periodesystemet/vis.php?e=Al&id=258>
- Sæle, R. (2008, September 3). *Lagar pilotanlegg til 50 millionar*. Retrieved from Sogn Avis: <http://www.sognavis.no/nyhende/lagar-pilotanlegg-til-50-millionar/s/1-105-3761998>
- Søgnen, S. (2001, NA NA). (*Søkeord | Tittel: Kinsedalen, Forfatter:Søgnen*) *Kulturhistorisk Leksikon*. Retrieved from Fylkesarkivet i Sogn og Fjordane: <http://www.fylkesarkiv.no/kl/detalj/?id=256>
- The International Aluminium Institute. (2012, NA NA). *Refining Process*. Retrieved from Aluminum for Future Generations: <http://bauxite.world-aluminium.org/refining/process.html>
- Ulvik, A., Riiber, K., Erichsen, E., & Dahl, R. (2009). *Ressursregnskap og forekomstvurderinger av sand, grus og pukk i Sogn og Fjordane fylke 2007*. Trondheim: NGU.
- Wanvik, J. E. (1994). *Anortosittundersøkelser ved Mjølfjell for Borgestad Fabrikker*. Trondheim: NGU.
- Wanvik, J. E. (1999). *Anortositt-ressurser i Indre Sogn og Voss*. Trondheim: NGU.
- Wanvik, J. E. (2000). *Norwegian anorthosites and their industrial uses, with emphasis on the massifs of the Inner Sogn-Voss area in western Norway*. Trondheim: NGU.
- Wanvik, J. E. (2010). *Summary of knowledge about Norwegian anorthosite prospecting - in relation to Greenland anorthosites*. Trondheim: NGU .
- Wilson, J. R., Robins, B., & Thjømøe, P. (2008, Mai NA). *Opplæringsressursar*. Retrieved from Magma Geopark Norge: <http://issuu.com/magmageopark/docs/excursion-guide/1?e=0/31882319>

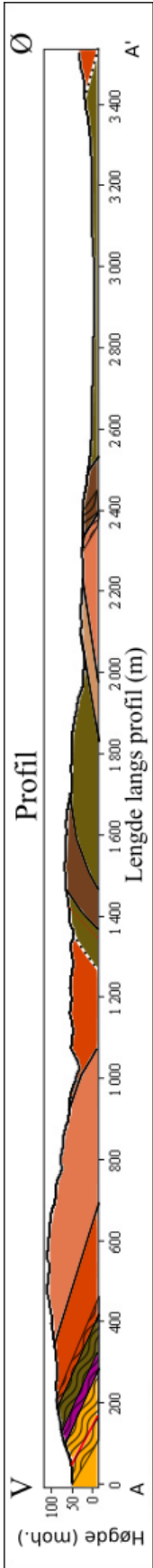
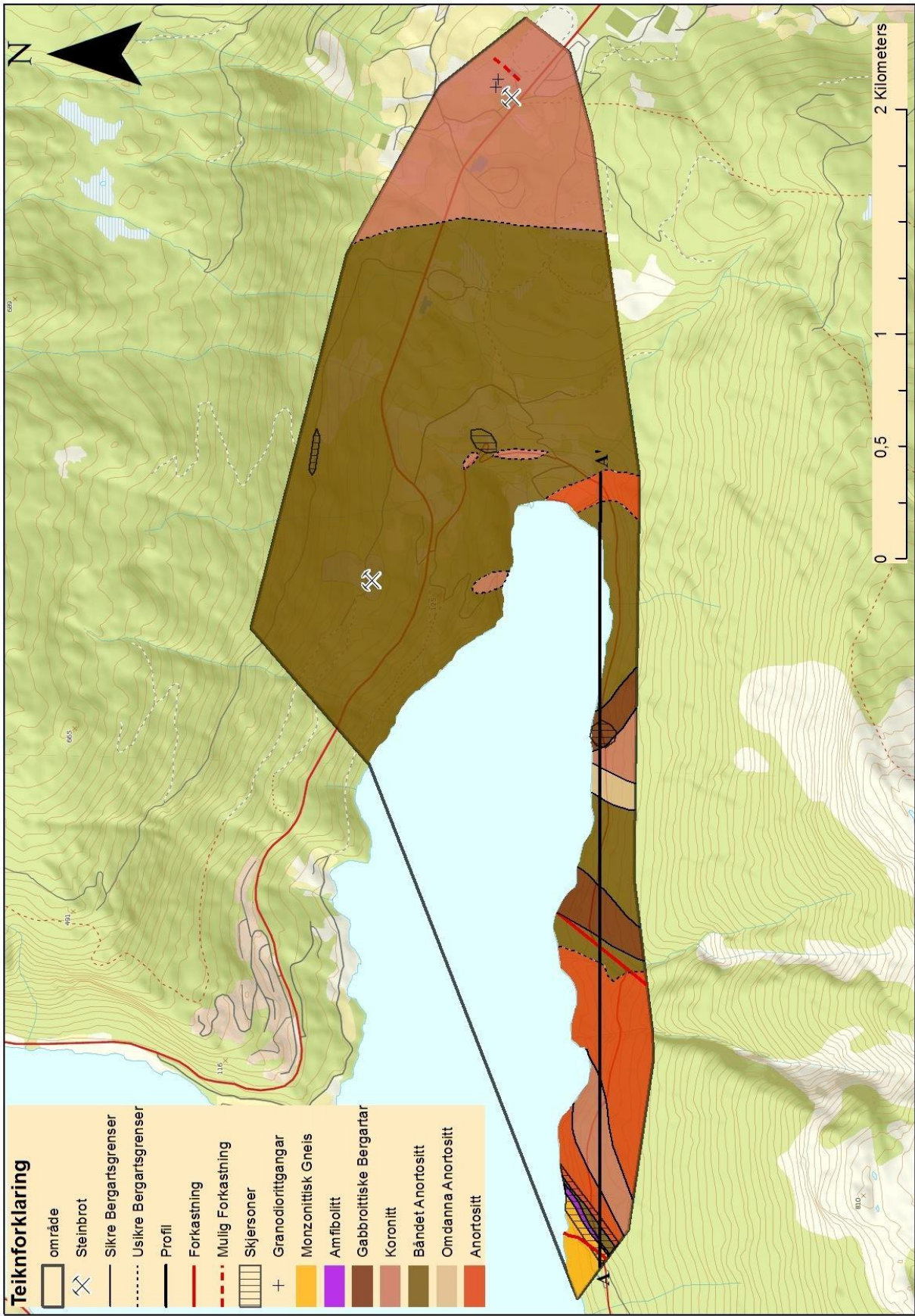
Vedlegg 1



Oversiktskart over området med litologi og Gpspunkt. Legg merke til at vi har mange punkter innenfor firkanten vest i feltet. Det var her vi begynte feltarbeidet og eit forstørra utsnitt ser ein under:



Vedlegg 2. Bergrunnskart og profil



Vedlegg 3. Strukturkart

