

Antwort: Gehalte Seltener Erden in Norwegischen Grünsteinen und ihre Bedeutung für geotektonische Interpretationen

JÖRG LOESCHKE

Loeschke, Jörg: Antwort: Gehalte Seltener Erden in Norwegischen Grünsteinen und ihre Bedeutung für geotektonische Interpretationen. [A reply. Rare earth element contents of Norwegian greenstones and their geotectonic implications.] *Norsk Geologisk Tidsskrift*, Vol. 60 p. 207–212. Oslo 1980. ISSN 0029-196X.

J. Loeschke: Institut für Geologie, Sigwartstr. 10, D-74 Tübingen, Deutschland

H. Schock und ich begrüßen die Stellungnahme von H. Furnes & D. Roberts zu unserem Artikel (Loeschke & Schock 1980). Da es bei dieser Diskussion ausschließlich um die Interpretation der Daten und nicht um die Daten selbst geht, werde ich allein antworten, da ich für die Interpretation der Daten verantwortlich bin.

Selbstverständlich ist die Interpretation von Analysen-Daten von metamorph überprägten Vulkaniten aus dem Orogen-Bereich im Vergleich mit dem rezenten geotektonischen Erscheinungsbild vulkanischer Gesteine immer mit Unsicherheiten belastet. Ich habe in dem genannten Artikel ausdrücklich darauf hingewiesen und lediglich *versucht*, eine einigermaßen plausible Interpretation anzubieten. Ohne Interpretation hätte man leicht den Vorwurf erheben können, daß gerade diese fehlt.

Die einzelnen Argumente von H. Furnes & D. Roberts werde ich in der Reihenfolge abhandeln, wie sie von H. Furnes & D. Roberts in der Diskussion gebracht worden sind.

1) '... imprecise description of sample location in terms of the regional stratigraphy, and confusion with regard to definition of the 'Støren greenstones'. Ich habe mich bei der Beschreibung der Proben-Lokalitäten und deren stratigraphischer Einordnung (siehe auch Loeschke 1976 a, b) an die mir bis zum April 1978 zur Verfügung stehende Literatur gehalten. Das Manuskript wurde im April 1978 abgeschlossen und zum Druck eingereicht. Warum die Drucklegung so lange gedauert hat, kann hier nicht behandelt werden. Neuere Literatur, die von Furnes & Roberts angeführt wird (Furnes et al. 1979, Gale & Pearce 1980, Grenne 1979, 1980, Grenne et al. 1979, Roberts 1980, Ryan et al. 1979, Wood et al.

1979) konnte ich selbstverständlich nicht berücksichtigen, da sie mir noch nicht zur Verfügung stand. Bis April 1978 galt die von Chaloupsky (1977) und Wolff (1977) aufgestellte Stratigraphie, die in den beiden Kartenblättern Hølanda 1:50 000 und Trondheim 1:250 000 zum Ausdruck kommt. Eine Unterscheidung in By-mark-Grünsteine und Støren-Grünsteine *sensu stricto* wurde dort nicht getroffen, beide Grünstein-Züge wurden mit derselben Farbe auf der Karte wiedergegeben. Man wird wohl schwerlich den Sachkennern Chaloupsky und Wolff eine ungenaue Beschreibung der stratigraphischen Verhältnisse vorwerfen können, was nicht besagt, daß nachträgliche Änderungen vorgenommen werden können, da eine Wissenschaft sich immer entwickelt und der Stand der Erkenntnis fortschreitet. Eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Grünstein-Zügen müßte von H. Furnes & D. Roberts zunächst einmal bewiesen und publiziert werden.

2) 'In the $\text{SiO}_2\text{-FeO}^1/\text{MgO}$, $\text{TiO}_2\text{-FeO}^1/\text{MgO}$ and $\text{FeO}^1\text{-FeO}^1/\text{MgO}$ diagrams the metabasalts all clearly define tholeiitic trends, ...'. Tholeiitische Trends besagen nicht, daß es sich hierbei nicht auch um Inselbogen-Basalte handeln kann. Nach Gill (1970), Jakes & Gill (1970), Jakes & White (1972) und Hawkesworth et al. (1977) gibt es tholeiitische Basalte auch auf Inselbögen. Nicholls & Ringwood (1973), Ringwood (1975: 297) und Ringwood (1977: 321) bieten dafür auch ein einleuchtendes petrologisches Modell an. Wenn man sich das AFM-Diagramm der Abbildung 1 ansieht, dann fallen die meisten Analysen der von uns untersuchten Grünsteine in das von Ringwood (1975: 237) bezeichnete Feld der Kalk-Alkali-Gesteine. Diese Diskrepanzen besa-

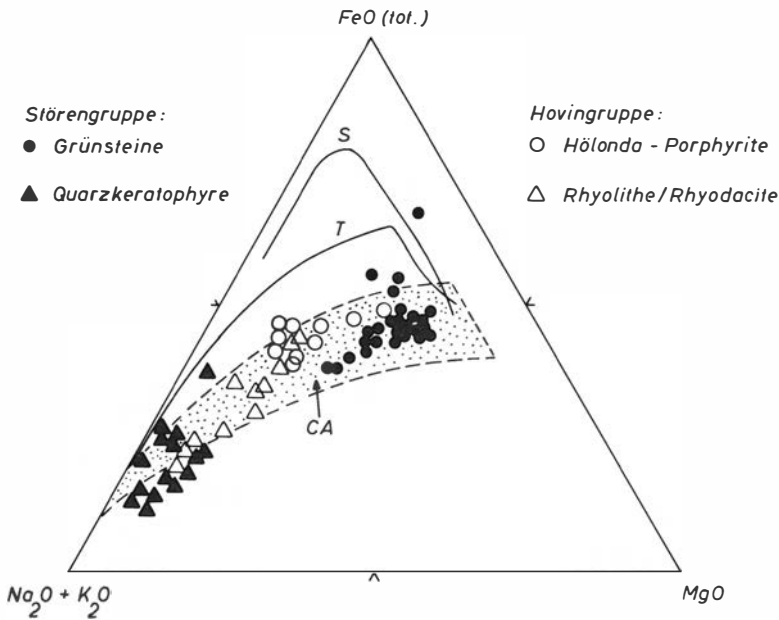


Abb. 1. AFM-Diagramm nach Ringwood (1975: 237), in welches repräsentative Werte von Grünsteinen und Quarzkeratophyren der Størengruppe und von Hølanda-Porphyriten und Rhyolithen/Rhyodaciten der Hovingruppe eingetragen wurden (nach Loeschke 1976b). Nach Ringwood (1975) wird das Feld tholeiitischer Serien durch die Differentiations-Trends der Skaergaard-Intrusion (S, Wager & Deer 1939) und des Thingmuli-Vulkans (T, Carmichael 1964) begrenzt. Das gepunktete Feld (CA) bezeichnet nach Ringwood (1975) Differentiations-Trends der Kalk-Alkali-Serien (zum Beispiel Kaskaden, Aläuten, Neu-Seeland).

gen nur, daß wir noch weit davon entfernt sind, den endgültigen Schlüssel zur Lösung der hier angeschnittenen Fragen in der Hand zu halten.

3) 'Trace element ratios and abundances, as for example the Ti-Zr and Ti-Zr-Y relations, all show that the data fall mostly within the field of ocean-floor basalts with some transition into the within-plate field.' Den Diagrammen von Pearce & Cann (1973) kann meiner Ansicht nach nicht mehr die Aussagekraft zuerkannt werden, wie das noch vor vier Jahren der Fall war. Inzwischen haben Floyd & Winchester (1975), Morrison (1978), Tarney et al. (1979: 689/690) und Wood et al. (1979: 95) zeigen können, daß die von Pearce & Cann (1973) aufgestellten Diagramme an Aussagekraft verloren haben und deswegen nicht mehr ohne weiteres als Beweis dafür herangezogen werden können, daß paläozoische Meta-Basalte aufgrund dieser Spurenelement-Diagramme bestimmten geotektonischen Kategorien zugeordnet werden müssen. Ich kann des aufgrund meiner eigenen Untersuchungen an Basalten der Kaskaden und des Columbia-River-Plateaus (Oregon, U.S.A.) bestätigen. Da außerdem in den Ti-Zr-Y- und

Ti-Zr-Diagrammen von Pearce & Cann (1973) in das Feld der ozeanischen Basalte auch Werte von tholeiitischen Basalten und Kalk-Alkali-Basalten von Inselbögen fallen, haben diese Diagramme keinen allzu hohen diagnostischen Wert. Darauf hat schon Miyashiro (1975:261) aufmerksam gemacht. Je mehr Analysen-Daten zur Verfügung stehen, umso verwirrender wird das Bild und umso schwieriger wird es, allein aufgrund von Spurenelement-Daten die ehemalige geotektonische Position von paläozoischen Meta-Basalten abzuleiten.

4) Zu Fig. 1 von H. Furnes & D. Roberts: In Fig. 1 von Furnes & Roberts haben Furnes & Roberts auf das von uns veröffentlichte Diagramm zusätzlich Daten von ozeanischen Basalten aus dem Nord-Atlantik nach Wood et al. (1979) eingetragen, um zu zeigen, dass die von uns untersuchten Grünsteine hinsichtlich ihrer Seltenerdverteilung mit Basalten mittelozeanischer Rücken übereinstimmen. Abgesehen davon, daß mir diese Arbeit von Wood et al. (1979) im April 1978 nicht bekannt sein konnte, haben Furnes & Roberts hier ein Beispiel ozeanischer Basalte herangezogen, welches als sehr

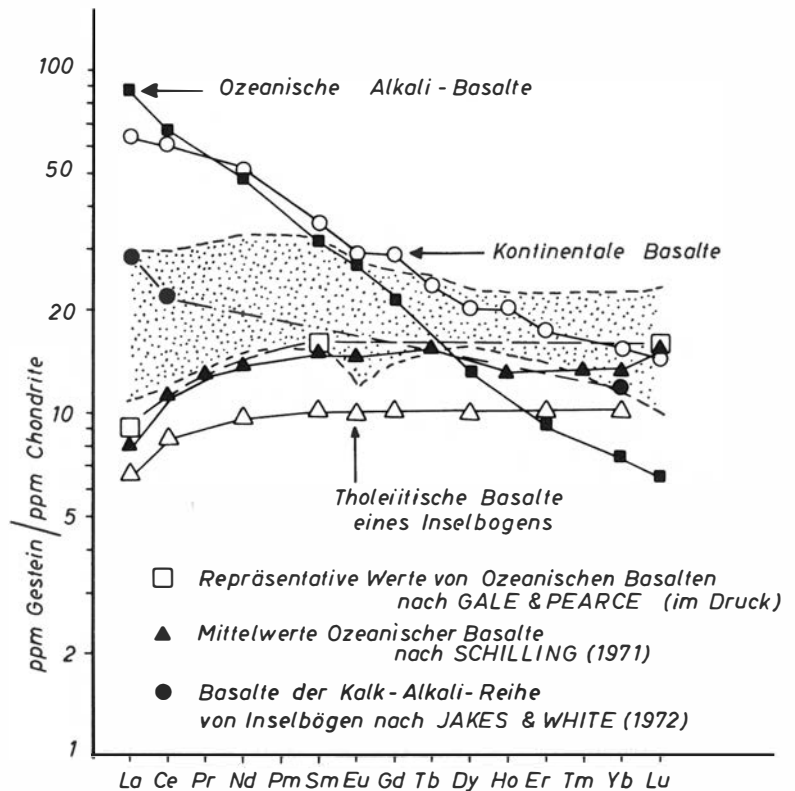


Abb. 2. Verteilung Seltener Erden in ozeanischen Alkali-Basalten (Hawaii, Kay et al. 1973), kontinentalen Basalten (Steens Mountain/Oregon, Helmke et al. 1973), tholeiitischen Basalten mittelozeanischer Rücken (Schilling 1971) und tholeiitischen Basalten eines Inselbogens (Süd-Sandwich-Inseln, Hawkesworth et al. 1977). Das gepunktete Feld stellt das Feld der untersuchten Grünsteine südlich von Trondheim dar. Die Gehalte der Seltenen Erden wurden auf die entsprechenden Gehalte in Chondriten nach Nakamura (1974) und Masuda (1975) normiert. Nach Loeschke & Schrock (1980). Zusätzlich wurden die La-, Sm- und Lu-Werte repräsentativer Proben von ozeanischen tholeiitischen Basalten nach Gale & Pearce (1980) und die La-, Ce- und Yb-Werte von Basalten der Kalk-Alkali-Reihe von Inselbögen nach Jakes & White (1972) eingetragen.

untypisch für Basalte von mittelozeanischen Rücken gelten kann. Wood et al. (1979) weisen darauf ausdrücklich hin. Die große Streubreite der Seltenerdverteilung in diesen Basalten ist ein Ausnahmefall. Man hätte ebensogut Daten von Basalten aus dem Atlantik von LEG 46 heranziehen können (Dungan et al. 1979: 101, Emmermann & Puchelt 1979: 244), welche zeigen, daß diese Basalte des Atlantiks wesentlich homogener in ihrer Seltenerdverteilung sind als die von Wood et al. (1979) untersuchten Basalte und daß sie eine etwa 10- bis 20-fache Anreicherung an Seltenen Erden gegenüber Chondriten aufweisen. Diese Werte entsprechen etwa den Werten, die auch von Schilling (1971) angegeben und von mir in die Fig. 1 eingezeichnet worden sind. Ich habe mich bei der Interpretation der Daten insbesondere davon leiten lassen, daß die bei Be-

rücksichtigung der sekundären Veränderungen meiner Ansicht nach zuverlässigsten Daten von den massigen Partien innerhalb der Pillowlavaströme stammen. Diese Proben (Probe-Nr. N 12, N 16, N 32, N 60, Loeschke & Schock 1980) zeigen eine 20- bis 30-fache Anreicherung an Seltenen Erden gegenüber Chondriten, einen Wert, der etwas höher als bei typischen Basalten mittelozeanischer Rücken liegt. Das ist ein Argument, welches von Furnes & Roberts nicht berücksichtigt wird. Man kann auch hier wieder sagen, daß eine Interpretation umso schwieriger wird, je genauer die Verteilung von Seltenen Erden in Basalten bekannt wird.

5) Zu Fig. 2 von H. Furnes & D. Roberts: Für Fig. 2 von Furnes & Roberts gilt dasselbe, was ich bereits zu Fig. 1 gesagt habe. Die Werte von

Wood et al. (1979) sind *untypisch* für Basalte mittelozeanischer Rücken, dagegen stimmen die ebenfalls eingezeichneten Werte von Bryan et al. (1977) mit den von mir eingezeichneten Werten von Schilling (1971) gut überein. Die La_N/Yb_N -Verhältnisse der von uns untersuchten Grünsteine liegen höher als diejenigen von mittelozeanischen Rückenbasalten und von tholeiitischen Basalten von Inselbögen. Es ist deshalb nicht ausgeschlossen, daß diese Grünsteine Basalte von Inselbögen darstellen, die für den Übergang von typisch tholeiitischen Basalten zu typischen Kalk-Alkali-Basalten charakteristisch sind. Nach Ringwood (1975: 237/238) gibt es alle Übergänge zwischen idealen tholeiitischen Serien und idealen Kalk-Alkali-Serien. Gerade solche Übergangs-Serien werden nach Ringwood (1975) während des frühen Entwicklungsstadiums eines Inselbogens beobachtet.

6) Zu Fig. 3 von H. Furnes & D. Roberts: Hierbei möchte ich mir die Frage erlauben, ob bei den von Gale & Pearce (1980) errechneten repräsentativen Werten für Basalte mittelozeanischer Rücken auch die aus dem Rahmen fallenden Werte von Wood et al. (1979) berücksichtigt worden sind. Wenn die Werte von Gale & Pearce wirklich repräsentativ sind, dann sollte man sie auch zu Vergleichszwecken heranziehen. Ich habe deshalb in Abbildung 2 die Werte für La, Sm und Lu eingezeichnet und sonst die von uns angegebenen Werte übernommen. Außerdem habe ich die La-, Ce- und Yb- Werte von Basalten der Kalk-Alkali-Reihe von Inselbögen nach Jakes & White (1972) eingezeichnet. Dabei zeigt sich folgendes:

Die Werte von Gale & Pearce stimmen praktisch mit den Werten von Schilling (1971) überein.

Die Werte von Wood et al. (1979), die in Fig. 1 von Furnes & Roberts eingezeichnet worden sind und mit deren Hilfe Furnes & Roberts die Übereinstimmung zwischen den von uns untersuchten Grünsteinen und rezenten Basalten mittelozeanischer Rücken begründen, können nicht repräsentativ sein und sind deshalb für Vergleichszwecke ungeeignet.

Die von uns untersuchten Grünsteine haben höhere Gehalte an leichten Seltenen Erden als die von Gale & Pearce als repräsentativ angesehenen Proben von Basalten mittelozeanischer Rücken. Um das noch deutlicher zu zeigen, habe ich die La-, Sm- und Lu-Werte von Gale & Pearce (1980), Schilling (1971) und Loeschke &

Schock (1980) in Tabelle 1 zusammengestellt. Aus dieser Tabelle geht hervor, daß die La-Werte der Grünsteine doppelt so hoch und die Sm-Werte deutlich höher liegen als die entsprechenden repräsentativen Werte von Basalten mittelozeanischer Rücken nach Gale & Pearce sowie nach Schilling. Diese erhöhten Werte leichter Seltenen Erden müssen berücksichtigt und erklärt werden.

Basalte der Kalk-Alkali-Reihe von Inselbögen zeigen nach Jakes & White (1972) auf Abbildung 2 eine gegenüber Basalten mittelozeanischer Rücken erhöhte Anreicherung an leichten Seltenen Erden.

7) 'Thus, on a geochemical basis alone, we will strongly stress the similarity of the Støren greenstones to oceanfloor basalts rather than island arc basalts at any stage of their evolution'. Wenn Furnes & Roberts zu dieser Aussage stehen, dann müssen sie weitere Diskrepanzen erklären:

Das Fehlen von größeren Ultrabasis-Massen südlich von Trondheim habe ich bereits in einer früheren Arbeit erwähnt (Loeschke 1976 b: 65, 68). Furnes & Roberts machen es sich zu leicht, wenn sie dieses Fehlen dadurch erklären, daß die Ultrabasis während des tektonischen Transportes verloren gegangen sein können. Typische Reste ozeanischer Kruste (zum Beispiel Vourinos, Papua, Neukaledonien, Zypern, Canyon Mt., Oman, Coleman 1977: 13, 145) führen nun einmal große Ultrabasis-Massen, die nicht während des tektonischen Transportes verloren gegangen sind. Wenn solche Ultraba-

Tabelle 1. Zusammenstellung der La-, Sm- und Lu-Werte von repräsentativen ozeanischen tholeiitischen Basalten nach Gale & Pearce (1980), von Basalten mittelozeanischer Rücken nach Schilling (1971) und von den untersuchten Grünsteinen südlich von Trondheim nach Loeschke & Schock (1980, Mittelwert von 17 Proben). Bei den Grünsteinen wurde der Wert der Probe N 44 (Loeschke & Schock 1980) nicht berücksichtigt, da diese Probe eine stark sekundär veränderte, chloritische Hyaloklastit-Matrix darstellt und als einzige Probe eine negative Eu-Anomalie aufweist.

	Ozeanische Basalte Gale & Pearce (1980)	Ozeanische Basalte Schilling (1971)	Grünsteine Loeschke & Schock (1980)
La (ppm)	3	2.67	6.18
Sm (ppm)	3.3	3.09	4.44
Lu (ppm)	0.55	0.517	0.53

site südlich von Trondheim nicht vorhanden sind, dann muß man auch andere Erklärungsmöglichkeiten zumindest in Betracht ziehen.

Die von uns untersuchten Grünsteine wechseln an vielen Stellen mit Quarz-Keratophyren. Bei diesen Quarz-Keratophyren handelt es sich teilweise zweifellos um sekundär veränderte rhyolithische Aschen-Tuffe (Ofte Dahl 1968, Loeschke 1976 b), die während der Bildung der Grünsteine abgelagert worden sind. Rhyolithische Aschen sind mir mit Ausnahme von Island und einigen ozeanischen Inseln von submarinen mittelozeanischen Rücken nicht bekannt. Es gibt zwar einige volumenmäßig äußerst geringe Anteile an sauren Intrusiva in mittelozeanischen Rücken (Engel & Fisher 1975), typisch sind rhyolithische Aschen für mittelozeanische Rücken jedoch nicht. Da Grünsteine und Quarzkeratophyre wenigstens teilweise gleichzeitig entstanden sein müssen, sollten Furnes & Roberts eine Lösungsmöglichkeit dazu vorschlagen, die das erklärt. Auf dieses Problem habe ich bereits früher aufmerksam gemacht (Loeschke 1976 b: 68).

Bei den Høllonda-Porphyrinen, die jünger als die darunterliegenden Grünsteine sind, handelt es sich teilweise zweifellos um Andesite mit hohem Al_2O_3 - und niedrigen TiO_2 -Gehalten, die Andesiten von Inselbögen ähneln. (Loeschke 1976 b: 59). Furnes & Roberts konzipieren für diese Zeit und diesen Raum eine Inselbogen-Situation. Inselbögen zeigen eine lange Entwicklung auf mit einer Tendenz, die von Ringwood (1977) klar dargestellt worden ist. Da unsere Proben in überwiegendem Maß von der Lokalität Benna in der Nähe der Høllonda-Porphyrine stammen (= Bymark-Grünsteine nach Furnes & Roberts) und nur wenige Proben aus den Støren-Grünsteinen *sensu stricto* (nach Furnes & Roberts) entnommen worden sind, ist für die Proben von der Lokalität Benna nicht ganz auszuschließen, daß diese die submarinen basaltischen Vorgänger des Inselbogens darstellen, der sich später in den Høllonda-Porphyrinen und auch in den Hareklett- und Grimsas-Rhyolithen/Rhyodaciten (Loeschke 1976 b) teilweise subaerisch dokumentiert. Furnes & Roberts müßten erklären, auf welcher Unterlage dieser auch von ihnen anerkannte Inselbogen entstanden ist. Wenn dieser Inselbogen auf ozeanischer Kruste gebildet worden ist, wie das Gale & Roberts (1974) annehmen, dann ist zu fragen, welche Vulkanite des Høllonda-Gebietes die anfänglichen Tiefwasserstadien dieses Insel-

bogens repräsentieren. Die Høllonda-Porphyrine kommen dafür wohl kaum in Frage, da sie mit Kalken verknüpft sind. Ich meine, es war aufgrund der erhöhten Gehalte an leichten Seltenen Erden im Vergleich zu ozeanischen Basalten bei dem Kenntnisstand von 1978 eine plausible, wenn vielleicht auch nicht voll befriedigende Lösungsmöglichkeit, die unter den Høllonda-Porphyrinen liegenden und ihnen benachbarten Grünsteinen von Benna als submarine Stadien dieses Inselbogens anzusehen. Daß spätere Erkenntnisse wie diejenigen von Grenne (1979, 1980) über den Aufbau des Vassfjell-Komplexes neue Aspekte in die Diskussion bringen, ist nicht weiter verwunderlich, sondern ein in einer Wissenschaft üblicher Vorgang. Bei der Probenahme im Jahre 1973 konnte ich diese Komplikationen in keiner Weise voraussehen und ich habe mich deshalb auf einige typische Beispiele zunächst einmal beschränkt, um überhaupt erst einmal Analysen-Daten zu sammeln, da damals nur äußerst wenige Daten von Vogt (1945) vorlagen.

Danksagung. – Herrn Prof. Dr. H. H. Schock danke ich für hilfreiche Hinweise.

August 1980

Literaturverzeichnis

- Bryan, W. B., Frey, F. A. & Thompson, G. 1977: Oldest Atlantic seafloor, Mesozoic basalts from western North Atlantic margin and eastern North America. *Contrib. Mineral. Petrol.* 64, 223–242.
- Carmichael, I. S. E. 1964: The petrology of Thingmuli, a Tertiary volcano in eastern Iceland. *J. Petrol.* 5, 435–460.
- Chaloupsky, J. 1977: Høllonda, berggrunnskart 1521 II– M. 1:50 000, *Nor. Geol. Unders.*
- Coleman, R. G. 1977: *Ophiolites*. Springer, Berlin.
- Dungan, M. A., Rhodes, J. M., Long, P. E., Blanchard, D. P., Brannon, J. C. & Rodgers, K. V. 1979: The petrology and geochemistry of basalts from site 396, LEGS 45 and 46 of the deep sea drilling project. *Init. Rep. DSDP 46*, 89–113.
- Emmermann, R. & Puchelt, H. 1979: Abundances of rare earths and other trace elements LEG 46 basalts (DSDP). *Init. Rep. DSDP 46*, 241–245.
- Engel, C. G. & Fisher, R. L. 1975: Granitic to ultramafic rock complexes of the Indian Ocean ridge system, western Indian Ocean. *Geol. Soc. Am. Bull.* 86, 1553–1578.
- Floyd, P. A. & Winchester, J. A. 1975: Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements. *Earth Planet. Sci. Lett.* 27, 211–218.
- Furnes, H. & Roberts, D. 1980: A discussion: Rare earth element contents of Norwegian greenstones and their geotectonic implications. *Nor. Geol. Tidsskr.* 60.
- Furnes, H., Roberts, D., Sturt, B. A., Thon, A. & Gale, G. H. (1979): Ophiolite fragments in the Scandinavian Caledonides. *Proc. Int. Ophiolite Symp.* Nicosia, 1979.
- Gale, G. H. & Roberts, D. 1974: Trace element geochemistry of Norwegian lower Palaeozoic basic volcanics and its tectonic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.* 22, 380–390.

- Gale, G. H. & Pearce, J. A. 1980: Geochemical patterns in Norwegian greenstones. *Canad. J. Earth Sci.*
- Gill, J. B. 1970: Geochemistry of Viti Levu, Fiji, and its evolution as an island arc. *Contrib. Mineral. Petrol.* 27, 179–203.
- Grenne, T. 1979: Vassfjellet – et underpaleosoisk ofiolittfragment i det vestlige Trondheimsfelt. Abstract, 14. Nordiske geol. vintermøte 1980, Nor. Geol. For., *Geolognytt* 13, 24.
- Grenne, T. 1980: Vassfjellet area. In Wolff, F. C. (ed.) Excursions across part of the Trondheim Region, Central Norwegian Caledonides. *Nor. Geol. Unders.* 356, 159–164.
- Grenne, T., Gammeltvedt, G. & Vokes, F. M. 1979: Cyprustype sulfides in the western Trondheim Region, Central Norwegian Caledonides. *Proc. Int. Ophiolite Symp. Nicosia*, 1979.
- Hawkesworth, C., O'Nions, R., Pankhurst, R., Hamilton, P. & Evensen, N. 1977: A geochemical study of island-arc and back-arc tholeiites from the Scotia-Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.* 36, 253–262.
- Helmke, P. & Haskin, L. 1973: Rare-earth elements, Co, Sc, and Hf in the Steens Mountain basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta* 37, 1513–1529.
- Jakes, P. & Gill, J. B. 1970: Rare earth elements and the island arc tholeiitic series. *Earth Planet. Sci. Lett.* 9, 17–28.
- Jakes, P. & White, A. J. R. 1972: Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas. *Geol. Soc. Am. Bull.* 83, 29–40.
- Kay, R. W. & Gast, P. W. 1973: The rare earth content and origin of alkali-rich basalts. *J. Geol.* 81, 653–682.
- Loeschke, J. 1976 a: Major element variations in Ordovician pillow lavas of the Støren Group, Trondheim Region, Norway. *Nor. Geol. Tidsskr.* 56, 141–159.
- Loeschke, J. 1976 b: Petrochemistry of eugeosynclinal magmatic rocks of the area around Trondheim (Central Norwegian Caledonides). *N. Jb. Mineral. Abh.* 128, 41–72.
- Loeschke, J. & Schock, H. H. 1980: Rare earth element contents of Norwegian greenstones and their geotectonic implications. *Nor. Geol. Tidsskr.* 60, 29–37.
- Masuda, A. 1975: Abundances of monoisotopic REE, consistent with the Leedy chondrite values. *Geochem. J.* 9, 183–184.
- Miyashiro, A. 1975: Classification, characteristics, and origin of ophiolites. *J. Geol.* 83, 249–281.
- Morrison, M. A. 1978: The use of 'immobile' trace elements to distinguish the paleotectonic affinities of metabasalts: Applications to the Paleocene basalts of Mull and Skye, North-west Scotland. *Earth Planet. Sci. Lett.* 39, 407–416.
- Nakamura, N. 1974: Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 38, 757–775.
- Nicholls, I. A. & Ringwood, A. E. 1973: Effect of water on olivine stability in tholeiites and the production of silica-saturated magmas in the island-arc environment. *J. Geol.* 81, 285–300.
- Oftedal, Chr. 1968: Greenstone volcanoes in the Central Norwegian Caledonides. *Geol. Rdsch.* 57, 920–930.
- Pearce, J. A. & Cann, J. R. 1973: Tectonic setting of basic volcanic igneous rocks determined using trace elements analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.* 19, 290–300.
- Ringwood, A. E. 1975: *Composition and petrology of the earth's mantle*, McGraw Hill, New York.
- Ringwood, A. E. 1977: Petrogenesis in island arc systems, 311–324. In Talwani, M. & Pitman III, W. C. (eds.) Island arcs, deep sea trenches and back-arc basins. *Maurice Ewing Ser. 1, Amer. Geophys. Union*. Washington D. C.
- Roberts, D. 1980: Petrochemistry and paleogeographic setting of the Ordovician volcanic rocks of Smøla, Central Norway. *Nor. Geol. Unders.* 359.
- Ryan, P. D., Williams, D. M. & Skevington, D. 1979: A revised interpretation of the Ordovician stratigraphy of Sør Trøndelag, and its implications for the evolution of the Scandinavian Caledonides. *Proc. I. G. C. P. Meeting 'The Caledonides in the U.S.A.'*, Blacksburg, Virginia, 99–105.
- Schilling, J. 1971: Sea-floor evolution: Rare earth evidence. *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 268 A, 663–706.
- Tarney, J., Saunders, A. D., Weaver, S. D., Donnellan, N. C. & Hendry, G. L. 1979: Minor-element geochemistry of basalts from LEG 49, North Atlantic Ocean. *Init. Rep. DSDP* 49, 657–691.
- Vogt, Th. 1945: The geology of part of the Hølanda-Horg district, a type area in the Trondheim Region. *Nor. Geol. Tidsskr.* 25, 449–527.
- Wager, L. R. & Deer, W. A. 1939: Geological investigations in East Greenland, Part III. The petrology of the Skaergaard intrusion, Kangerlugssaq, East Greenland. *Medd. Grønland* 105, 1–352.
- Wolff, F. C. 1977: Geologisk kart over Norge, berggrunnskart Trondheim 1:250 000. *Nor. Geol. Unders.* Trondheim, 2. opplag med rettinger.
- Wood, D. A., Tarney, J., Varet, J., Saunders, A. D., Bougault, H., Joron, J. L., Treuil, M. & Cann, J. R. 1979: Geochemistry of basalts drilled in the North Atlantic by IPOD LEG 49: Implications for mantle heterogeneity. *Earth Planet. Sci. Lett.* 42, 77–97.