57 A4/A3

ULTRAMAFITER I SVENSKA DELEN AV FJÄLLKEDJAN - MÖJLIG SLUTFÖRVARINGSPLATS FÖR RADIOAKTIVT AVFALL?

Jimmy Stigh, 1982.

Rapport till Svensk Kärnbränsleförsörjning AB.

© Sveriges geologiska undersökning (SGU)
(Geological Survey of Sweden)

ULTRAMAFITER I SVENSKA DELEN AV FJÄLLKEDJAN SOM MÖJLIG SLUTFÖRVARINGSPLATS FÖR RADIOAKTIVT AVFALL

Sammanfattning:

Under mina undersökningar av ultramafiter i de svenska fjällen uppkom tanken på att dessa ultramafiter borde vara geologiskt lämpliga som förvaringsalternativ för radioaktivt avfall. De ultramafiska bergarterna, som förekommer i den skandinaviska fjällkedjan, indelas i fem olika kategorier. Av dessa är endast ultramafiter av s k Alpin-typ av intresse i diskussionen om möjlig slutförvaringsplats för radioaktivt avfall. Ultramafiter av Alpin-typ uppträder som solitära massiv, bestående enbart av ultramafiska bergarter, som domineras av Fe- och Mg-rika silikatmineral (olivin, pyroxen och serpentinmineral). Ultramafiterna är belägna i fjällens skollberggrund och har alla genomgått den kaledonska deformationen utan att brytas sönder. Massiven uppträder i fält som rödaktiga, linsformade kroppar, vilkas höjd över de omkringliggande, i allmänhet sedimentära bergarterna, varierar från några få till uppemot hundra meter. Storleken (arealen) varierar från några m^2 till omkring 10 km^2.

Solitära ultramafiter med låg Al_2O_3-halt (ca 1 %) har troligen sitt ursprung från en geokemisk utarmad övre del av manteln. Vid ett tidigt, troligen preorogent stadium, förändrades bergarterna från en dunitisk-harzburgitisk sammansättning till en serpentinsammansättning. Denna omvandling beror på ett tillskott av H_2O. Olivin och pyroxen omvandlas till serpentinmaterial. Serpentinitmaterialet har en annan densitet (2600 kg/m^3) än vad som är normalt för övre manteln (3000 - 3150 kg/m^3). Detta medför att materialet intruderade i ett kallt plastiskt tillstånd (protruderade) från en lägre nivå in i kontinentmaterialet. Denna

protrusionsmekanism (diapirism) medför att de solitära låg-Al-ultramafiterna, idag belägna i fjällkedjan, är "rörliga" kroppar, belägna i Kaledonidernas metasediment. Ultramafiterna uppträder således som stora linsformade kroppar ("tvålar"). Bergarten i sig själv är deformationsmässigt kompetent, men bergartskroppen reagerar ändå plastiskt i sin omgivning. Förkastningar tas ut i kontaktzonen mellan ultramafit och omgivande berg. Ultramafiterna uppvisar en positiv spricktektonik (dvs sprickfrekvensen troligen högre i massivets ytterkanter och mindre i massivets centrala del) och en bra "självläkande" mineralogi. En tillräckligt stor kropp, Rödfjället, öster om Blåsjön i Jämtland diskuteras som ett intressant objekt.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning
Innehållsförteckning

I INLEDNING

II ALLMÄN INTRODUKTION AV ULTRAMAFITER
1 Ultramafitkategorier
2 Ultrabasiska bergarters klassifikation

III FJÄLLKEDJANS UPPBYGGNAD SAMT ULTRAMAFITER INOM DEN SVENSKA DELEN AV KALEDONIDERNA
1 Det autoktona underlaget och överliggande autoktona sedimentbergarter
2 Lägre skollberggrunden
3 Mellersta skollberggrunden
4 Övre skollberggrunden
5 Den översta skollberggrunden - Rödingsfjällsskollan
6 Historik och viktigare arbeten om ultramafiterna i svenska fjällen.

IV ULTRAMAFITERNAS UPPTRÄDANDE I FÄLT

V MINERALOGI - PETROLOGI

VI GEOKEMI

VII ULTRAMAFITERNAS GEOLOGISKA HISTORIA

VIII SAMMANSTÄLLNING AV ULTRAMAFITPROBLEMATIKEN I SAMBAND MED SLUTFÖRVARING AV RADIOAKTIVT AVFALL

IX RÖDFJÄLLET - ETT STORLEKSMÄSSIGT INTRESSANT OBJEKT OCH FÖRSLAG TILL UNDERSÖKNING AV DETTA.

REFERENSLISTA

I INLEDNING

AKA-utredningen som lämnade sitt betänkande i april 1976 kom till slutsatsen, att den slutliga förvaringen av radioaktivt avfall bör ske i urberg. Utredningen påpekar dock att det finns andra bergarter som ger alternativa förvaringsmöjligheter, men i Sverige är urberget det bästa förvaringsalternativet.

Under mina undersökningar av ultramafiterna i de svenska fjällen (Stigh, 1979, 1980, 1981; Stigh & Ronge, 1978; Qvale & Stigh, in press) uppkom tanken att dessa ultramafiter borde vara lämpliga som förvaringsalternativ för radioaktivt avfall. Kontakt togs med universitetslektor Bo Ronge, Göreborgs universitet, och vid ett besök i Luleå diskuterades frågan med professor Ove Stephansson. I ett remissvar angående KBS I från professor K Gösta Eriksson, Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola/Göteborgs universitet, påpekades att ultramafiterna i fjällkedjan ur geologisk synpunkt borde undersökas som förvaringsalternativ för radioaktivt avfall. Denna åsikt framfördes ånyo i remissvaret till KBS II.Kontakt togs vidare med Kaj Ahlbom, Sveriges geologiska undersökning, Uppsala, som förde tankegångarna på fjällens ultramafiter som förvaringsalternativ för radioaktivt avfall vidare till KBS. Under våren 1981 ombads jag komma in med en offert angående en rapport, som skulle behandla ultramafiterna i fjällkedjan som möjlig slutförvaringsplats för radioaktivt avfall. En beställning (81-100) av en sammanställning av data beträffande ultramafiter gjordes av KBS i juli 1981. Syftet med rapporten är att redovisa fjällkedjans ultramafiter som en, ur geologisk synpunkt, möjlig förvaringsplats för radioaktivt avfall.

Givande synpunkter på rapportens utformning har jag fått från docent B. Allard, statsgeolog K. Ahlbom, forskarass. T. Claesson, professor K Gösta Eriksson, professor G. Gustafson, universitetslektor B. Ronge och avd dir E. Zachrisson.

II ALLMÄN INTRODUKTION AV ULTRAMAFITER

För att kunna redovisa fjällkedjans ultramafiter krävs en introduktion till ultramafitproblematiken. Med ultramafit menas en extremt mafisk bergart, dvs endast mörka mineral förekommer. De felsiska (ljusa) mineralen, kvarts och fältspat, saknas i de flesta fall helt. De mafiska mineralen utgöres av olivin, pyroxener, serpentinmineral (normalt antigorit) samt spineller. Ultramafiterna är till sin kemi extremt basiska (ultrabasiska), dvs SiO_2-halten överstiger ej 45 %.

II.1 Ultramafitkategorier

De ultramafiska bergarterna som förekommer i Skandinaviska fjällkedjan, kan indelas i fem olika kategorier (Qvale & Stigh, 1981 och in press). Dessa kategorier är a) lager och linser inom basiska intrusioner, b) ultramafiska högtemperatur intrusioner, c) ultramafiska noduler/xenoliter, d) ultramafiter av s k Alpin-typ samt e) detritiska serpentiniter. I den svenska delen av fjällkedjan förekommer inga hög-temperaturintrusioner och inte heller har ultramafiska noduler/xenoliter observerats.

Ultramafiska lager och linser inom basiska intrusioner förekommer i mindre omfattning i den svenska delen av Kaledoniderna. Dessa lagrade intrusioner domineras av basiska bergarter, medan ultramafiter utgör en underordnad komponent. En differentiation från ultrabasiska till basiska bergarter jämte växellagring mellan led, rika på FeMg-mineral respektive plagioklas karakteriserar lagrade intrusioner. Ett antal massiv i fjällkedjan (t ex basiterna i Åreområdet) kan tillhöra denna del. Dessa massiv är små och har inget intresse i diskussionen om en möjlig slutförvaringsplats för radioaktivt avfall.

Alpin-typen är svårdefinierad och termen ultramafisk Alpin-typ refererar i den ursprungliga definitionen (Benson, 1926) till alla ultramafiska bergarter, som uppträder i bergskedjor av Alpin-typ.

Ultramafiter av Alpin-typ kan indelas i ultramafiter relaterade till ofioliter samt i solitära ultramafiter. Med ofioliter menas associationen mellan en basal, ultramafisk zon, överlagrad av basiska bergarter av gabbroid sammansättning, som i sin tur övergår i vulkaniska ytbergarter (basalter). Ofiolitkomplex har under senare år beskrivits från den norska delen av fjällkedjan (Furnes et al., 1980). Liknande bergartssekvenser förekommer i Umbuktamassivet i Rödingsfjällsskollan (Flodberg & Stigh, 1981).

De flesta i fjällkedjan förekommande ultramafiterna uppträder som solitära massiv, bestående enbart av ultrabasiska bergarter. Relationen till basiska gabbrobergarter saknas och alla kriterier antydande differentiation saknas. Det är till denna typ som intresset till förvaringsalternativ för radioaktivt avfall koncentrerats.

Ytterligare en typ av ultramafiter förekommer, nämligen detritiska serpentiniter, inkluderande serpentinitkonglomerat och finkorniga serpentinitsediment. Denna typ utgörs av sedimentärt omlagrade, massiva ultramafiter.

II.2 Ultrabasiska bergarters klassifikation

Bergarter med enbart mörka mineral, s k ultramafiska bergarter förekommer i många olika geologiska miljöer i jordskorpan. I Sverige uppträder ett ovanligt stort antal solitära ultramafiter inom fjällkedjan i jämförelse med urberget öster om fjällranden, där ultramafiska bergarter uppträder tämligen sporadiskt.

De solitära ultramafiterna inom fjällkedjan har en kemisk och delvis mineralogisk sammansättning, som överensstämmer med den troliga sammansättningen av den övre delen av manteln (Coleman, 1977; Davies, 1971; Ringwood, 1975). Mantelns övre del antas på goda grunder bestå av ultramafiska bergarter, helt dominerade av mineralen olivin, ortopyroxen, klinopyroxen och spinell. Plagioklas saknas fullständigt. Den kemiska sammansättningen betecknas som ultrabasisk, dvs SiO_2-halten är extremt låg (< 45 %).

Vid ingen eller ringa serpentinomvandling har den övre mantelns ultramafitmaterial hög densitet. Genom tillförsel av vatten omvandlas den tunga olivin-pyroxenrika ultramafiten till en lättare, serpentinförande ultramafit. Serpentiniseringen gör det således möjligt att det normalt tunga mantelmaterialet kan stiga uppåt (diapirism). Under fjällkedjans bildningstid (sedimentation, veckning, metamorfos och överskjutning) kom de ultramafiska bergarterna på plats bl a genom diapiriska processer. Det är för övrigt denna diapirism som tillsammans med ultramafitens mineralogi som ger fjällens ultramafiter förutsättningar ur avfallsdeponeringssynpunkt.

De ultramafiska bergarterna domineras av Fe- och Mg-rika silikatmineral och innehåller alltid mindre än 10 % plagioklas. SiO_2-halten är, som redan nämnts, mindre än 45 %. Nomenklaturen är komplicerad och åtskilliga klassificeringar står att finna i litteraturen.

Den klassifikation som användes i denna rapport är dels modal, dels normativ.

Den modala sammansättningen är baserad på den verkliga (nuvarande) halten av olika Fe/Mg-mineral (Jackson, 1970). Indelningen bygger på halten olivin i relation till övriga

silikatmineral (Tabell 1). Klassificeringen har skett med hjälp av tunnslip, röntgendiffraktion eller genom makroskopisk bedömning.

Den normativa sammansättningen förutsätter en fullständig kemisk analys. Utgående från denna beräknas den normativa mineralsammansättningen (CIPW-norm).

TABELL 1.

BERGARTSBENÄMNING	HALTEN OLIVIN I FÖRHÅLLANDE TILL ÖVRIGA MINERAL I BERGARTEN
DUNIT	>90 % av silikatmineralen utgörs av olivin
OLIVINIT	50-90 % av silikatmineralen utgöres av olivin
PERIDOTIT	10-50 % av silikatmineralen utgöres av olivin
SERP. PERIDOTIT	Peridotit med >75 % serpentinmineral
CORTLANDIT	Hornbländeförande peridotit
HARZBURGIT	Peridotit med ortopyroxen och hög andel opakmineral
SERPENTINIT	domineras av serpentinmineral (>90 %)

Klassificeringssystemet leder alltså till två bergartsbeteckningar, vilka kan skilja sig åt. De flesta ultramafiter är till viss del serpentiniserade. Delvis serpentinisation är refererad till adjektiv kvalifikation, t ex serpentiniserad peridotit. Skillnader mellan olika serpentiniter (>90 % serpentinmineral) kan endast be-

dömas genom fullständig bergartsanalys och beräkning av en CIPW-norm. Detta ger den normativa (ursprungliga) sammansättningen, som kan användas för att definiera serpentiniterna (t ex dunitisk serpentinit).

III FJÄLLKEDJANS UPPBYGGNAD SAMT ULTRAMAFITER INOM DEN SVENSKA DELEN AV KALEDONIDERNA

Den svenska fjällkedjan (Fig. 1) domineras strukturellt av skollor, överskjutna från väster mot öster över det Baltoskandiska underlaget. Överskjutningarna demonstrerades först av Törnebohm (1888, 1896) och han baserade sina bevis på att den högmetamorfa Seveberggrunden tektoniskt överlagrar lågmetamorfa under paleozoiska metasediment och underliggande prekambriska bergarter, tillhörande den Baltoskandiska skölden.

I följande korta beskrivning av fjällkedjans uppbyggnad (Kulling i Strand & Kulling, 1972) redovisas 1) Autoktonen/Parautoktonen, 2) Lägre skollberggrunden, 3) Mellersta skollberggrunden, 4) Övre skollberggrunden och 5) Översta skollberggrunden. Behandlingen av Övre skollberggrunden är mer detaljerad, därför att de intressanta ultramafiterna är koncentrerade till denna tektoniska enhet.

III.1 Det autoktona underlaget och överliggande autoktona sedimentbergarter

Det autoktona underlaget i fjällranden består huvudsakligen av Svekofenniska bergarter ca 1700-1800 miljoner år. De autoktona sedimenten i fjällranden utgörs mestadels av skiffrar och sandstenar av prekambrisk till kambrisk ålder. De autoktona sedimenten når lokalt upp i övre ordovicium. Inga ultramafiter har påträffats i de autoktona/parautoktona sedimentbergarterna i fjällranden. I det prekambriska underlaget öster om fjällkedjan uppträder täljstensbergarter, t ex nära Lauttakoski ca 7 km SV Junosando i närheten av Pajala, Norrbotten (Shaik, 1972).

SCANDINAVIAN CALEDONIDES

ULTRAMAFIC ROCKS

Compiled by H. Qvale and J. Stigh (1981)

IUGS UNESCO

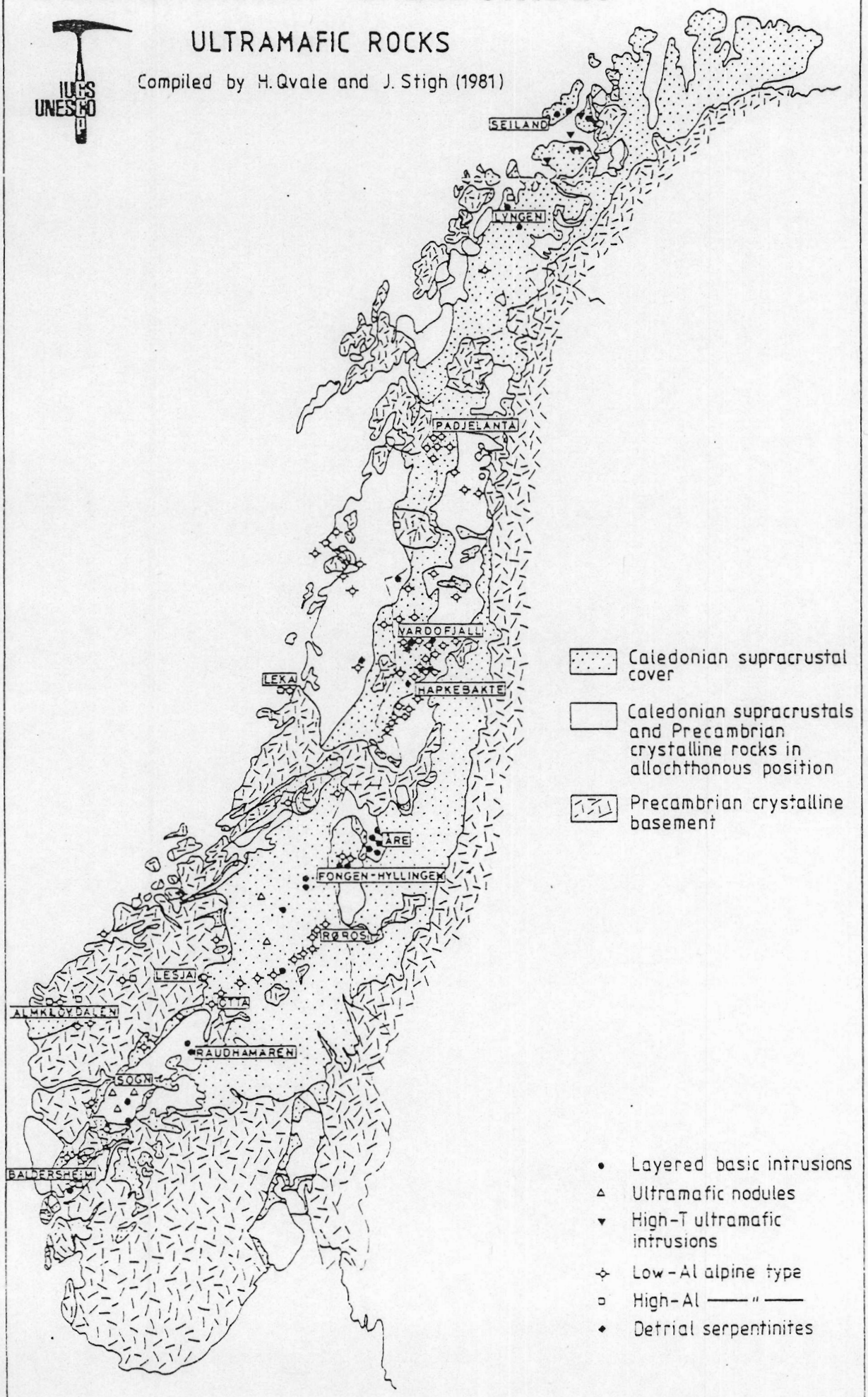


Fig. 1

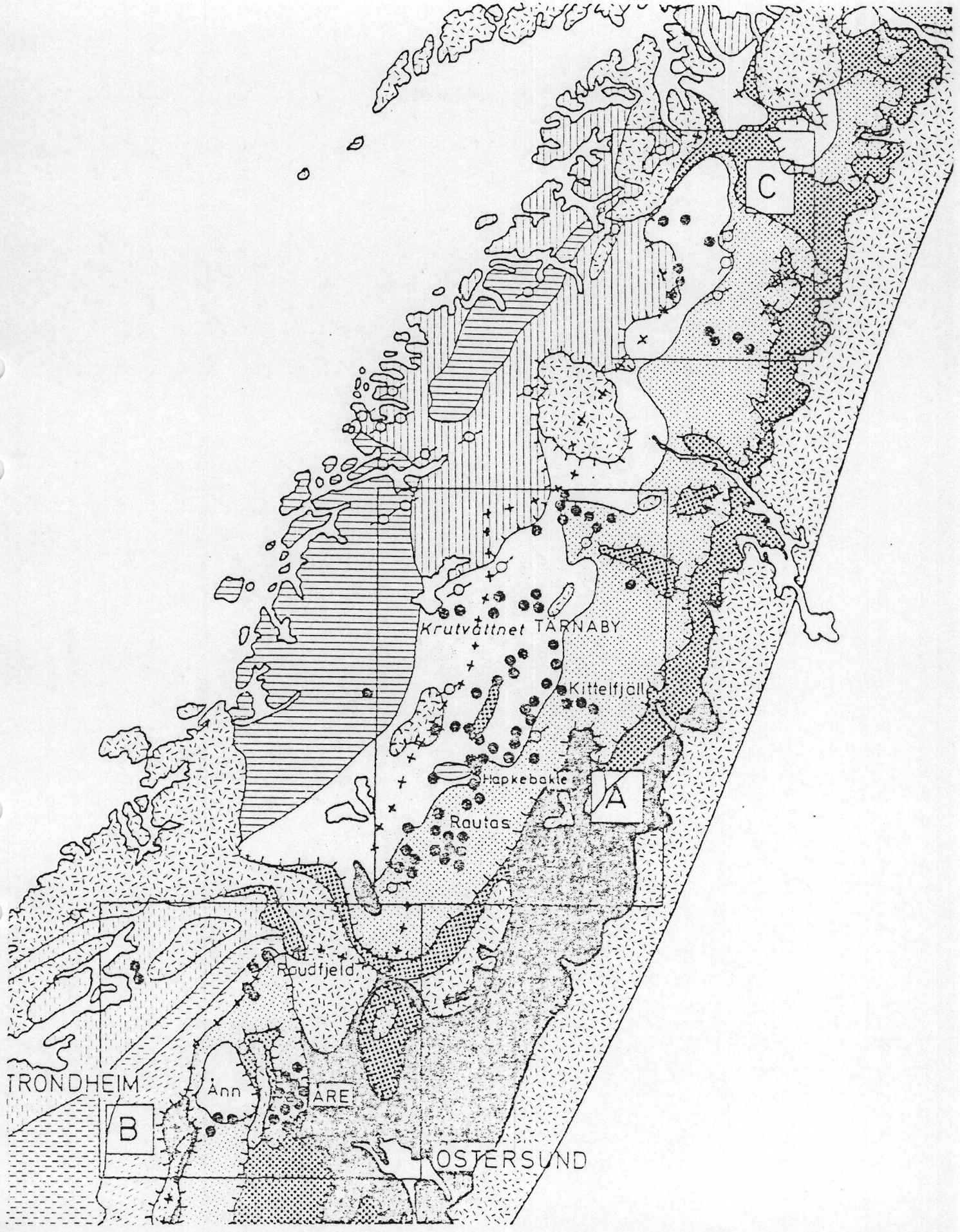

C
Krutvättnet
TÄRNABY
Kittelfjäll
Hapkebakte
A
Rautas
Roudfjeld
TRONDHEIM
Ånn
ÅRE
B
ÖSTERSUND

Fig. 2.

Legend till Fig. 2.

NORWAY

Devonian rocks

Helgeland Nappe Complex ⊗

Rödingsfjäll Nappe Complex ⊗

Trond-heim Nappe ⊗ / Super group
- W. Trøndelag
- Gula Group
- E. Trøndelag

Undifferentiated cover

Jotun Nappe

Middle thrust rocks incl. Kvitvola and Valdres Nappes

Autochthonous and parautoch-thonous meta-sediments.

Autochthonous- and parautoch-thonous ⊗

SWEDEN

Rödingsfjäll Nappe Complex ⊗

Köli
Seve
} Seve-Köli Nappe-Complex ⊗

Middle thrust rocks
Offerdal, Särv and Akkajaure Complex

Autochthonous and parautochthonous meta-sediments

Autochthonous and parautochthonous

⊗ Tectonic units containing ultramafites

⊗ Analysed ultramafites (shape and size of the bodies not shown).

Non-analysed ultramafites

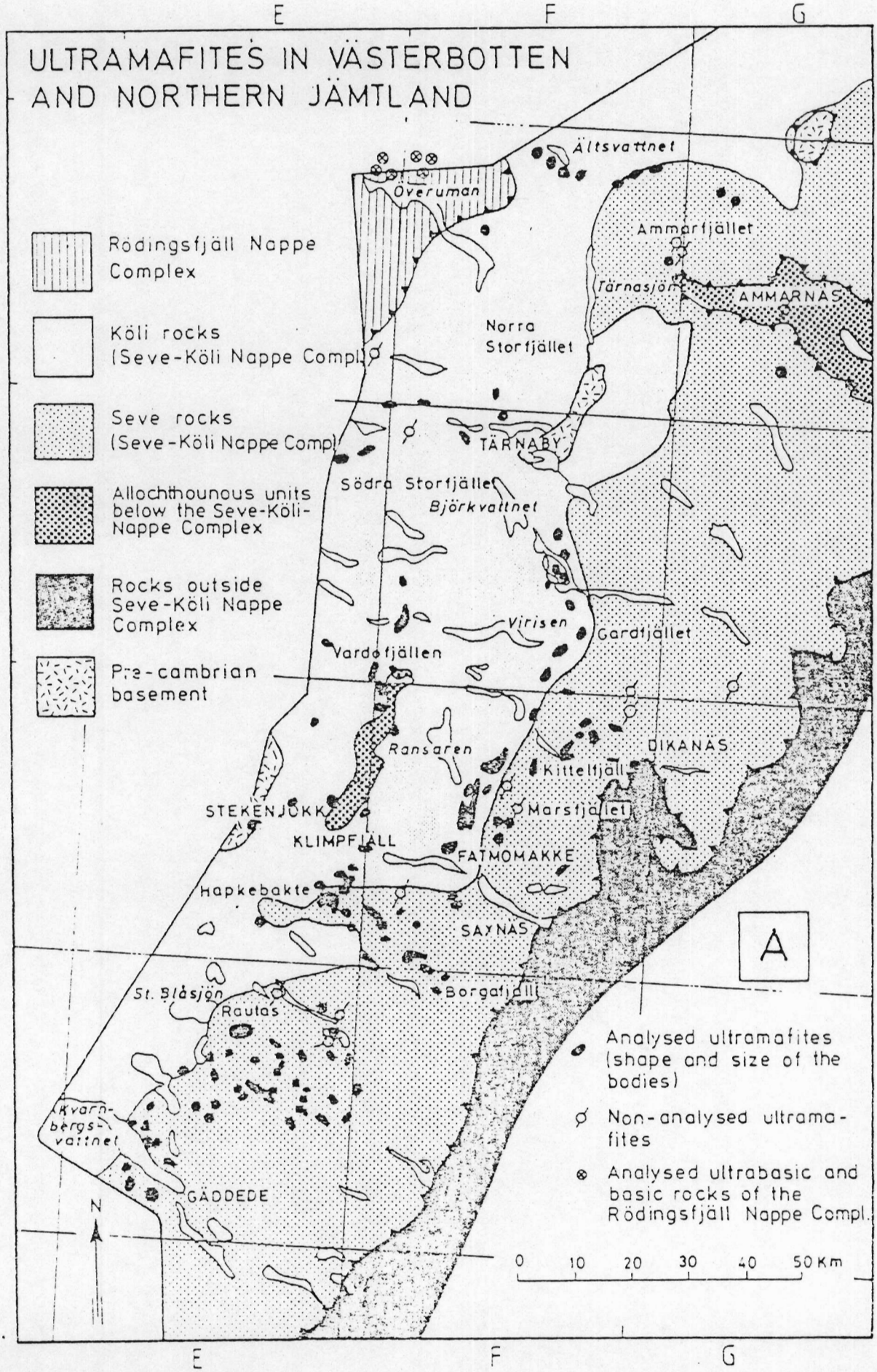

ULTRAMAFITES IN VÄSTERBOTTEN AND NORTHERN JÄMTLAND
E
F
G
Rödingsfjäll Nappe Complex
Köli rocks (Seve-Köli Nappe Compl.)
Seve rocks (Seve-Köli Nappe Compl.)
Allochthonous units below the Seve-Köli-Nappe Complex
Rocks outside Seve-Köli Nappe Complex
Pre-cambrian basement
Äitsvattnet
Överuman
Ammarfjället
Tärnasjön
AMMARNÄS
Norra Storfjället
TÄRNABY
Södra Storfjället
Björkvattnet
Virisen
Gardfjället
Vardofjällen
Ransaren
DIKANÄS
Kittelfjäll
Marsfjället
STEKENJOKK
KLIMPFJÄLL
FATMOMAKKE
Hapkebakte
SAXNÄS
A
St. Blåsjön
Borgafjäll
Rautas
Kvarnbergsvattnet
GÄDDEDE
N
Analysed ultramafites (shape and size of the bodies)
Non-analysed ultramafites
Analysed ultrabasic and basic rocks of the Rödingsfjäll Nappe Compl.
0 10 20 30 40 50 Km
25
24
23
22

Fig. 3A.

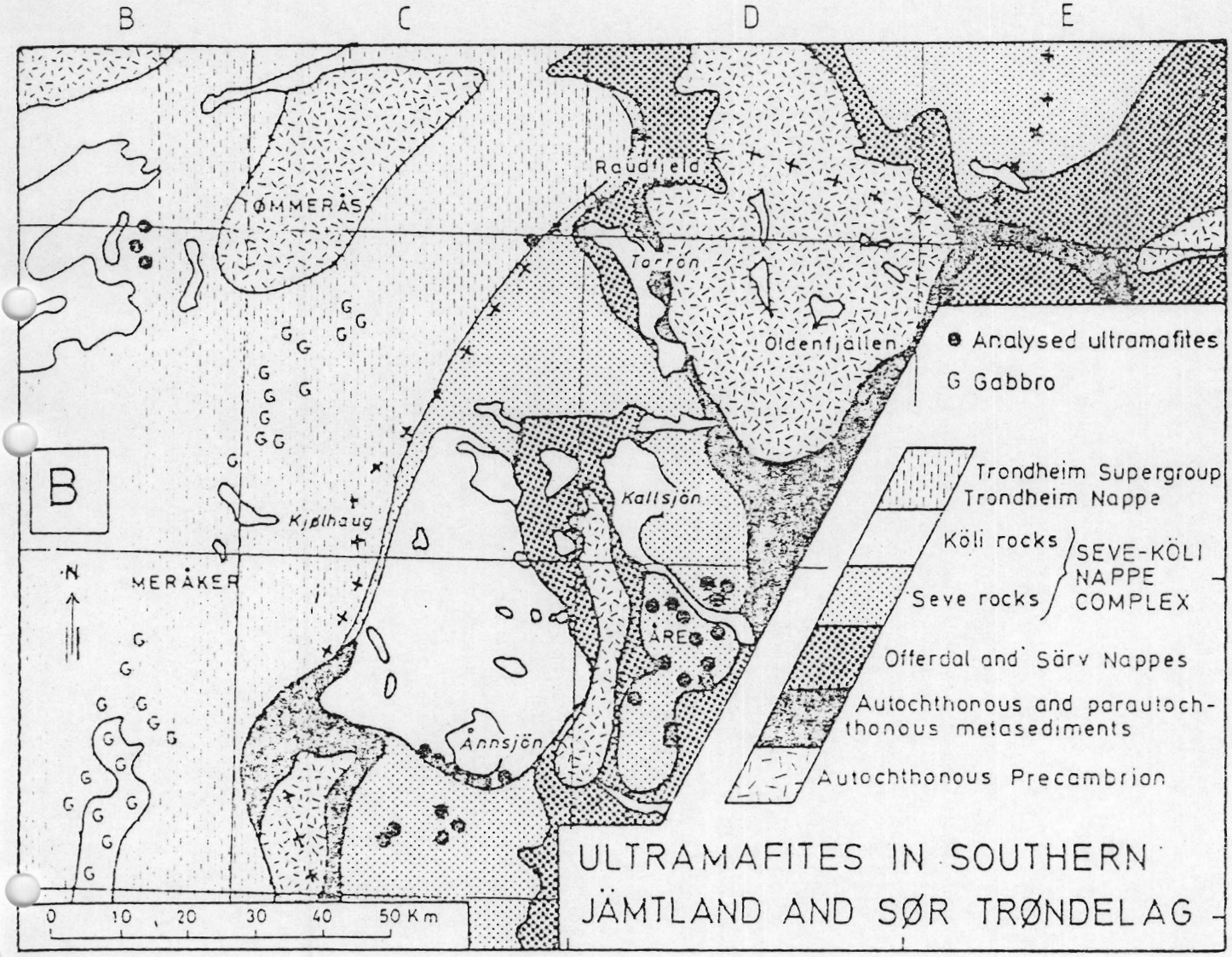

B
C
D
E
21
20
19
RØMMERÅS
Raudfjeld
Torrön
Oldenfjällen
Kallsjön
Kjølhaug
MERÅKER
ÅRE
Ånnsjön
B
N
0 10 20 30 40 50 Km
Analysed ultramafites
G Gabbro
Trondheim Supergroup
Trondheim Nappe
Köli rocks
Seve rocks
SEVE-KÖLI NAPPE COMPLEX
Offerdal and Särv Nappes
Autochthonous and parautochthonous metasediments
Autochthonous Precambrian
ULTRAMAFITES IN SOUTHERN JÄMTLAND AND SØR TRØNDELAG

Fig. 3B.

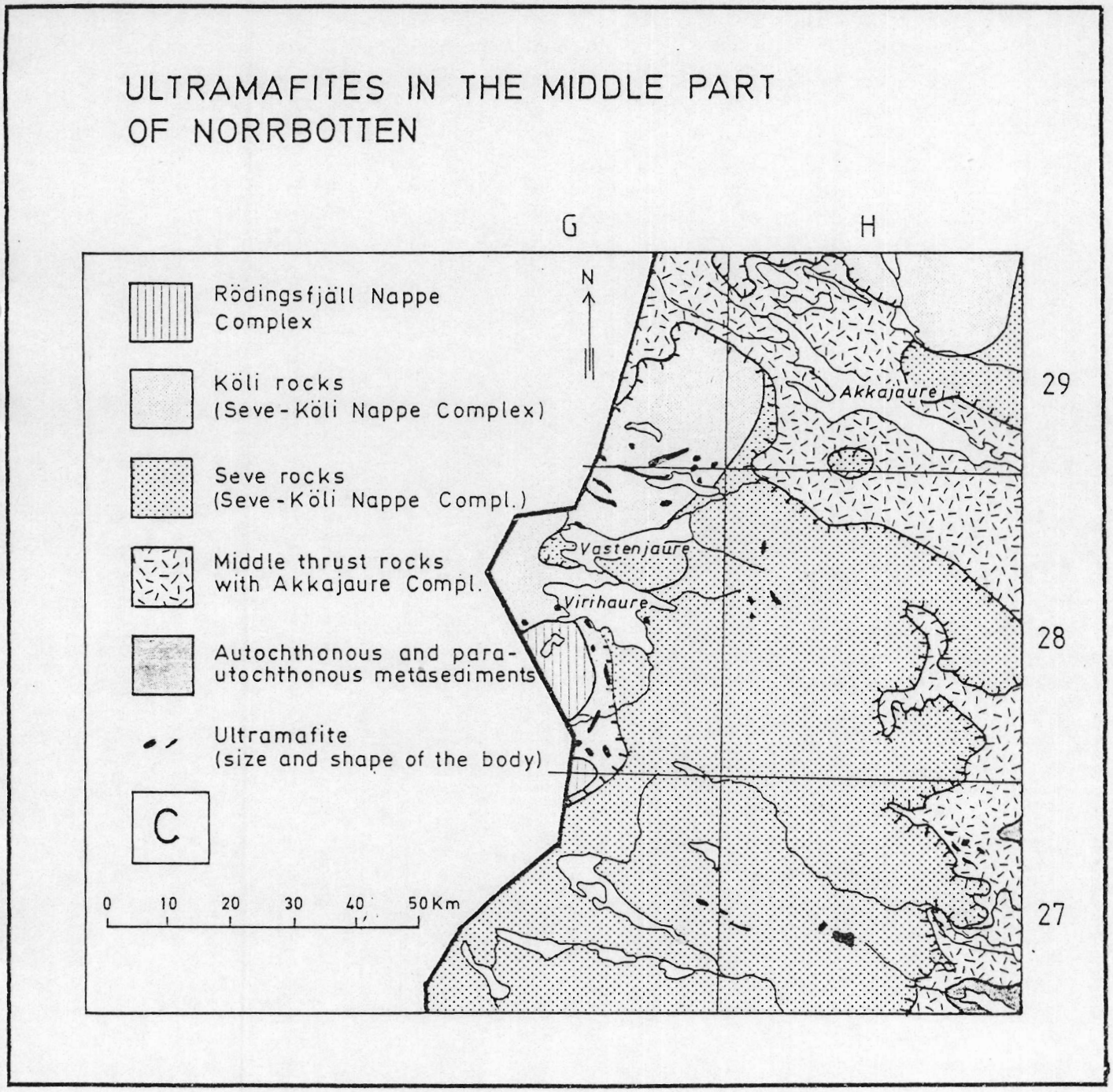

ULTRAMAFITES IN THE MIDDLE PART OF NORRBOTTEN
G
H
N
Rödingsfjäll Nappe Complex
Köli rocks (Seve-Köli Nappe Complex)
Seve rocks (Seve-Köli Nappe Compl.)
Middle thrust rocks with Akkajaure Compl.
Autochthonous and para-utochthonous metasediments
Ultramafite (size and shape of the body)
C
0 10 20 30 40 50 Km
Akkajaure
Vastenjaure
Virihaure
29
28
27

Fig. 3C.

De autoktona, prekambriska bergarter, som uppträder som fönster i fjällkedjan, saknar i allmänhet ultramafiter. Ett antal mindra massiv av ultramafisk karaktär har dock påträffats i Börgefjällsfönstret, väster om Stekenjokk. De har observerats av Foslie och Strand (1956) och karterats av F. Kautsky (pers. comm.).

III.2 Lägre skollberggrunden

Den lägre skollberggrunden i Sverige består mestadels av tunna enheter av prekambriska till siluriska sedimentbergarter (kvartsiter, svarta skiffrar och gråvackor). Ultramafiter saknas helt i denna tektoniska enhet.

III.3 Mellersta skollberggrunden

Mellersta skollberggrunden domineras av fältspatförande sandstenar och mylonitiserade prekambriska graniter, syeniter och ögongnejser. Dessa alloktona bergarter inkluderas i Offerdal och associerade skollor samt i den överliggande Särvskollan. Särvskollan (Strömberg, 1955 och 1961) består av metasandstenar, intruderade av olivinförande diabaser (Strömberg, 1969).

Den enda förekomst av ultramafiter, som tros tillhöra den mellersta skollberggrunden är belägen i Ammarnäskomplexet. Förekomsten finns utmärkt på Kullings länskarta (Gavelin & Kulling, 1955) och ett antal ultramafiska kroppar (bl a vid Karsbäcken) har karterats av F. Back (pers. comm.).

III.4 Övre skollberggrunden

Den Övre skollberggrunden är uppdelad i Seve-Köli skollkomplexet, Virihaureskollan samt Storfjällsskollan (Kulling i Strand & Kulling, 1972). Seve-Köli komplexet (Kulling, 1960; Zachrisson, 1969; Zwart, 1974) kan följas längs fjällkedjan i minst 900 km. Fortsättningen söderut och norrut in i Norge är kontroversiell.

Generellt kan Seve-Köli indelas i en lägre Seve-enhet med högre metamorfosgrad och en överliggande, lägre metamorf Köli-enhet (Fig. 2). Seven har delats upp (Fig. 4) i ett östligt, ett centralt och ett västligt bälte, som skiljs genom överskjutningar (Trouw, 1973; Zwart, 1974). Seven är generellt metamorfoserad i amfibolitfacies. En högre granulitenhet är lokalt närvarande, framför allt i det centrala bältet.

Kölibergarterna, som överlagrar Seven, indelas i Tjopasigruppen (i basen), Lasterfjällgruppen och Remdalengruppen (Zachrisson, 1969). Tjopasigruppen består av varierande fylliter, felsiska och mafiska vulkaniter i grönskifferfacies och dessa bergarter är åtminstone delvis av Ordovicisk ålder. Lasterfjällgruppen består av ett basalt kvartsitkonglomerat, kvartsiter och kalkstenar av överordovicisk ålder, överlagrade av svarta skiffrar, avsatta i början av Silur. De dominerande bergarterna i denna grupp är kalkfylliter. Den överliggande Remdalengruppen i sin tur domineras av varierande fylliter och mafiska vulkaniter.

Den strukturella uppbyggnaden av Seve-Köli skollkomplexet domineras av överskjutningar, veckade av sena, stora antiformer och synformer. Deformationssekvensen i relation till metamorfa händelser har beskrivits från olika områden (Zachrisson, 1969; Trouw, 1973; Zwart, 1974; Stephens, 1977. En beskrivning av deformationen och meta-

morfosen i Seve-Köli från Björkvattnet-Ransaren, Västerbotten, redovisas i ett arbete av Stigh (1980).

Deformationen i Seve-Köli har varit intensiv med flera veckfaser och relaterade förskiffringar. För detta syfte är främst den sista deformationen av vikt. Denna resulterade i utvecklingen av stora öppna veckstrukturer orienterade i NNÖ-SSV.

Metamorfosen i Köli skedde under grönskifferfacies till lägre amfibolitfacies.

Ultramafiterna uppträder på skilda nivåer inom detta skollkomplex (Fig. 4), men de är rikligast förekommande i den övre delen av Seve och i den lägre delen (Tjopasigruppen) av Köli.

I det Östra bältet, i Sevens lägre del, uppträder åtskilliga ultramafiska kroppar i staurolit-kyanit-granat-förande bergarter. I det centrala bältet, som domineras av gnejser och amfiboliter, förekommer (förutom i norra Jämtland) relativt få ultramafiter. Dessa skiljer sig från övriga ultramafiter i fjällen genom att de i flera fall är granatförande. I det västra bältet, som består av likartade bergarter som inom det östra bältet, är ultramafiterna inom Seven rikligast förekommande. Inga detritiska serpentiniter har ännu påträffats i Seve-berggrunden.

I Ruoutevare-området i Norrbotten, norr om Kvikkjokk, domineras de ultrabasiska bergarterna av peridotiter och pyroxeniter, vilka är associerade med anortosit och gabbro. Bergartskomplexet har stora likheter med berggrunden i Lofotenområdet och är med största sannolikhet prekambriskt.

Metamorphic zones of the Västerbotten Caledonides (after Zwart, 1974) and the frequency of ultramafic bodies.

TECTONIC UNITS		ROCK TYPES	METAMORPHIC ZONES	ULTRAMAFIC BODIES
KÖLI		keratophyre, greenschist, calcareous phyllite, limestone, conglomerate, quartz-keratophyre, greenschist, and black phyllites	CHLORITE BIOTITE	
SEVE	WESTERN BELT	garnet-micaschist, quartzitic garnet--micaschist with amphibolites	GARNET STAUROLITE-KYANITE	
	CENTRAL BELT	migmatitic kyanite-feldspar gneiss, quartzo-feldspathic gneiss, amphibolite	KYANITE-POTASSIUM FELDSPAR	
	EASTERN BELT	meta-arkose and quartzite garnet micaschist, marble amphibolite, and garnet-micaschist	STAUROLITE-KYANITE GARNET	
SARV		meta-arkose, quartzite, muscovite-schist	BIOTITE	
GRANITE-MYLONITE		augen-gneiss-mylonite	CHLORITE	
LOWER NAPPES		quartzite, arkose, greywacke, shale	CHLORITE	
PARAUTOCHTHONOUS AUTOCHTHONOUS		sandstone, shale, crystalline basement	UNMETAMORPHOSED	

Fig. 4.

Det tillhör däremot tektoniskt Sevens nedre del, vilket understrykes av att det underlagras av ett paket med granatförande Seve-glimmerskiffrar.

De ultrabasiska bergarterna i Köli uppträder (Fig. 4) talrikast i Tjopasi-gruppen och mera sporadiskt i de överlagrande Lasterfjället- och Remdalen-grupperna.

grupperna. Detritiska serpentiniter är associerade till de massiva ultramafiterna i Tjopasi-gruppen. Norrbottens Köli har uppdelats i ett antal skollor (Kautsky, 1953; Kulling i Strand & Kulling, 1972). Ultrabasiter uppträder framför allt i de mellersta (Vasten-Salo-) och översta (Gasak-, Stipok-) skollorna. De senare bör sannolikt korreleras med Storfjällsskollan i norra Västerbotten (t ex Ältsvattnet-området). Även i Norrbotten finns exempel på detritiska serpentiniter.

III.5 Den Översta skollberggrunden - Rödingsfjälls-skollan

I denna skollenhet, som består av amfiboliter, gnejser, glimmerskiffrar och kalkrika bergarter, förekommer inga solitära ultramafiter. Ultramafiter associerade med gabbro och amfiboliter uppträder däremot i mindre omfattning. Dessa ultramafiter representerar antingen ofiolitiska, ultramafiska fragment eller delar av en lagrad intrusion. Ett större gabbromassiv (Umbukta-gabbron) har undersökts (Flodberg & Stigh, 1981). Detta gabbrodominerande massiv ligger på gränsen mellan Norge och Sverige, norr om Blå vägen i Västerbotten.

III.6 Historik och viktigare arbeten om ultramafiterna i svenska fjällen

Peridotitiska bergarter från den svenska delen av Kaledoniderna är först omnämnda i litteraturen av Törnebohm, år 1877, som observerade ultramafiten i Kittelfjäll i Västerbotten. Några år senare beskriver Svenonius (1883) olivinrika bergarter och serpentiniter från lokaler i Jämtland, Västerbotten och Norrbotten. Baserat på material

från dessa lokaler, insamlat av Svenonius, studerade Eichstädt (1884) dessa ultramafiters petrografi. Ungefär femtio år senare beskrev Du Rietz (1935) ultramafiter från Jämtland och Västerbotten. Kulling (1933) påvisade närvaron av serpentinitkonglomerat inom Björkvattnet-Virisenområdet i Västerbottenfjällens centrala del.

Detaljerade petrografiska beskrivningar av ett stort antal ultramafiska kroppar har gjorts av Michel (1950), de Keyzer (1952), Janssen (1953) och Calon (1973). Från Sulitelma-Salojaure-området i Norrbotten är serpentiniter och serpentinitkonglomerat beskrivna av Kautsky (1953). Zachrisson (1969) och Truow (1973) diskuterade de ultramafiska massiven och deras rikliga uppträdande inom vissa stratigrafiska enheter i Jämtlands- och Västerbottenfjällen. Magmatisk lagring i serpentiniter från Seve och Köli påvisades av Stigh & Ronge (1978). Stigh (1979) gav en mycket utförlig beskrivning av de skandinaviska ultramafiterna, inkluderande 559 fullständiga bergartsanalyser. En redogörelse för de detritiska serpentiniterna lämnades året efter (Stigh, 1980). Calon (1979) har publicerat en ingående studie av Kittelfjällperidotiten.

IV ULTRAMAFITERNAS UPPTRÄDANDE I FÄLT

Massiva, solitära ultramafiter med låg Al-halt uppträder i fält som rödaktiga, linsformade massiv. De uppträder i regel som ryggar i topografin, vilkas höjd över de omkringliggande, i allmänhet sedimentära bergarterna, varierar från några få till uppemot hundra meter. Den röda färgen beror på vittring, som äger rum i den yttre delen av bergartskroppen. Den av vittring opåverkade bergarten är däremot grågrön eller blågrön till färgen. Ultramafiterna har genomgått komplicerade omvandlingar samt påverkats av fjällkedjans deformation med åtföljande förskiffring och brecciering i massivens ytterkanter som följd.

De linsformade ultramafitkropparna är ofta orienterade med sin längdriktning i NNÖ-SSV. Storleken (arean) varierar från några få m^2 till omkring 10 km^2. Mäktigheten (mätt vinkelrätt på den allmänna foliationen) torde för de större massiven uppgå till storleksordningen 1 000 - 2 000 meter men är i allmänhet betydligt mindre.

Ultramafiterna varierar i omvandlingsgrad från olivinrika, pyroxenförande bergarter till helt serpentinomvandlade typer. Den ursprungliga (primära, normativa) mineralsammansättningen är beräknad utifrån totalkemisk analys på bergarten.

Detta normativa, troligen primärmagmatiska mineralsällskap har sedan utsatts för en genomgripande serpentinisering. Genom tillförsel, främst av vatten, har olivin och pyroxen omvandlats till serpentinmineralet antigorit. Bevisen för denna kraftiga och ibland fullständiga omvandling är starkast i Köli. I Seven däremot har de en gång serpentinrika bergarterna, jämförbara med de nu i Köli förekommande serpentiniterna, utsatts för sekundära,

mera högtemperaturbetonade, regionalmetamorfa omvandlingar, varvid de serpentinrika bergarterna ånyo dehydrerats till olivinförande eller olivinrika ultramafiter (modal sammansättning).

I vissa ultramafiter, speciellt i Sevens västra bälte, är mineralen orienterade i deformationens minsta tryckriktning. Detta ger upphov till förskiffring som är kraftigast i massivens ytterområden. Orienteringen av främst serpentinmineral präglar denna förskiffring, som i allmänhet är parallell med de omgivande sedimentära bergarternas foliation. Helt massformiga (icke förskiffrade) ultramafiter förekommer.

Ultramafiterna är i många fall kraftigt söndersprucknа och hopläkta framför allt i massivens ytterområde. Breccieringen, som lättast kan studeras på vittrade hällytor, förekommer i både Seve- och Köli-ultramafiterna. Serpentinmineralet krysotil uppträder ibland mellan de brecciерade fragmenten. Brecciering saknas i vissa ultramafiter och kan vara mer eller mindre utvecklad i andra. Normalt är dock brecciering synlig i fält i de flesta ultramafitmassiv, oftast i massivens ytterområden.

En intressant lagring har kunnat spåras i vissa ultramafitmassiv (Stigh & Ronge, 1978). Denna lagring härrör från gravitativ differentation under kristallisation av magma i ett primärt skede, varigenom en växellagring mellan olivin och pyroxenrika lager utbildades. Genom senare serpentinisering har lagringen suddats ut, men genom provtagning, kemisk analys och beräkning av den normativa sammansättningen kan den fortfarande spåras.

V MINERALOGI - PETROLOGI

De solitära ultramafiternas normativa sammansättning varierar mellan duniter och peridotiter. Vanligaste normativa sammansättning enligt Jacksons klassifikation (1970) är olivinit (50-90 % olivin). Olivin är alltså det dominerande normativa mineralet i de flesta av de provtagna bergarterna (Fig. 5B). Pyroxener förekommer mestadels som ortopyroxen (enstatit) samt som klinopyroxen (diopsid). Den normativa mineralsammansättningen av en representativ solitär ultramafit (olivinit) ser ut som följer:

52 % olivin (93 % forsterit och 7 % fayalit)
38 % ortopyroxen (mestadels enstatit)
2.5 % klinopyroxen (diopsid)
3.5 % spinellfas (kromit)
0.5 % ilmenit
3.5 % plagioklas

Med den ovan angivna mineralsammansättningen klassificeras ultramafiterna som harzburgiter enligt Streckeisen (1974). Harzburgit betecknas som en peridotitisk bergart med dominant ortopyroxen och mindre än 5 % klinopyroxen. Halten av opaka mineral (spinell) är markant. Plagioklashalten är mycket liten och plagioklasen har en hög An-halt. Modalt har plagioklas aldrig påträffats.

Modalt varierar de solitära ultramafiterna mellan duniter och serpentiniter. Jacksons klassificering (1970) är den mest adekvata på grund av den metamorfa omvandlingen. Streckeisens (1974) klassifikation passar inte omvandlade magmatiska bergarter, då den framför allt bygger på de primära pyroxenernas mineralogi (ortopyroxener och klinopyroxener) och deras volymetriska halter. Pyroxenerna är modalt relativt ovanliga i de

undersökta ultramafiterna. Olivin jämte serpentinmineralet antigorit är helt dominanta. Den modala fördelningen framgår av Fig. 5A och i Fig. 5C kan ultramafiternas modala och normativa sammansättning jämföras.

Antalet dunitiska bergarter har reducerats i samband med omvandlingen, men framför allt har en förskjutning i antalet normativa oliviniter till modala peridotiter och serpentiniter (Fig. 5C) ägt rum, beroende på hydrering.

Ultramafiter, belägna i lågmetamorfatektoniska enheter, t ex Köli, är klart mer serpentinomvandlade än ultramafiter, belägna i mera högmetamorfa skollor. Serpentiniseringen innebär hydrering av ultramafitmaterialet och för detta krävs ingen högre metamorfosgrad. I de högmetamorft belägna ultramafiterna (Seve) har däremot regionalmetamorfosen lett till en dehydrering av tidigare serpentinrika bergarter med nybildning av olivin och överförande av dessa till metamorft nybildade olivinrika ultramafiter. Duniterna tolkas således som omvandlade från primärt magmatiska duniter via serpentiniter tillbaka till metamorft bildade duniter.

Kontaktmetamorfos har aldrig iakttagits i den omgivande berggrunden, vilket utesluter en intrusiv magmatisk process som förklaring till ultramafiternas nuvarande belägenhet i den sedimentära berggrunden.

Många ultramafiter, framför allt de lågmetamorft belägna, är helt eller delvis hydrerade (serpentiniserade). De vanligaste omvandlingsprodukterna vid serpentinisering är enligt Moody (1976) lizardite, krysotil, magnetit $\pm$ brucit $\pm$ antigorit. Lizardit- och krysotilserpentinerna är enligt henne normalt vanligare än antigorit. Närvaro av antigorit indikerar att serpentiniten har genomgått prograd metamorfos eller att ultramafiten har serpentiniserats i en högre P, T-regim än då lizardit och krysotil dominerar. Ultramafiterna i den svenska fjällkedjan

Fig. 5A.

Modal sammansättning av 347 jämförbara ultramafiter från fjällen

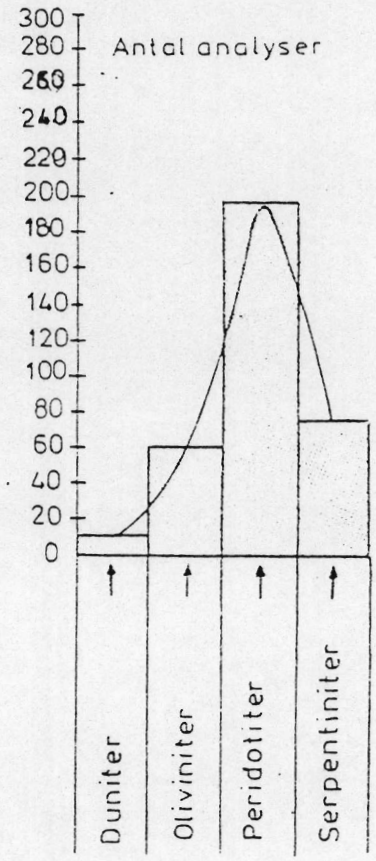


Fig. 5B.

Normativ sammansättning av 347 jämförbara ultramafiter från fjällen.

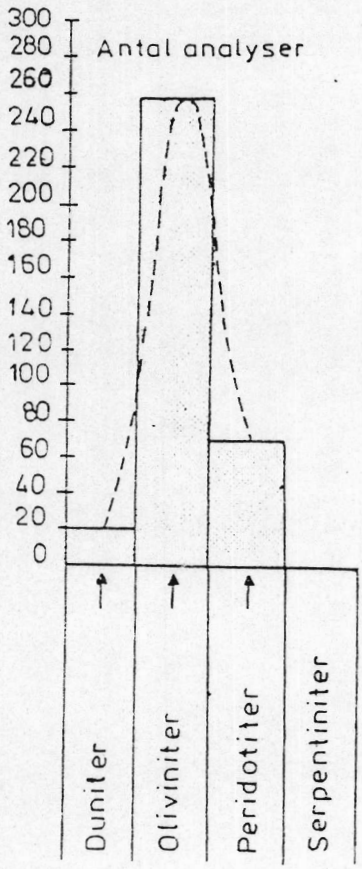
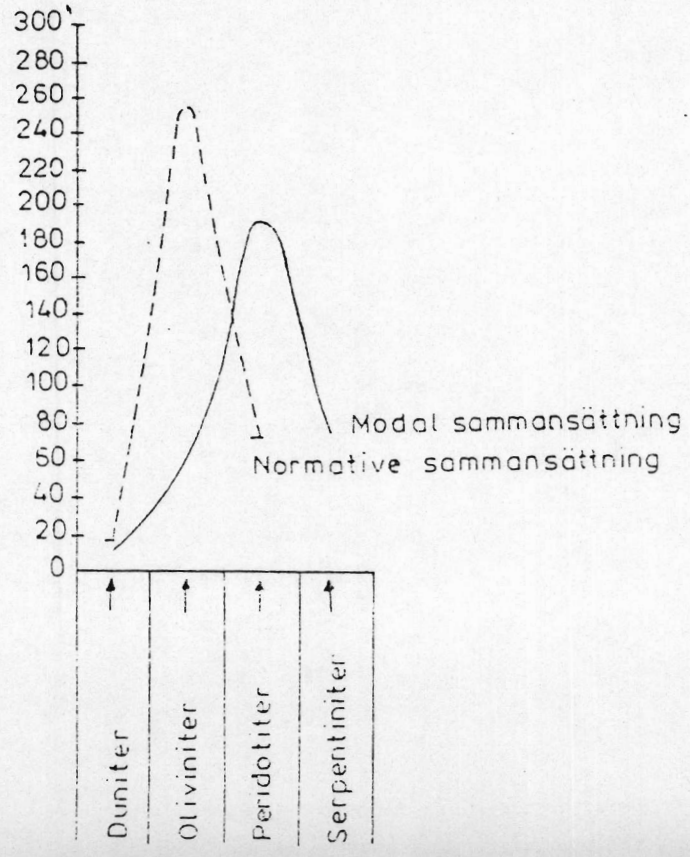


Fig. 5C.

Modal och normativ sammansättning av 347 jämförbara ultramafiska prover.



uppvisar antigorit som det helt dominerande mineralet.

Serpentinisering kan äga rum med konstant kemisk sammansättning (Coleman & Keith, 1971) under volymökning (Hostetler et al. 1966), eller under konstant volym med ändringar i den kemiska sammansättningen (Condie & Madison, 1969). Detta kan ha betydelse för serpentiniseringsprocessen beroende på om den äger rum i övre manteln under allsidigt, högt tryck eller högre upp i krustan.

I ett flertal ultramafitmassiv har en markant talkomvandling iakttagits. Denna talk är ofta associerad med sekundär magnesit. Både talken och magnesiten förekommer i allmänhet i massivens ytterkanter. Vissa massiv är dessutom kraftigt uppspruckna och talk/magnesit är då knutna till sprick- och rörelsezoner. Talk-magnesitzonerna har troligen bildats från antigorit genom reaktionen med CO_2-rika, hydrotermala lösningar. Du Rietz (1935) förklarar täljstensförekomsterna (talk/karbonat) i Frostviken, norra Jämtland, genom reaktioner mellan ultramafiterna och omgivande berggrund (amfiboliter) på grund av hydrotermala lösningar. Amfiboliten kloritiseras i kontakten och av olivinen i ultramafiten bildas aktinolit-tremolit-seriens amfiboler. Olivin och pyroxen omvandlas också till klorit och antigorit genom tillförsel av H_2O.

Ultramafiternas mineralogi och texturella förhållanden har undersökts i ca 230 tunnslip, mestadels från solitära ultramafiter. Av dessa undersöktes 38 st på mikrosond, valda att representera olika lokaler från hela undersökningsområdet, i syfte att illustrera ultramafiternas mineralkemiska variationer. Varierande olivin- och pyroxengenerationer analyserades jämte mineralen antigorit pentlandit, heazlewoodit samt zonerade spineller.

Mineralet olivin är jämte antigorit det klart dominerande mineralet i de undersökta ultramafiterna. Det texturella utseendet varierar mellan duniternas i stort granulära texturer till de serpentiniserade peridotiternas folierade och sönderbrutna olivintexturer. Tre typer av olivintextur förekommer i ultramafiterna. Den första (äldsta) olivintexturen (Fig. 6) uppträder som grovkorniga, deformerade, relikta olivinkorn (porfyroklaster), som kan vara upp till 5 cm långa och de är ofta utsträckta i förskiffringsriktningen (S2).

Den andra olivintexturen (Fig. 6) karakteriserar rekristalliserad olivin eller olivin nybildad från serpentin. Texturen är vanligast i ultramafiter, belägna i högre metamorf omgivning (Seve). Olivinen visar en klar orientering, som definierar förskiffringen (S2).

Den tredje olivintexturen (mortar-textur) tycks härröra från både ovannämnda typer (Fig. 7) och den visar ingen deformation.

Dessa tre olivintexturer representerar troligen en kristallisationssekvens från primär magmatisk fas till sen metamorf fas.

Olivinernas kemiska sammansättning beskrivs som en kontinuerlig blandningsserie mellan forsterit (Fo=Mg_2SiO_4) och fayalit (Fa=Fe_2SiO_4). Forsterithalten varierar i 48 analyserade oliviner mellan 88.8-97.3 % Fo (Stigh, 1979). Olivinporfyroklasterna har den högsta Fo-halten (94.3 %), följt av de foam-texturerade olivinerna (91.2 % Fo) och lägst Fo-halt har de mortartexturerade olivinerna med 90.5 %.

Ortopyroxenen enstatit är jämte olivin det klart dominerande normativa mineralet i ultramafiterna. Modalt

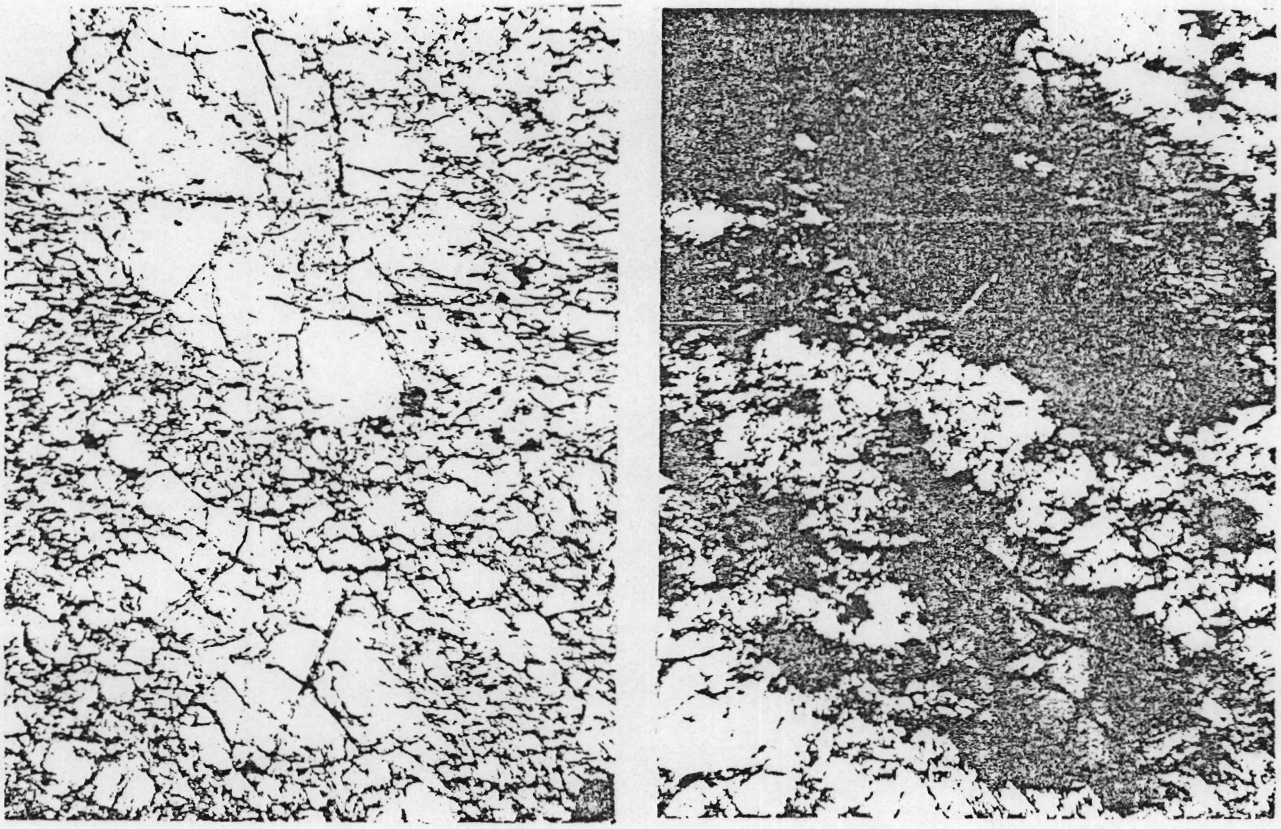


Fig. 6. Olivintexturer (Vinberget) Utan korsade nicoller

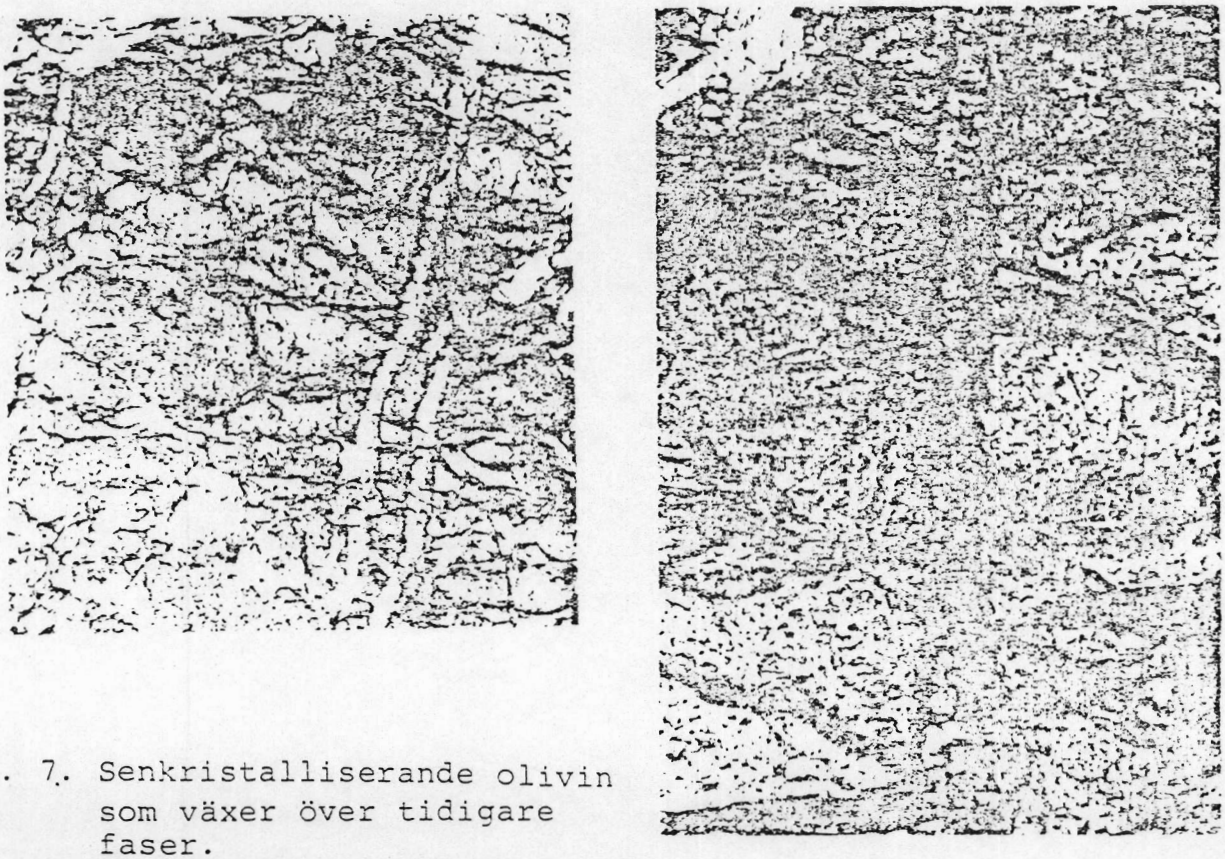
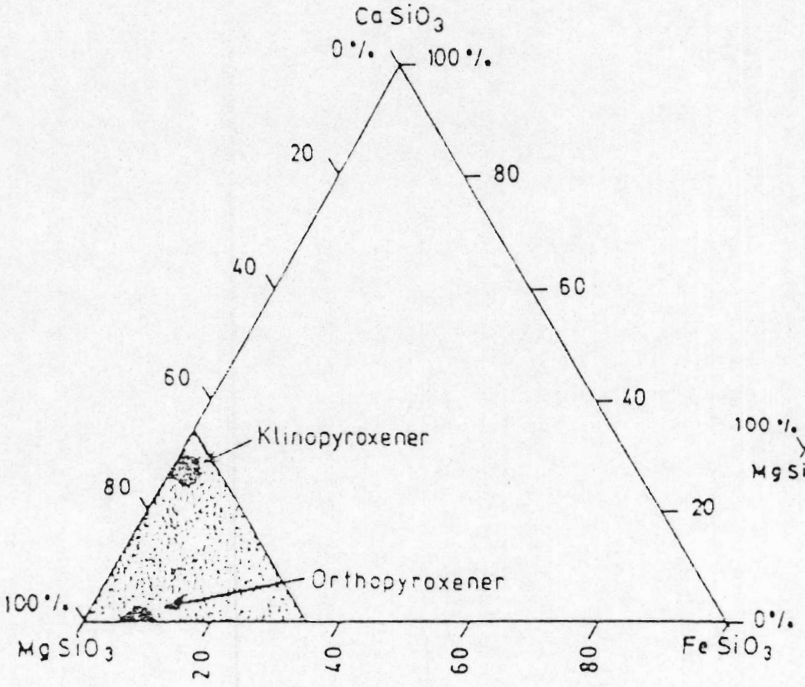


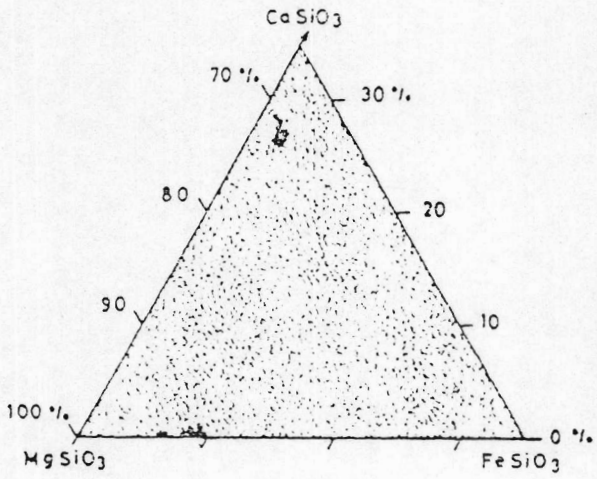
Fig. 7. Senkristalliserande olivin som växer över tidigare faser.
45x, korsade nicoller

Pyroxen sammansättning i ultramafiter från fjällen.

Orthopyroxener (10) från ultramafiter i Helgeland, Seve and Köli								Clinopyroxener (6) från ultramafiter i Helgeland, Seve and Köli							
FeO*	MgO	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Wo	En	Fs	FeO*	MgO	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Wo	En	Fs
5.87	35.93	0.16	0.49	57.55	0.28	91.34	8.38	1.60	24.39	12.96	0.35	57.23	26.90	70.50	2.60
Wo-En-Fs är 03-913-8.4								Wo-En-Fs är 26.9-70.5-2.6							

* $Fe_{(tot)}$ beräknat som FeO





förekommer både ortopyroxen (opx) och klinopyroxen (cpx). Klinopyroxen uppträder sparsamt till ganska rikligt (enstaka massiv) i ultramafiterna och är optiskt identifierade som diopsider, ofta med en koncentration av malmmineral i den centrala delen. Klinopyroxenernas kemi framgår av Fig. 8.

Antigorit är det helt dominerande serpentinmineralet i fjällberggrundens ultramafiter. Mest allmänt förekommer antigorit i serpentiniterna, och serpentiniternas textur domineras helt av antigoritens utveckling. Då olivin förekommer i serpentiniterna, uppträder olivinkornen helt omgivna av antigoritlister, som i sin tur åtminstone delvis ligger i amorf serpentin. Ibland uppträder antigoritlister inne i olivin och pyroxen, med en orientering som vanligtvis inte är relaterad till sprickor eller kristallytor i värdmineralet.

I en del serpentiniserade ultramafiter, där delvis antigoritiserad olivin förekommer i mindre mängd, är olivinen ofta koncentrerad till band, växellagrande med antigoritrika lager. Olivin- och antigoritbanden är ofta veckade och tremolitisk amfibol har utbildats i axialplanen.

Sammanfattningsvis kan sägas att ett flertal texturella typer av antigorit förekommer i serpentiniterna, varav de fyra mest framträdande typerna är:

(i) euhedrala antigoritlister

(ii) bastitisk antigorit som uppträder som stora pseudomorfer efter pyroxen

(iii) finkornig, icke folierad antigorit som ger en homogen massa, i vilken olivinrelikter kan förekomma

(iv) folierad finkornig ställvis muskelformad antigorit, där antigoriten uppträder som radiära, fibrösa aggregat.

Antigoriten varierar i sammansättning bl a beroende på halten av associerat magnesiumkarbonat (dolomit eller magnesit). I serpentiniter, som innehåller mer än 10 % magnesiumkarbonat, är antigoriten järnrikare i jämförelse med serpentiniter med lägre karbonatinnehåll. Det syns som om antigorit i närvaro av CO_2 bildar Mg-förande karbonat + Mg-fattig antigorit (med eller utan talk).

Karbonatmineralen i ultramafiterna varierar i sammansättning mellan kalcit ($CaCO_3$), dolomit ($(CaMg)CO_3$) och magnesit ($MgCO_3$). Magnesit och dolomit med ökat järninnehåll benämnes breunnerit respektive ankerit.

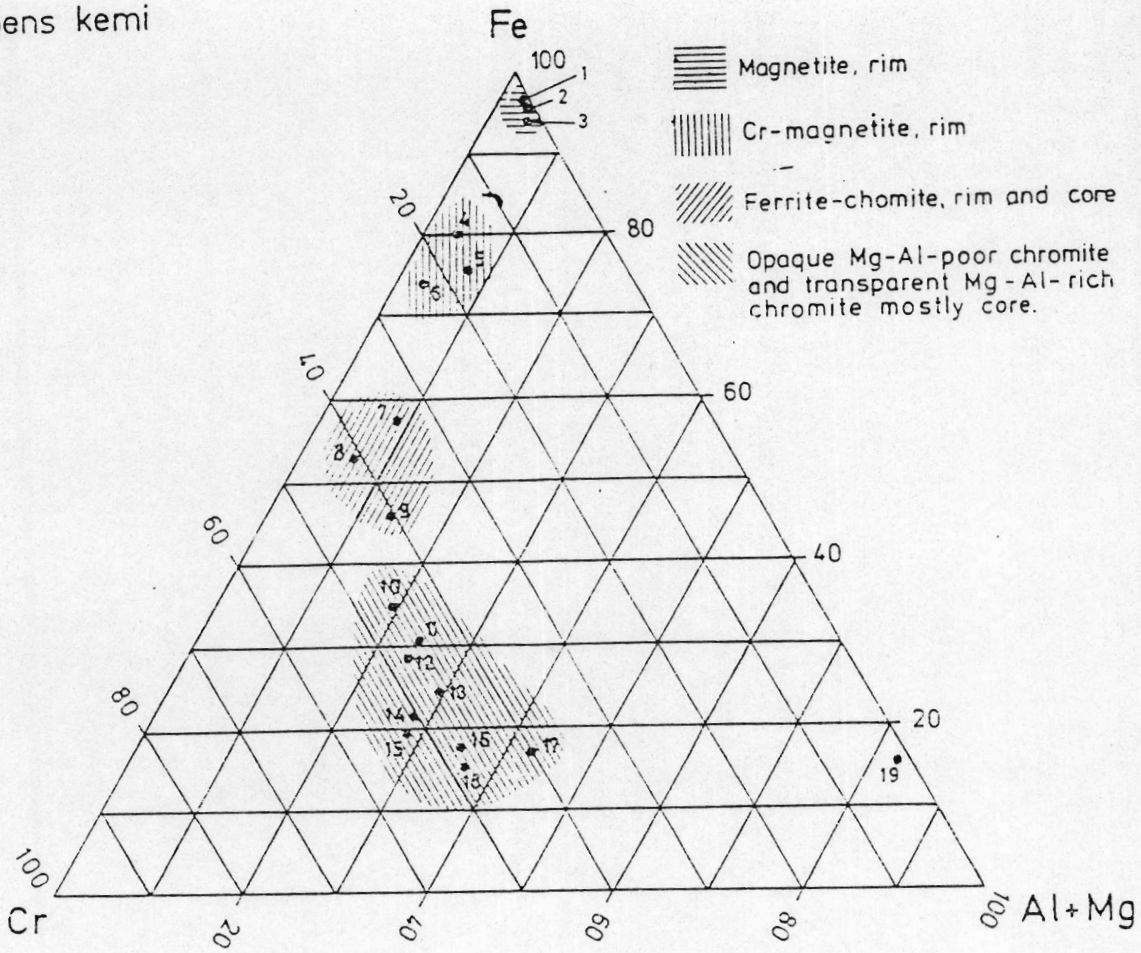
Karbonatmineralet magnesit är klart dominant och förekommer både som bergartsbildande mineral och som sprickmineral. Fe-halten är i regel låg.

Övriga mineral som förekommer i ultramafiterna är biotit (små mängder i vissa peridotiter), klorit (små mängder i de flesta ultramafiter), antofyllit (sällsynt), tremolitisk amfibol (accessoriskt i vissa ultramafiter) samt cummingtonit (accessoriskt).

De järn-kromrika spinellerna benämnes, med avtagande kromhalt, kromit, ferrit-kromit, krom-magnetit och magnetit.

Spineller förekommer alltid i ultramafiterna. Volymprocenten varierar mellan 2-10 %. Spinellerna är oftast zonerade med en transparent, Mg-Al-rik kromit eller en opak, Mg-Al-fattig kromit i de centrala delarna. Kärnan är normalt omgiven av en ferrit-kromit eller en krom-magnetit, men i en del spineller förekommer även Mg-Al-fattig kromit utanför kärnan. Troligen är Mg-Al-kromiterna primära. Vid serpentiniseringen kristalliserade magnetit eller kromförande magnetit i kantzonen (rim, Fig. 9). Spinellernas kemi och grupperingar framgår av Fig. 9.

Fig. 9.
Spinellgruppens kemi



1 Magnetite, rim, Vinberget, Västerbotten (JS:74:40) KÖLI

2 Magnetite, rim, Autoklinten, Västerbotten (JS:75:5) KÖLI

3 Magnetite, rim, Autoklinten, Västerbotten (JS:75:5) KÖLI

4 Cr-magnetite, rim, Rotiken, Västerbotten (JS:75:37) SEVE

5 Cr-magnetite, Salefjället, Västerbotten (JS:77:37) SEVE

6 Cr-magnetite, Vinberget, Västerbotten (JS:74:45) KÖLI

7 Ferrite-chromite, rim, Vinberget, Västerbotten (JS:74:42) KÖLI

8 Ferrite-chromite, rim, Rödberget, Bunnerviken, Jämtland (JS:77:12) SEVE

9 Ferrite-chromite, core, Rödberget, Bunnerviken, Jämtland (JS:77:12) SEVE

10 Opaque Mg-Al-poor chromite, Rotiken, Västerbotten (JS:74:104) SEVE

11 Opaque Mg-Al-poor chromite, core, Rotiken, Västerbotten (JS:75:37) SEVE

12 Opaque Mg-Al-poor chromite, rim, Rørskarakselen, Norge (JS:75:N:8) HELGELAND

13 Opaque Mg-Al-poor chromite, core, Rørskarakselen, Norge (JS:75:N:8) HELGELAND

14 Opaque Mg-Al-poor chromite, core, Vinberget, Västerbotten (JS:74:40) KÖLI

15 Transparent Mg-Al-rich chromite, Feragstjella, Norge (JS:74:N28) E. TRØNDELAG

16 Transparent Mg-Al-rich chromite, core, Vinberget, Västerbotten (JS:74:62) KÖLI

17 Transparent Mg-Al-rich chromite, core, Vinberget, Västerbotten (JS:74:42) KÖLI

18 Transparent Mg-Al-rich chromite, core, Autoklinten, Västerbotten (JS:76:5) KÖLI

19 Pleonaste, S. Bunnersjöarna, Jämtland (JS:77:17) SEVE

Den kemiska sammansättningen av spinellerna (Fig. 9) visar en trend med kromitrika kärnor och magnetitkantzoner i spineller från serpentiniter belägna i lågmetamorf Köli. Spinellerna från den högre metamorfa Seven visar en mer homogen ferrit-kromitisk sammansättning. Detta kan vara resultatet av att den prograda metamorfosen i Seve homogeniserade spinellerna, efter det att de tidigare varit zonerade med magnetitkantzon i serpentiniten. Serpentiniterna dehydrerades vid samma tillfälle. Sulfider förekommer som heazlewoodit (Ni_3S_2), pentlandit ($NiFeS_2$) och, främst i cortlandit, som magnetkis (Fe_6S_7).

VI GEOKEMI

Ultramafiterna och ett antal analyserade gabbrobergarter inom den svenska delen av Kaledoniderna behandlas i föreliggande rapporter i tre grupper:

* differentierade hög-Al-ultramafiter
* massiva, solitära låg-Al-ultramafiter
* detritiska serpentiniter

Ett mindre antal prover är svåra att korrelera till ovanstående grupper eller har så avvikande halter av något eller några element, att de menligt skulle påverka framräknade medelvärden. De har därför uteslutits ur medelvärdesberäkningarna.

Undersökningarna har koncentrerats till de massiva, solitära låg-Al-ultramafiterna och deras detritiska varianter.

De flesta (85 %) av de analyserade ultramafiterna visar sig vara av låg-Al-typ (Tabell 2). De karakteriseras av lågt Al_2O_3-innehåll (<3.8 %), normalt ca 1.0 %), ungefär lika proportioner SiO_2 och MgO (40-45 %), låga Na_2O- och K_2O-halter samt NiO och Cr_2O_3, båda på ungefär 0.3 %. Denna kemi är typisk för den s k Alpin-typen av ultramafiter (Thayer, 1960).

Övriga ultramafiter (ca 15 %) har en något annorlunda kemisk sammansättning än de ovan beskrivna låg-Al-ultramafiterna. Denna grupp (hög-Al-ultramafiter) karakteriseras av högt Al_3O_3-innehåll (>3.8 %, normalt ca 9 %) och i relation till låg-Al-ultramafiternas höga TiO_2- och $Na_2O + K_2O$-halter. Hög-Al-ultramafiterna har låga MgO/FeO-förhållanden (<6), medan låg-Al-ultramafiterna har höga (>6) (se Tabell 2).

De ur deponeringssynpunkt intressanta ultramafiterna är av låg-Al, massiv, solitär typ.

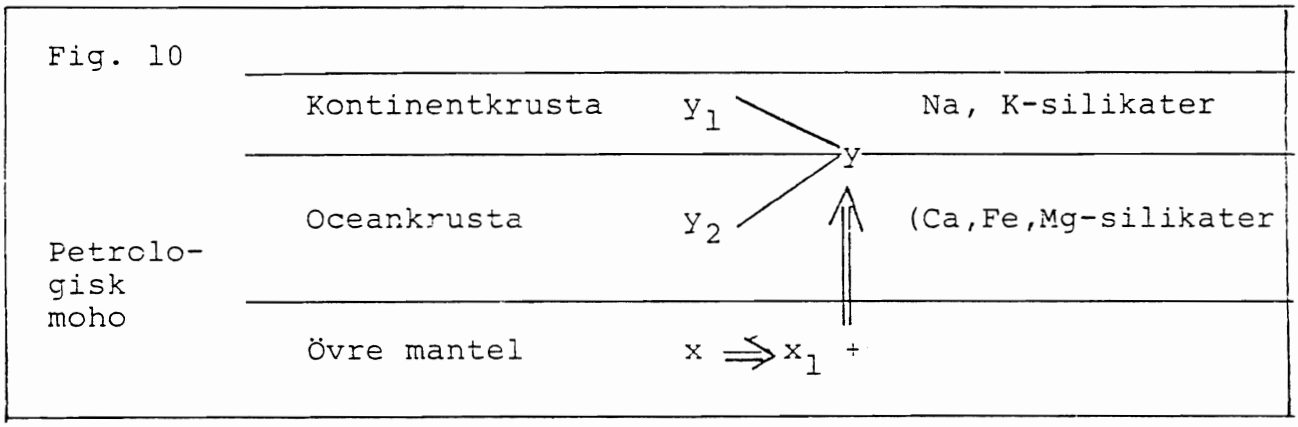
Tabell 2. Kemisk sammansättning för massiva låg-Al-ultramafiter, detritiska serpentiniter och hög-Al-ultramafiter från svenska Kaledoniderna.

	Medelvärde (vikts-%)		
	Låg-Al-ultra-mafiter (355 analyser	Detritiska serpen-tiniter (23 analyser)	Hög-Al-ultra-mafiter (38 analyser
SiO_2	40.40	35.24	44.25
TiO_2	0.27	0.32	0.59
Al_2O_3	1.15	1.52	8.39
Cr_2O_3	0.32	0.43	0.25
Fe_2O_3	3.90	4.09	4.78
FeO	4.59	3.52	8.12
MnO	0.12	0.18	0.18
NiO	0.31	0.35	0.13
MgO	37.42	27.73	22.14
CaO	1.17	9.72	7.77
Na_2O	0.22	0.15	0.44
K_2O	0.08	0.01	0.16
H_2O	5.71	7.97	2.53
CO_2	1.28	4.07	0.30
Ign. loss	10.84	18.17	5.45
MgO/FeO	8.15	7.88	2.73

VII ULTRAMAFITERNAS GEOLOGISKA HISTORIA

Solitära, låg-Al-ultramafiter har troligen sitt ursprung från en geokemiskt utarmad (depleted) mantel (övre delen av manteln). För att ge bakgrunden till denna hypotes antager vi att mantelns sammansättning är X (Fig. 10) Kemiska förändringar av mantelmaterialet har sannolikt givit upphov till krustans sammansättning (y) (Fig. 10), som i sin tur är differentierad i kontinentmaterial (y_1), (Fig. 10) och oceankrustans material (y_2). Vissa element (Si, Al, Ca, Na och K) har förflyttats upp mot jordytan från x och ger krustan (y) med kemisk sammansättning, som är rik på dessa element. Krustan i sin tur differentieras i kontinentmaterial (y_1), som är mest rika på ovan nämnda element och oceanbottenmaterial (y_2) med mindre halt av dessa element men med proportionerligt högre Fe och Mg än y_1. Manteln (x), som givit från sig Si, Al, Ca, Na och K blir utarmad på dessa elementvilket ger en rest (x_1). Denna kommer då att hålla höga halter av kvarvarande Fe och Mg. Den utarmade manteln (x_1) representeras av den övre delen av manteln.

Fig. 10



Tabell 3.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
Kontinentkrusta (y_1) (Medelsammansättning av övre kontinentala jordskorpan, Poldervaart, 1955)	66.4	15.5	1.8	2.8	2.0	3.8	3.5	3.3
Oceankrusta (y_2) (Medelsammansättning av oceaniska lava-bergarter, Vallier, 1973)	50.3	15.2	2.9	7.9	7.6	12.1	2.3	0.1
Övre mantel (x_1) (Harzburgit, Ringwood, 1975)	45.3	1.8	8.1 (Allt järn som FeO)		43.6	1.2	>0.1	>0.1

Vid jämförelse mellan den troliga sammansättningen av mantelns övre del och de solitära ultramafiterna i fjällkedjan finner man stora geokemiska likheter (jfr tabell 2 och 3).

De solitära ultramafiternas geologiska historia kan sammanfattas i följande punkter:

1) Materialet härrör från en icke-hydrerad del av den övre manteln. Detta antyds av
   * likhet i geokemin
   * olivinsammansättning
   * Ni-innehåll
   * Cr-innehåll

2) Vid ett tidigt, preorogent stadium, förändrades bergarterna från en dunitisk-harzburgitisk sammansättning till en serpentinitsammansättning. Denna omvandling beror på ett tillskott av H_2O. Oliviner och pyroxener omvandlades till serpentinmineral, lizardit och krysotil. Vissa relikter (pyroxen och olivin) är de enda primära mineralen som är kvar i serpentiniten. Denna tidiga hydrering ägde rum i en oceanryggmiljö eller i en djupgravsmiljö, troligen i nära samband med förkastningsaktivitet. Serpentiniterna följde med oceankrustan från oceanryggen mot en ordovicisk subduktionszon eller serpentiniserades i denna subduktionszon. Omvandlingen från dunitiskt-harzburgitiskt övre mantelmaterial ägde således rum på ett tidigt stadium.

3) Serpentinitmaterialet har en annan densitet (2600 kg/m^3) än det övre mantelmaterialet (3000 - 3150 kg/m^3). Detta medför att serpentinmaterialet har möjlighet att protrudera (stiga i kallt, (< 300°C) plastiskt tillstånd) från en lägre del in i oceankrustans övre del och in i kontinentmaterialet. Serpentinitkroppar (jfr saltdomer) kom så att på diapirisk väg stiga upp i de ordoviciska sedimenten. Detta kan visas genom att detritiska serpentiniter (=sedimentära serpentiniter) avsattes i det ordoviciska sedimentationsområdet. Ultramafitkroppar måste alltså ha varit i erosionsposition under denna tid. De serpentinitkroppar som hamnade i de Ordoviciska sedimenten (Köli) har fortfarande sin serpentinitsammansättning (serpentin utgörs dock av antigorit), medan de serpentiniter som protruderade in i Sevens sediment, utsattes för högre metamorf omvandling - dehydrerades tillbaka till dunit-harzburgit-

mineralogi. Temperaturen i Sevemetamorfosen överstiger stabilitetsintervallet för serpentin med omvandling från serpentin till olivin och pyroxen som följd.

4) Denna protrusionsmekanism medför att de solitära ultramafiterna, idag belägna i fjällkedjan, är "rörliga" kroppar belägna i Kaledonidernas metasediment. Detta indikeras av bl a det topografiska linsformade utseendet, av de geologiska ytkarteringarna, av kontaktrelationen till omgivande metasediment samt av ultramafiternas tektoniska prägling i massivens ytterkant.

5) Ultramafitkropparna, belägna i det geosynklinala sedimentationstråget under Ordovicium, deformerades samtidigt med sedimenten under den Kaledonska orogenesen. Överskjutningar av enorma dimensioner förflyttade sedimenten med sina inlagrade, linsformade ultramafiter från väster in över den Baltoskandiska skölden till sina nuvarande positioner i de olika skollorna.

6) Det finns starka skäl att geologiskt anta, att ultramafitmassiven i den svenska fjällkedjan ligger som stora linser (tvålar) i sina omgivande metasedimentära bergarter. Ultramafiterna är mycket motståndskraftiga mot tektonisk påverkan (deformationen tas upp i massivens ytterområden) och inga tektoniskt sönderspräckta massiv kan påvisas.

VIII SAMMANSTÄLLNING AV ULTRAMAFITPROBLEMATIKEN I SAMBAND MED SLUTFÖRVARING AV RADIOAKTIVT AVFALL

För att skydda jordens organismer mot den radioaktiva strålningen som orsakas av det radioaktiva avfallet, måste en del av avfallet undanskaffas för mycket lång tid. Tiden kan beräknas (Brotzen, 1974) till minst 800 år upp till någon miljon år, om endast rening som idag förekommer, skulle användas.

Följande krav måste beaktas:

1) Den joniserande strålningen måste avskärmas, men eftersom den joniserande strålningen avskärmas effektivt av både jord och berg, är detta kanske utan betydelse i sammanhanget. Hur ultramafiterna fungerar som strålningsbarriär har jag aldrig sett några uppgifter om. Tänkbart är att olivin ($MgFeSiO_4$) utgör en effektiv strålningsbarriär.

2) Värmeutvecklingen får ej ge skadlig förhöjning av temperaturen på jordytan. Det svenska urberget tillåter en deponering (Brotzen, 1974) i detta avseende. Ultramafiter har en förhållandevis låg värmeledningsförmåga.

3) Spridning av avfallet till jordytan får ej kunna ske. Vid avfallsdeponering i berg skall detta krav uppfyllas Ultramafiterna i fjällkedjan ger vissa parametrar, som ur geologisk synpunkt är gynnsamma för avfallsdeponering. Dessa parametrar redovisas i följande punkter.

   * Ultramafiterna uppträder som stora linsformade kroppar ("tvålar"), som är geologiskt "rörliga" i sin omgivning.

* Bergarten i sig själv är deformationsmässigt kompetent, men bergartskroppen reagerar ändå plastiskt i sin omgivning.

* Förkastningar tycks inte ha spräckt någon solitär ultramafitkropp belägen i de svenska fjällen. Rörelsen i berggrunden tas ut i kontaktzonen mellan ultramafit och omgivande berg (Fig. 11).

* Ultramafiterna uppvisar en positiv spricktektonik på grund av att den rupturella deformationen tas upp i massivens ytterområde. Bergartskropparna är troligen massformiga och ej söndersprucknа inuti. Sprickfrekvensen är alltså sannolikt låg i ultramafitkroppens centraldel.

* Bergartsmaterialet har mycket låg porositet (mineralkornen i tätpackning), vilket ger materialet en utmärkt kompaktion (tät berg) och som tidigare nämnts är sprickfrekvensen låg. Detta bör ge en hydrologiskt positiv bild.

* Fjällkedjans ultramafiter har deformerats av den Kaledonska orogenesen, som inte lyckades "knäcka" ultramafitkropparna. Ingen framtida tektonisk påverkan kan således spräcka avfallsdeponeringsutrymmet i en solitär ultramafit.

* Fjällkedjan ligger i en för närvarande lugn jordbävningszon (Fig. 12).

* De solitära ultramafiterna har en mafisk mineralsammansättning (olivin, pyroxen och antigorit) som är "självläkande", dvs olivin omvandlas vid tillförsel av H_2O till serpentinmineral. Vid temperaturer överstigande 300°C och ett tryck på 350 MPa (Raleigh & Paterson, 1965) dehydreras serpentinmineral till olivin. Dunit-peridotit-ultramafiter utgör en geologiskt torr miljö.

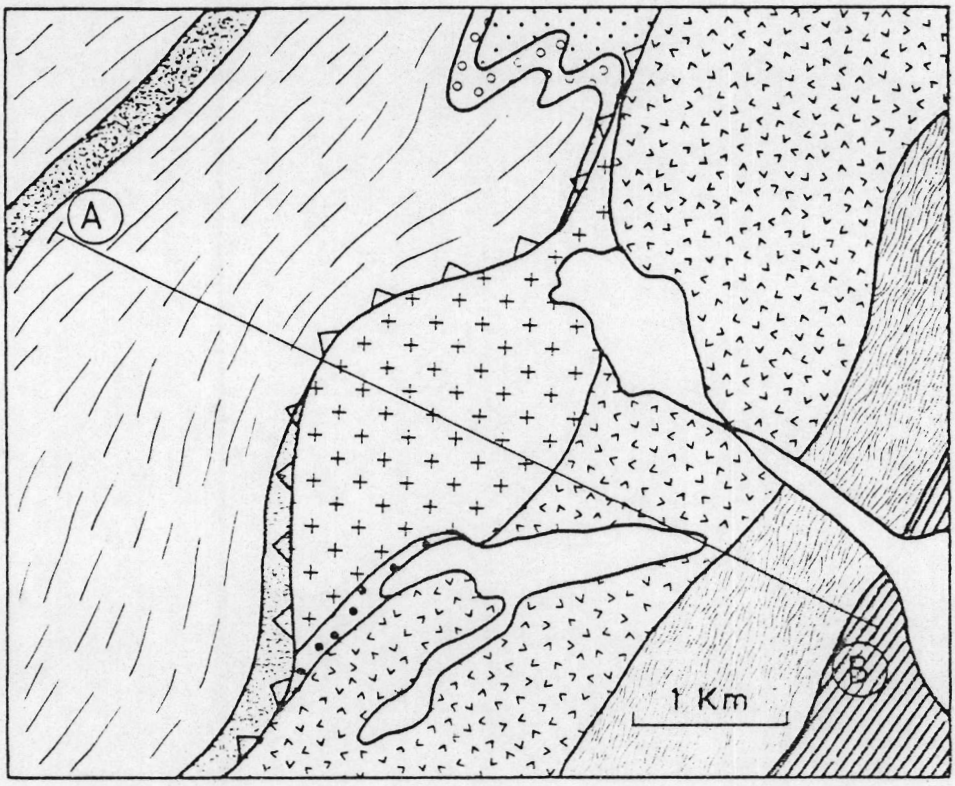
* Viktiga grundvattendata saknas, men ultramafiten bör ge a) pH > 8, b) absorption av Fe och avge Mg till vattnet, c) en total jonutlakning som är mycket låg för serpentinit (10 ppm) och något högre för dunit (30 ppm), d) en reducerande miljö (lågt Eh; < - 0,2 v ?). Alltså bör redoxkänsliga element föreligga i lägre oxidationstillstånd (U(IV), Pu(IV) eller Pu(III), Np(IV) och Tc(IV). (B. Allard och T. Claesson, pers. comm.).

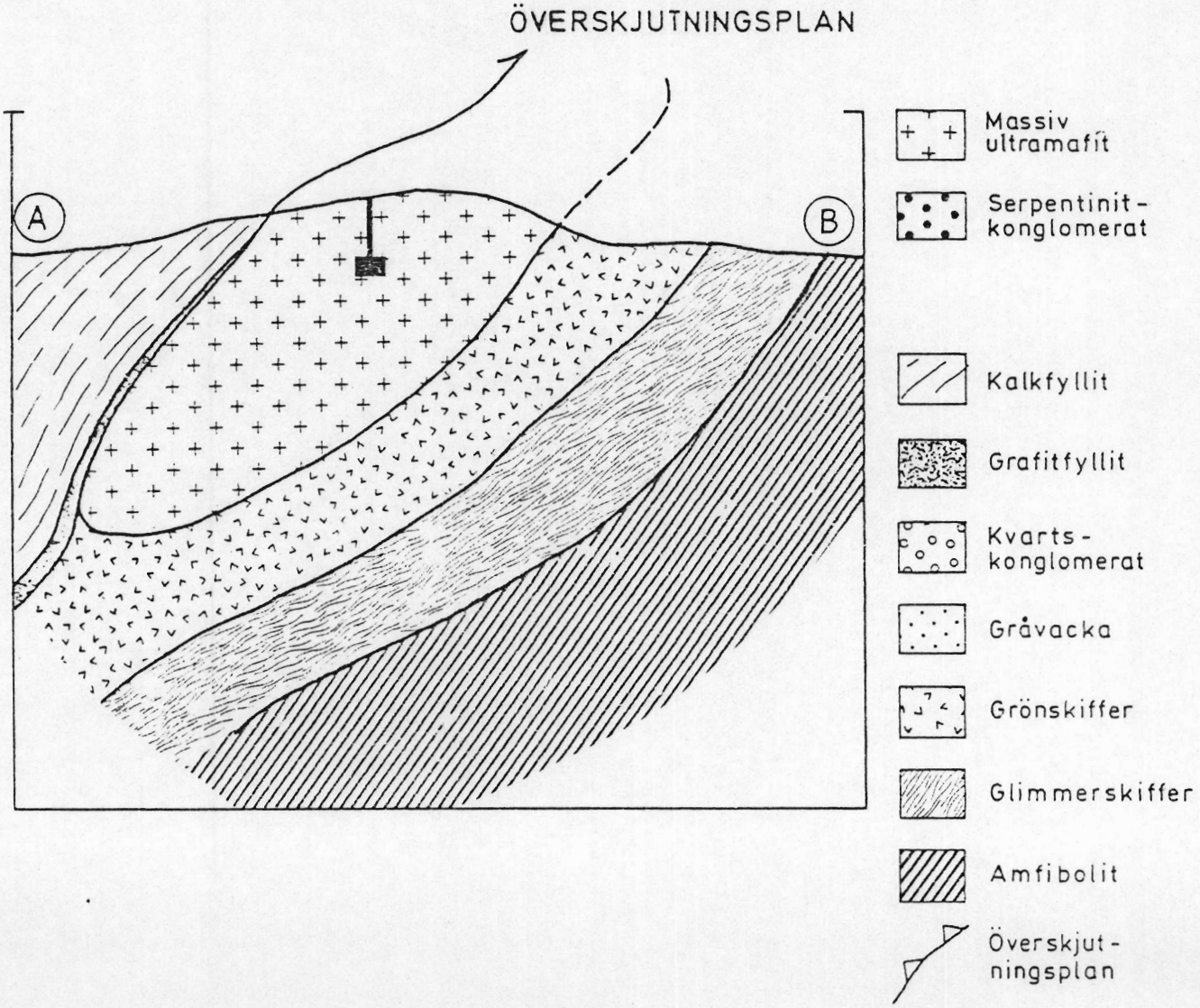
* Ytmässigt tillräckligt stora kroppar existerar. Volymerna för de olika solitära ultramafiterna är okända, men troligen har de areellt stora kropparna mycket stora volymer. De största massiven bör undersökas med magnetometri, slingram, gravimetri och kärnborrning för att fastställa dessa kroppars volym och form. Hittills är en 130 m lång borrkärna från Vinberget, söder om Tärnaby, samt tre borrkärnor om vardera 100 m längd från Graipesvare, Murfjället och Rotiken, södra Västerbotten, mineralogiskt undersökta (Broman, 1976). Sprickfrekvens och hydrologi är dock ej undersökta.

* Vissa av fjällkedjans ultramafiska massiv ligger i flera avseenden geografiskt väl till. Områdena är obefolkade och till stora delar är det statlig mark. Samtliga intressanta massiv ligger geografiskt i en arbetsbehövande region. En negativ faktor utgörs av de mycket långa transportavstånden från de avfallsproducerande kärnkraftverken till ett eventuellt deponeringsområde i fjälltrakterna.

Ultramafiterna visar enligt mitt förmenande intressanta geologiska perspektiv i avfallsdebatten om kärnbränsle. En allvarlig undersökning av ett bra ultramafitobjekt bör, innan slutgiltig avfallsdeponeringsplats bestämmes, undersökas.

Fig.11. Geologisk karta över Kroksjöns ultramafitmassiv, Västerbotten. Kartan visar att rörelsen i berggrunden har skett i kontaktzonen mellan ultramafit och omgivande berg.





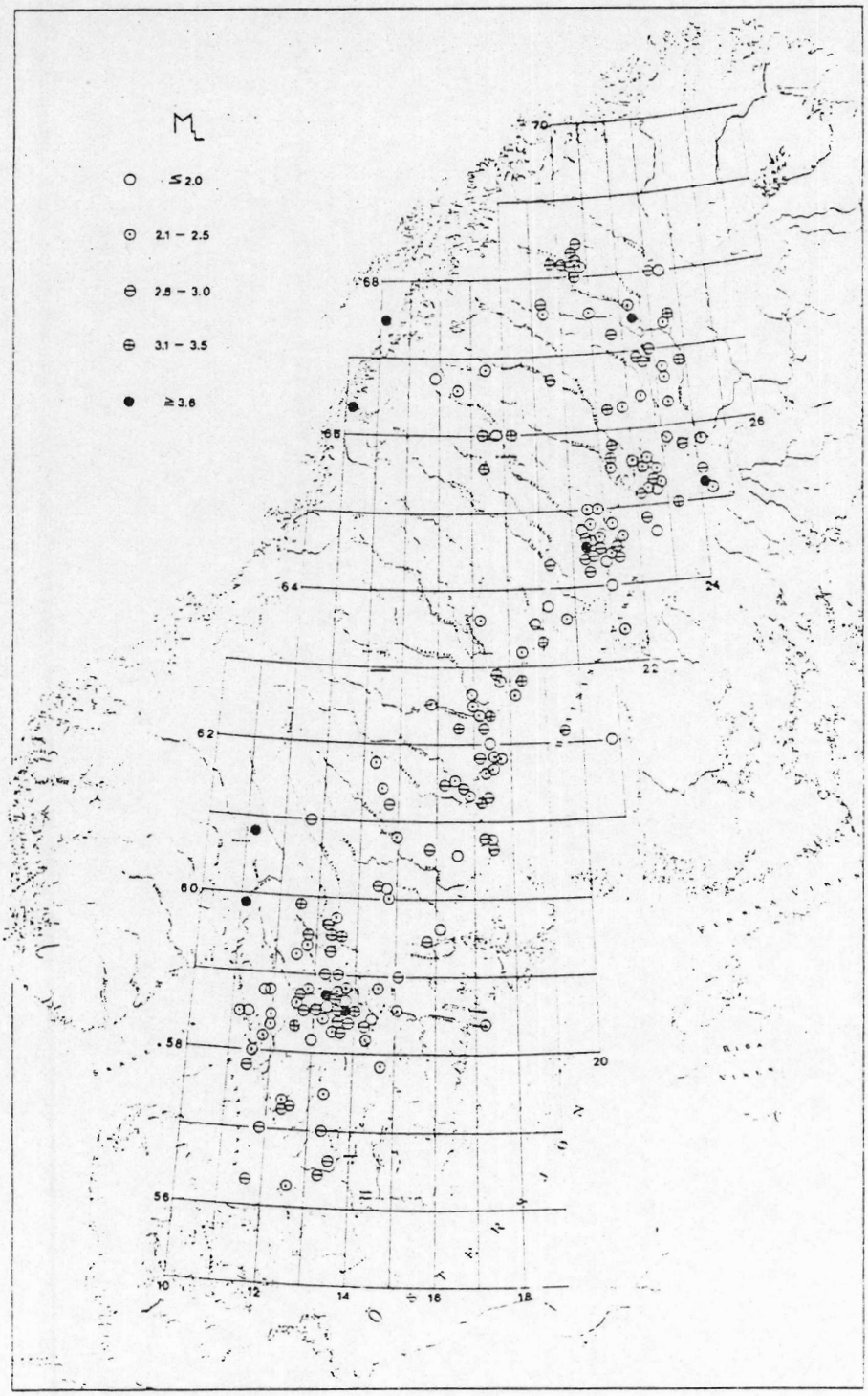


Fig. 12. Seismisk karta över Sverige 1951-1976. Från Båth, M., 1979: Earthquakes in Sweden 1951-1976. SGU, serie C, nr 750.

IX RÖDFJÄLLET - ETT STORLEKSMÄSSIGT INTRESSANT OBJEKT OCH FÖRSLAG TILL UNDERSÖKNING AV DETTA OBJEKT

För att en ultramafit skall vara intressant som avfallsdepå för radioaktivt avfall, måste bergartskroppen vara av en viss storlek. Utrymmet för själva avfallsanläggningen som skall utföras i bergartsmassan skall vara 1 x 1 km helst i ett plan. Möjlighet finns att separera depositionsutrymmet i två plan (500 x 1 km). Djupet från bergets överyta till depositionsdepån bör vara 500 m. En ordentlig zon av "gott", homogent berg skall dessutom finnas runt anläggningen.

De flesta av fjällens ultramafiter är relativt små och uppfyller inte detta storlekskrav. Av figurerna 3A, 3B och 3C framgår att många av ultramafitmassiven är små. (OBS! Figurerna är ej skalenliga vad gäller ultramafiter). Andra ultramafitmassiv har dock en areellt stor yta och är troligen mer än tillräckliga i volym. Ultramafitkropparnas form och volym är inte undersökta i den svenska delen av fjällkedjan, men det vore geologiskt mycket osannolikt, om de inte uppträder som stora linser.

Ett ur storlekssynpunkt intressant ultramafitmassiv bör helst ligga i närheten av en stor väg och bör inte ligga i s k obrutet fjällområde. Detta medför att antalet intressanta ultramafitmassiv reduceras ytterligare.

Vid en genomgång av hittills uppkarterade ultramafitmassiv med beaktande av faktorer som storlek, tillgänglighet och belägenhet utanför obrutet fjällområde, framträder Rödfjällsmassivet (Ruotats) i norra Jämtland som det mest intressanta. Rödfjällsmassivet (Fig. 14) är be-

läget 3 km öster om sundet mellan Stor-Blåsjön och Lill-Blåsjön, ca 2 km från vägen, som går längs sjöns östra sida (kartbladet 22 Frostviken). Västra delen av massivet ligger inom Blåsjöns allmänning och den östra delen ligger inom statens domäner.

Massivet har en yta på ungefär 9 km^2. Maximala utsträckningen i V-Ö är ca 5,8 km och i N-S ungefär 2,2 km. Största kvadratiska ytan kan mätas upp i massivets västra del (3,2 km^2) (Fig. 15). Massivet uppvisar en mycket god blottningsgrad, dvs ultramafiten går i dagen i stort sett överallt.

Ultramafiten i Rödfjället domineras av peridotiter som är mer eller mindre serpentiniserade. Normativt dominerar oliviniter med underordnad peridotit. Dessa bergarter har sedan serpentiniserats och modalt dominerar serpentiniserad peridotit (> 75 % serpentinmineral i bergarten, resterande del av mineralen utgörs av olivin).

Ultramafiten i Rödfjället varierar emellertid i olivinhalt på grund av en tydlig kompositionell lagring. Tio prover från olika delar av massivet har provtagits (Fig 15) för geokemisk analys och dessa analyser redovisas i tabell 4.

Rödfjällsmassivets form och volym är inte hittills undersökta, men det finns all anledning att förmoda att massivets mäktighet är tillräcklig för ett deponeringsutrymme. Foliationen i de omgivande sedimentbergarterna stupar ungefär 45° mot norr. Det är rimligt att anta, att ultramafitmassivet ligger i foliationsriktningen. Om detta är ett riktigt antagande blir massivets mäktighet ungefär 2 km i massivets norra del. Denna mäktighet uppfyller mer än väl fordringarna för deponeringsutrymmets tilltänkta djup. Är ultramafitmassivet inte konkordant med foliationen, utan låt oss som ett minimum säga, att massivet

stupar 5° mot norr, blir mäktigheten inte mer än 200 m och massivet är då helt otillfredsställande som deponeringsutrymme.

Rödfjällsmassivet uppvisar ett flertal tilltalande parametrar som deponeringsutrymme för kärnavfall. Detaljkännedomen om detta massivs form och volym kan dock ej besvaras för närvarande. För att snabbt få svar på dessa frågor föreslås följande geologiska undersökningar.

En magnetometerprofil och eventuellt en slingrammätning och gravimetermätning utförs över massivets västra del och med utgångspunkt från dessa informationer utförs en kärnborrning för att få fram sprickfrekvens, bergkvalitet och volym. Borrhålet utnyttjas också för hydrogeologiska tester, kärnkartering (RQD) och mineralogiska undersökningar (bl a sprickfyllnader). Detta ger information som är nödvändig för vidare diskussion, huruvida ultramafiter är ett alternativ för slutgiltig förvaring av kärnavfall.



Fig. 14. Rödfjällsmassivet öster om Blåsjön, kartbladet 22 E Frostviken.

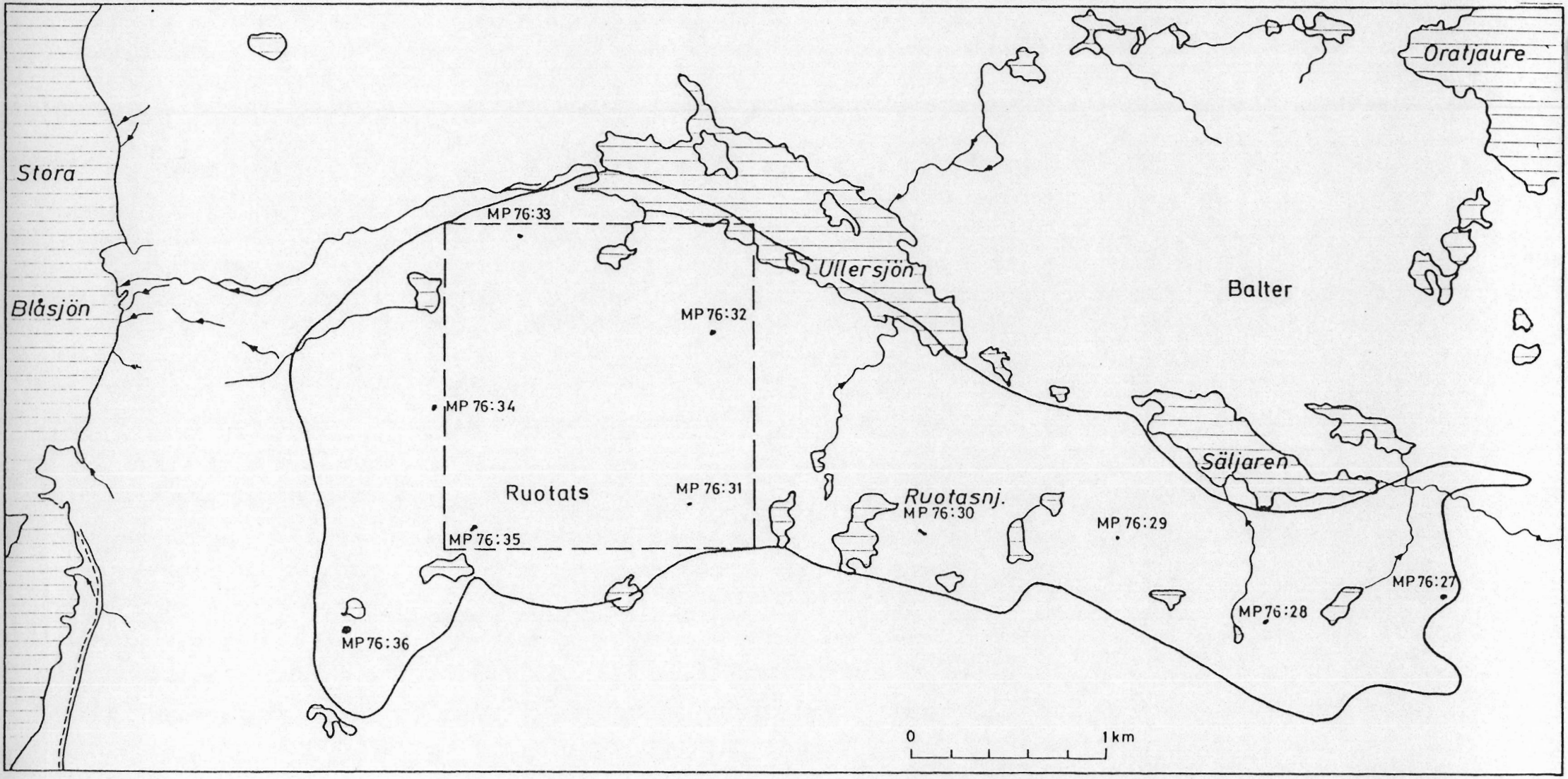


Fig. 15. Rödfjällsmassivet, norra Jämtland. Kartblad 22 F Frostviken.

TABELL 4

RÖDFJÄLLET	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	ign loss	Summa Ni och C
MP 76027	41,4	0,25	0,1	3,51	4,24	0,11	39,94	0,31	0,06	0,01	8,69	98,62
MP 76028	40,3	0,23	0,1	3,80	3,45	0,10	38,84	0,33	1,03	0,01	11,16	99,35
MP 76029	38,3	0,31	0,1	4,37	3,41	0,11	40,01	0,01	0,34	0,01	11,82	98,69
MP 76030	40,4	0,24	0,1	3,84	3,52	0,10	39,29	0,15	0,03	0,01	11,79	99,47
MP 76031	42,0	0,24	0,1	3,67	3,91	0,10	39,13	0,32	0,04	0,01	9,36	98,88
MP 76032	39,6	0,21	0,1	3,35	4,07	0,10	40,57	0,16	0,29	0,01	9,45	97,91
MP 76033	41,7	0,30	0,1	2,79	4,65	0,11	40,83	0,24	0,04	0,01	8,42	99,19
MP 76034	39,3	0,26	0,1	4,05	3,22	0,10	38,23	0,10	0,80	0,29	11,40	97,85
MP 76035	41,7	0,27	0,1	3,42	4,34	0,11	39,11	0,27	0,29	0,11	9,12	98,84
MP 76036	41,9	0,29	0,1	3,16	4,63	0,10	40,25	0,29	0,11	0,01	8,17	99,01
Medelvärde	40,7	0,25	0,1	3,60	3,94	0,10	39,62	0,22	0,30	0,05	9,94	98,82

REFERENSER

Benson, W.N., 1926: The Tectonic Conditions Accompanying the Intrusion of Basic and Ultrabasic Igneous Rocks, Nat. Acad. Sci. Mem. 19, 1, 90 pp.

Broman, P.G., 1976: Nickel i fjällkedjan. Synpunkter på tillgångar och utvinningsmöjligheter. Föredrag vid Svenska Gruvföreningens Årsmöte 1975-11-28. Svenska Gruvföreningens Meddelande nr 144 Volym 9 pp 13-66.

Brotzen, O., 1974: Kärnkraftens högaktiva avfall. Lägesrapport från Aka-utredningen. Industridepartementet DSI 1974:6.

Båth, M., 1979: Earthquakes in Sweden 1951-1976. SGU, serie C, nr 750.

Calon, T.J., 1973: Unpubl. report. University of Leiden.

Calon, T.J., 1979: A study of the alpine-type peridotites in the Seve-Köli Nappe Complex Central Swedish Caledonides with special reference to the Kittelfjäll peridotite. University of Leiden.

Coleman, R.G., 1977: Ophiolites. Ancient Oceanic Lithosphere? Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 229 pp.

Coleman, R.G. & Keith, T.E., 1971: A chemical study of serpentinization - Burro Mountain, California. J. Petrol. 12, 311-328.

Condie, K.C. & Madison, J., 1969: Composition and volume change accompanying progressive serpentinization of dunites from Webster - Addie ultramafic body, N.C. Am. Mineral. 54, 1173-1179.

Davies, H.L., 1971: Peridotite-gabbro-basalt co,plex in eastern Papua, an overthrust plate of oceanic mantle and crust. Bull., 128, Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics. Canberra, Australia. 48 pp.

de Keyzer, F., 1952: Unpubl. report, University of Amsterdam.

Du Rietz, T., 1935: Peridotites, serpentinites and soapstones of northern Sweden. Geol. Fören. Stockh. Förh. 57, 133-206.

Eichstädt, F., 1884: Mikroskopisk undersökning av olivinstenar och serpentiniter från Norrland. Geol. Fören. Stockh. Förh. 7, 333.

Flodberg, K. & Stigh, J., 1981: The Umbukta Ultramafic and Mafic Complex in the Rödingsfjället Nappe, northern Swedish Caledonides. Uppsala Caledonide Symposium 1981, Abstracts in Terra cognita. Vol. Nr. 1, p 42.

Foslie, S. & Strand, T., 1956: Namsvatnet med en del av Frøyningsfjell, NGU Nr 156, 82 pp.

Furnes, H., Roberts, D., Sturt, B.A., Thon, A., and Gale, G.H., 1980: Ophiolite fragments in the Scandinavian Caledonides. In. Ophiolites, proceedings international symposium Cyprus 1979. Ministry of Agriculture and Natural Resources and Geological Survey Department Republic of Cyprus, pp. 582-600.

Gavelin, S. & Kulling, O., 1955: Beskrivning till Berggrundskarta över Västerbottens län. SGU Ca 37,295 pp.

Hostetler, P.B., Coleman, R.G., Mumpton, F.A. & Evans, B.W., 1966: Brucite in Alpine serpentinites. Am. Mineral.51, pp.75-98.

Jackson, K.C., 1970: Textbook of Lithology, McGraw - Hill New York. 534 pp.

Janssen, F.L., 1953: Opublicerad rapport. Amsterdams universitet.

Kautsky, G., 1953: Der Geologische bau des Sulitelma-Stalojauregebiets in den Nordscandinavischen Kaledonien. Sveriges Geol. Unders. C 528,228 pp.

Kulling, O., 1933: Bergbyggnaden inom Björkvattnet - Virisen området i Västerbottens-fjällens centrala del. Geol. Fören. Stockh. Förh. 55, 167-422.

Kulling, O., 1960: On the Caledonides of Swedish Lapland in Magnusson et al. Sver. Geol. Unders. Ba 16, 150-177.

Michel, H., 1950: Geology and petrology of the Borkafjäll region, 1-138. Broese & Peereboom, Bredo, Netherlands.

Moody, J.B., 1976: Serpentinization: a review. Lithos 9, 125-138.

Poldervaart, A., 1955: Chemistry of the Earth´s Crust. Geol. Soc. America, Spec. paper nr 62.

Qvale, H. & Stigh, J.: Ultramafic rocks in the Scandinavian Caledonides. Abstracts in Terra cognita, Vol. 1, Nr. 1, pp 66. Uppsala Caledonides Symposium 1981.

Qvale, H. & Stigh, J., in press: Ultramafic rocks in the Scandinavian Caledonides. The Scandinavian Caledonides and Related Areas Reviewed. John Wiley and Sons.

Raleigh, C.B. & Paterson, M.S., 1965: Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications. J. Geophys. Res. 70(16), 3965-3985.

Ringwood, A.E., 1975: Composition and Petrology of the Earth's Mantle. MacGraw-Hill, New York.

Shaikh, N.A., 1972: Geology of the Lauttakoski Soapstone deposit. Northern Sweden. Sver. Geol. Unders. C 676, 32 pp.

Stephens, M.B., 1977: Stratigraphy and relationship between folding, metamorphism and thrusting in the Tärna-Björkvattnet area, northern Swedish Caledonides. Sver. Geol. Unders. C 726, 146 pp.

Stigh, J., 1979: Ultramafites and Detrital Serpentinites in the Central and Southern Parts of the Caledonian Allochthon in Scandinavia. Göteborgs Univ., Geol. Inst. Publ. A 27, 222 pp.

Stigh. J., 1980a: Detrital Serpentinites of the Caledonian Allochthono in Scandinavia. In. Wones, D.R. (Ed.), The Caledonides in the USA. Virginia Polytechnic Inst. and State Univ., Dept. Geol. Sci., Mem. 2., pp. 149-156.

Stigh, J., 1980b: Back-nappe folding of the Köli sequence in the Daunatjåkko area in the Caledonides of central Västerbotten, Sweden. Geologynytt, Norsk geologisk forening nr 13. Abstracts Nordisk geologisk vintermøte, Bergen 1980.

Stigh, J., 1981: Content of Ni and Cr in ultramafites and relative enrichment of these elements in detrital serpentinites of the Caledonian Allochthon in Scandinavia. In. An international symposium on metallogeny of mafic and ultramafic complexes: The eastern Mediterranean - western Asia area, and its comparison with similar metallogenic environments in the world. National Technical University of Athens. Vol. 2. 375-390.

Stigh, J. & Ronge, B., 1978: Origin and emplacement of two compositional layered ultramafic bodies in the Caledonides of Västerbotten County, Sweden. GFF. 100, pp. 317-334.

Stigh, J. & Qvale, H., 1981: Excursions in the Scandinavian Caledonides. Uppsala Caledonide Symposium: UCS Excursion No. B 13. Ultramafites and detrital serpentinites - Caledonian allochthon in Västerbotten, Sweden and Røros, Norway, 98 pp.

Strand, T., & Kulling, O, 1972: Scandinavian Caledonides 302 pp. John Wiley & Sons, London and New York.

Streckeisen, A., 1974; Classification and Nomenclature of Plutonic Rocks. Geol. Rundschau, 63, 2, 773-786.

Strömberg, A.G.B., 1955: Zum Gebirgsbau der Skanden im mittleren Härjedalen. Uppsala Univ. Geol. Inst. Bull., 35, 199-243.

Strömberg, A.G.B., 1961: On the tectonics of the Caledonides in the south-western part of the county of Jämtland, Sweden. Uppsala Univ. Geol. Inst. Bull., 39, 92 pp.

Strömberg, A.G.B., 1969: Initial Caledonian Magmatism in Jämtland Area, Sweden, in North Atlantic Geology and Continental Drift. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 12, 375-387.

Svenonius, F., 1883: Om olivinstens- och serpentinitförekomster i Norrland. Geol. Fören. Stockh. Förh., 6, p 342.

Thayer, T.P., 1960: Some critical differences between alpine-type and stratiform peridotite-gabbro complexes. 21st Int. Geol. Congr. Copenhagen, part 13, 247-249.

Trouw, R.A.J., 1973: Structural geology of the Marsfjällen area, Caledonides of Västerbotten, Sweden. Sver. Geol. Unders. C 689, 1-115.

Törnebohm, A.E., 1877: Olivinsten från Kettilsfjäll. Geol. Fören. Stockh. Förh. 3, p. 250.

Törnebohm, A.E., 1888: Om Fjällproblemet. Geol. Fören. Stockh. Förh. 10, 328-336.

Törnebohm, A.E., 1896: Grunddragen af det centrala Skandinaviens bergbyggnad. Kgl. Svenska Vetensk. akad. Handl. 28 (5), 1-212.

Zachrisson, E., 1969: Caledonian Geology of Northern Jämtland - Southern Västerbotten. Sver. Geol. Unders. C 644, 33 pp.

Zwart, H.J., 1974: Structure and metamorphism in the Seve-Köli Nappe Complex (Scandinavian Caledonides) and its implications concerning the formation of metamorphic nappes, in Centenaire de la Société Géologique de Belgique, Géologie des Domaines Cristallins, Liège, 129-144.