

Rapakivis - anorogene Magmatite des Fennoskandischen Schildes

(A. P. Meyer)

Im Jahre 1891 veröffentlichte J. J. Sederholm - ein Schüler des bekannten Harry Rosenbusch in Heidelberg und der erste Direktor der Finnischen geologischen Landesanstalt (Geologinen tutkimuskeskus) - eine Untersuchung zu den Rapakivigesteinen. Diese erste umfassende Abhandlung erschien in der Fachzeitschrift „Tschermak's Mineralogische und Petrographische Mitteilungen“ (Band 12) unter dem Titel „Über die finnländischen Rapakivigesteine“.

In diesem grundlegenden und bahnbrechenden Aufsatz beschreibt er die räumliche Verteilung, die Art des Auftretens, die Petrographie und den Chemismus der finnischen Rapakivigesteine. Darüber hinaus unterschied er die Begriffe Rapakivigranit und Rapakivistruktur und legte dar, dass diese Gesteine eine magmatische Abfolge mit sowohl intrusiven als auch extrusiven Kennzeichnungen bilden.

Sederholm definierte den Begriff „Rapakivistruktur“ nach folgenden Faktoren: Die Alkalifeldspäte weisen eine ovale Form auf. Diese Ovoide sind von Oligoklas-Andesin-Hüllen mit gewöhnlich 1 bis 3 cm Dicke ummantelt. Einige Feldspatovoide können aber auch ohne Ummantelung vorkommen. Überall im Gestein finden sich zwei Generationen von Alkalifeldspat und Quarz. Wenn in einem Gestein die Häufigkeit der ummantelten Ovoide die der nicht ummantelten übertrifft, ergibt sich die typische Rapakivi- bzw. Wiborgitstruktur. Überwiegen die ummantelungsfreien Kalifeldspatovoide, spricht man von einer pyterlitischen Struktur. Jedoch weisen alle finnischen Rapakivivorkommen auch gleichkörnige Spielarten auf, in welchen in der Regel idiomorpher oder tropfenförmiger Quarz das Bestimmungsmerkmal ist.

Der finnische Begriff „rapa kivi“, den erstmals der schwedische Gelehrte Urban Hjärne im Jahre 1694 benutzte, bedeutet wortwörtlich „zerfallenes, verwittertes Gestein“.

In Schweden publizierte bereits im Jahre 1893 A. G. Högbom recht eingehend über die Gesteine des Ragunda-Massivs und lenkte das Interesse auf die Ähnlichkeit der Gesteinsvorkommen von Ragunda, Rödö und Nordingrå in Schweden mit den Rapakivigesteinen in Finnland. Daneben erreichte die geologische Fachwelt die Nachricht, dass sich auch in der Ukraine Rapakivigesteine finden.

Sederholm's Arbeit wurde nach seinem Tod von anderen Geologen fortgeführt und erweitert (u. a. von Walter Wahl, Penttii Eskola, Victor Hackman, Th. G. Sahama, Anti Savolahti, Atso Vormaa). Eine Neukartierung Finnlands im Maßstab 1:100 000, die in den 1950er Jahren eingeleitet wurde, ist für die Gebiete mit Rapakivi-Vorkommen so gut wie abgeschlossen. Auf den betreffenden geologischen Karten werden verschiedene Gesteinstypen unterschieden, die der Rapakivi-Reihe zuzuordnen sind.

Folgende Bezeichnungen sind in Gebrauch:

Wiborgit: Der typische Rapakivi, d. h. es handelt sich um Hornblendegranit, dessen Kalifeldspat-Einsprenglinge eine ovale Form haben, welche mit Plagioklas ummantelt sind.

Pyterlit: Ein porphyrischer Biotitgranit mit oval ausgebildeten Kalifeldspat-Einsprenglingen, die frei von Plagioklashüllen sind.

Porphyrischer Rapakivi: Ein Biotitgranit mit eigengestaltigen Einsprenglingen.

Tirilit: Ein Fayalit führender, dunkler, gleichkörniger Hornblendegranit mittlerer Grobkörnigkeit.

Gleichkörniger Rapakivi: Im Allgemeinen sind es gleichkörnige Biotitgranite.

Diesen Gesteinen gesellen sich porphyrischer Aplit, Granitporphyr, Quarzporphyr sowie Pegmatit und Aplit hinzu.

Die geologische Neukartierung Finnlands und die Fortschritte, die mit der Entwicklung und dem Einsatz radiometrischer Altersbestimmungen verbunden sind, führten in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts zu einer intensiven Forschungsaktivität am Rapakivi-Problem. Hinzu kam, dass in den 1960er Jahren die Geowissenschaften eine grundlegende Revolution erlebten, denn am Ende dieses Jahrzehnts konnte die im Jahre 1910 von dem Berliner Alfred Wegener beim Betrachten der Weltkarte spontan entwickelte Theorie der Kontinentalverschiebung in den Rahmen der Plattentektonik eingefügt werden, die dadurch endlich weltweite Anerkennung fand. Damit wurde auch die Grundlage zur Theorie anorogener Granite geschaffen, die die Voraussetzung zur Erklärung der Rapakivistruktur ist.

Seit Sederholm's Tagen hatten viele Exkursionen die verschiedenen Rapakivi-Vorkommen Finnlands zum Ziel. Hier seien nur einige Geologische Führer angeführt, die für den geowissenschaftlich Interessierten in der norddeutschen Tiefebene von Bedeutung sein können: Es sind die beiden Aufsätze von Fritz Mende, die eine gute Auflistung von Rapakivigesteinen Südwestfinnlands enthalten, die Geologischen Exkursionsführer C 28, C 30 und C 36, die anlässlich des 21. Internationalen Geologischen Kongresses 1960 publiziert wurden - sowie der geologische Führer für den Schären Garten Åland – Åboland, der 1979 vom Geologisch-mineralogischen Institut der Åbo Akademie an die Teilnehmer der in jenem Jahre stattgefundenen Exkursion ausgehändigt wurde. IM Rahmen des „Internationalen Geologischen Korrelationsprogramms (IGCP), Projekt 247“ veranstaltete die Universität Helsinki im August 1989 das Symposium „Präkambrische Granitoide, Petrogenese, Geochemie und Metallogenese“, in dessen Ablauf zwei Exkursionen eingefügt waren. Die Exkursion A1 befasste sich mit den „Rapakivigraniten und postorogenen Graniten von SW-Finnland“, die Exkursion A2 hingegen mit dem „Wiborg-Rapakivi-Batholith und seinen zugehörigen Gesteinen in SE-Finnland“. Beide Studienfahrten lassen sich mit den Geologischen Führern 27 bzw. 30, die 1989 von der Finnischen Geologischen Landesanstalt veröffentlicht wurden, auch heutzutage nachvollziehen.

Die Publikation des wegweisenden Rapakivi-Aufsatzes von Sederholm jährte sich 1991 zum hundertsten Mal. Deshalb lag es nahe, dieses Jubiläum mit einem Antrag für ein neues Untersuchungsprojekt an Rapakivigranite zu verbinden, denn inzwischen gab es Kenntnis von einer großen Anzahl kaum bekannter Rapakivigranit-Komplexe in Ländern der Dritten Welt, deren Wissenschaftler in die internationale Zusammenarbeit einbezogen und deren Teilnahme unterstützt werden sollte. Dieser Antrag wurde im Februar 1991 vom Komitee des IGCP in Paris unter der Zielsetzung „Korrelierung von Rapakivigraniten und zugehörigen Gesteinen im globalen Ausmaß“ als neues Projekt 315 genehmigt. Noch im gleichen Jahr kam es im Juli zum ersten Symposium für dieses Forschungsunternehmen, an welchem sich 65 Wissenschaftler aus 14 Ländern beteiligten. Fast alle auf dieser Tagung gehaltenen Vorträge erschienen 1991 in Form von Referaten (53 Kurzaufsätze von 85 Autoren) als Zusammenfassung Bei der Finnischen Geologischen Landesanstalt (geol. Führer 34). In den Jahren von 1991 bis 1996 wurden für das Projekt 315 sieben internationale Symposien Und sechs Geländeexkursionen in geologischen Schlüsselgebieten veranstaltet, an welchen sich Forscher aus mehr als 20 Ländern beteiligten. In Zusammenhang mit dem 7. Internationalen Symposium über Rapakivigranite erfolgte die Veröffentlichung eines geologischen Führers für schwedische Rapakivigesteine, der bereits während der Tagung ausverkauft war. Dank eines großzügigen Angebotes der Schwedischen Geologischen Landesanstalt (SGU) war es möglich, diesen Führer in weitaus größerer Auflage nachzudrucken (Ahl et al. „Rapakivigranite und verwandte Gesteine in Mittelschweden“, SGU Ca 87, 1997). Dieser Forschungsbericht sei dem interessierten Freund kristalliner Geschiebe nachdrücklich empfohlen!

Im 95. Band der Fachzeitschrift „Precambrian research“ fassen 1999 Haapala und Rämö in einem Einleitungskapitel die Fortschritte der letzten, der siebenten Tagung des Internationalen Geologischen Korrelationsprogramms zusammen. In demselben wird auf den durch das Projekt 315 in sechs Jahren erreichten Fortschritt hingewiesen, denn die Hauptthemen dieses Vorhabens umfassten die räumliche und zeitliche Verteilung der Rapakivigranite, ihren tektonischen Rahmen und den Mechanismus der Platznahme, ihr Verhältnis zur Krustenentwicklung, den bimodalen Charakter des Magnetismus, die petrographischen und geochemischen Kennzeichnungen, ferner die Metallogene und Petrogene sowie die physikalischen Kristallisationsbedingungen und die Entstehung der Rapakivistruktur.

Die Rapakivigranite befinden sich nicht nur auf dem Fennoskandischen Schild, sondern auch in Süd-Grönland und Labrador, im Mittleren Westen und im Westen der USA, in Venezuela, Brasilien, Botswana und auf weiteren präkambrischen Schilden. Ihre Ausbildung erstreckt sich über mehrere magmatische Zeitabschnitte vom späten Archaikum bis hin zum Tertiär, wobei der produktivste Magmatismus in die Zeitspanne zwischen 1,8 und 1,0 Ga fiel, d. h. dass die Rapakivigranite eindeutig nicht auf ein einzelnes Rapakivi-Ereignis zurückzuführen sind.

Das 1995 als ältestes Rapakivivorkommen bezeichnete findet sich bei Moiovaara im östlichen Mittelfinnland. Es durchsetzt spätarchaische granitische Gesteine (2,7 bis 2,8 Ga) und hat ein U/Pb – Alter von 2338 ± 14 beziehungsweise 2435 ± 12 Ma. Ein Rb/Sr – Alter ergab den Alterswert von 2240 ± 110 Ma. Das jüngste Rapakivivorkommen, mit einem Alter von 10 Ma, befindet sich in der Basin and Range Provinz im Bundesstaat Nevada der USA.

Haapala und Rämö wiesen auch auf das Verhältnis des Rapakivimagmatismus zu orogenen Prozessen hin, das in drei Hauptgruppen unterteilt werden kann:

1. Ansammlung mafischer Magmen unterhalb der Krustenbasis einschließlich Krustenaufschmelzung durch diese vom Oberen Mantel abgeleiteten mafischen Magmen.
2. Aufschmelzung eines verdickten orogenen Krustenabschnitts.
3. Intrakratonischer Magmatismus in Verbindung mit Orogenen an Kratonrändern.

In diesem Modell der „mafischen Unterplatte“ kann die selektive Aufschmelzung der Gesteine des Oberen Mantels mit aktiver oder passiver Riftung, dem Zerfall eines Orogens durch Dehnung, Diapirismus des Unteren Mantels oder Instabilitäten im Erdmantel in Bezug zu Plattenbewegungen verknüpft sein. Die Herkunft der Wärme, die für derart umfangreiche Aufschmelzungsprozesse benötigt wird, ist im großen und ganzen noch unbekannt. Die tektonischen Rahmenbedingungen aber, der bimodale Magmatismus, die Geochemie sowie die Isotopengeologie der Rapakivigranite können am besten durch das Modell der „mafischen Unterplatte“ erklärt werden. Möglicherweise lässt sich das Aktualitätsprinzip auf die Untersuchung der Entstehung des Rapakivi-Magmatismus anwenden. Während in Fennoskandien die mesoproterozoischen Rapakivikomplexe gewöhnlich nachfolgenden tektonischen Störungen und einer tiefgreifenden Erosion unterlagen, können die rapakiviartigen Granite der Basin and Range Provinz im Südwesten der USA - die mit einer extremen Dehnung im mittleren Miozän verbunden sind und ähnliche Gefügemerkmale und magmatische Vergesellschaftungen wie die fennoskandischen Rapakivi aufweisen - von Nutzen sein, um den geologischen Entstehungsbereich und die Ausbildung der präkambrischen Rapakivivorkommen zu interpretieren.

Die Rapakivistruktur, d.h. die großen Alkalifeldspäte mit ihren Plagioklashüllen, stellte sehr lange eine enorme Herausforderung für die Petrographen dar. Sederholm bekannte noch 1928: "Jedoch bin ich mir völlig der Tatsache bewusst, dass das Problem der Erstarrung der Magmatite (Rapakivi) kompliziert ist und nur von einem Standpunkt aus nicht gelöst werden kann." In den nachfolgenden Jahrzehnten gelang

es den Petrologen, in kleinen Schritten zum heutigen Kenntnisstand beizutragen, von denen drei kurz herausgehoben werden sollen. Edelman hat 1965 in seinem Aufsatz "Ein geotektonisches Modell der Svekofennidischen Orogenese" die Aufmerksamkeit auf den zeitgleichen mafisch-felsischen Magmatismus gelenkt, der während der Svekofennidischen Orogenese auf dem Fennoskandischen Schild im Proterozoikum ablief. In diesem Modell gingen die beiden gegensätzlichen Magmen aus einer Teilaufschmelzung im Kontaktbereich von Unterkruste und Oberstem Mantel hervor. Edelman erkannte also die Bedeutung des zeitgleichen mafisch-felsischen Magmatismus. Nach ihm hat dann im Jahre 1981 Hibbard in seinem Beitrag "Entstehung ummantelter Feldspäte durch vollständige Magmavermischung" dargelegt, dass viele Vorkommen kalkalkalischer Plutonite mit ummantelten Feldspäten durch eine vollständige Vermischung von felsischen mit mafischen Magmen entstehen können. Schließlich beschrieb Nekvasil 1991 den "Aufstieg von felsischen Magmen und die Entstehung von Rapakivi."

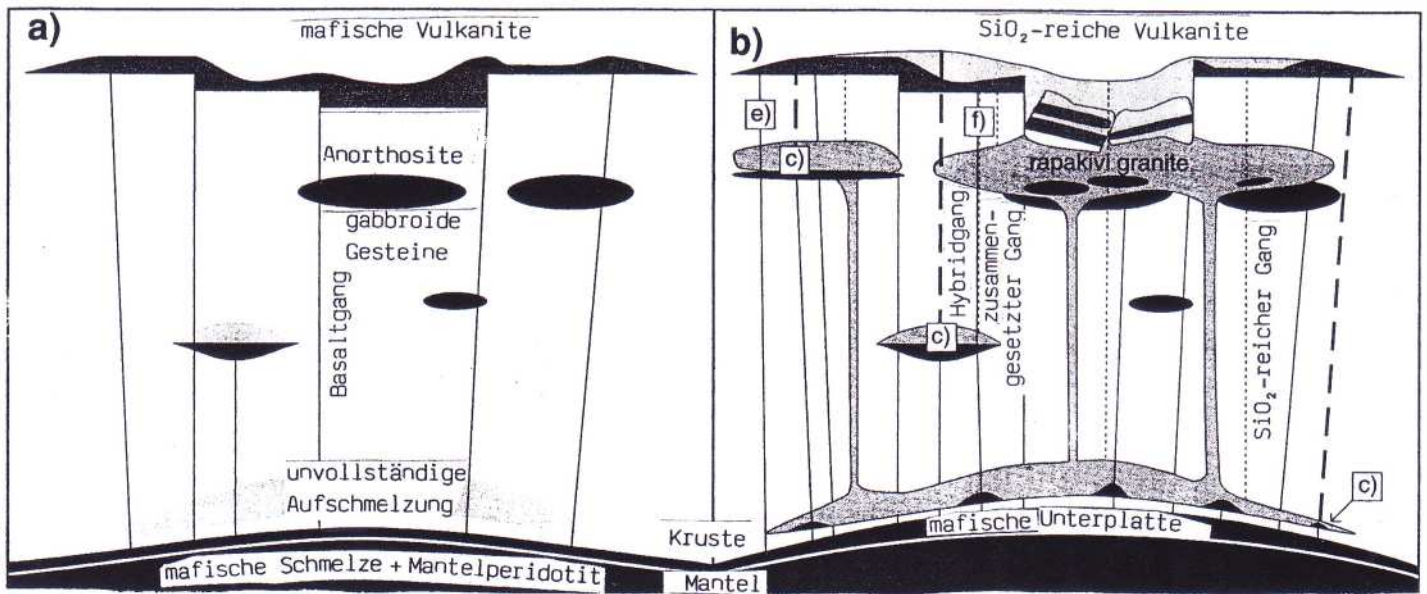
Haapala und Rämö gelangten am Ende ihres Einleitungskapitels zu folgenden Rückschlüssen: Zur Entstehung der ummantelten ovoiden Alkalifeldspateinsprenglinge sind wahrscheinlich Veränderungen der physikochemischen Bedingungen (Temperatur, Druck, Magmazusammensetzung) erforderlich, welche Plagioklas auf Kosten von Alkalifeldspat stabilisieren und eine Plagioklaskeimbildung auf den Alkalifeldspatkristallen gestatten. Experimentelle Untersuchungen und petrographische Beobachtungen weisen auf zwei außerordentlich realistische Mechanismen bei der Entstehung der Rapakivistruktur hin:

1. Vollständige Vermischung zweier Magmen unterschiedlicher Zusammensetzung (Hibbard,1981; Wark und Stimac,1992) und
2. Kristallisation einer Granitschmelze unter Bedingungen einer starken Druckentlastung in Verbindung mit einer geringen Temperaturminderung (Nekvasil,1991).

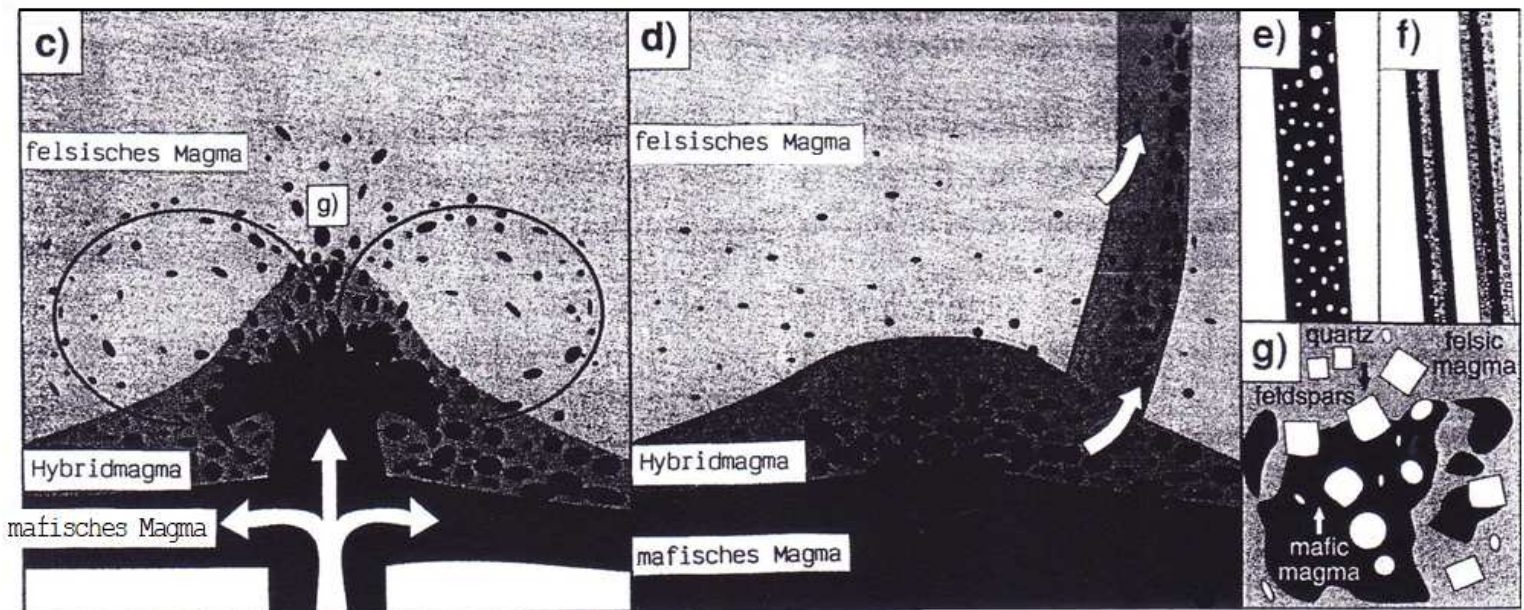
Dann gaben sie der Auffassung Ausdruck, dass die Kennzeichnung der Rapakivigranite als Granite vom A-Typ den geotektonischen Rahmen und die Entstehung der Magmen wiedergibt, während die Rapakivistruktur die Kristallisationsbedingungen widerspiegelt. Schließlich verwiesen sie auf den Beitrag von Eklund und Shebanov (1999) zum IGCP-Projekt 315, die sich in demselben eingehend mit den physikochemischen Bildungsparametern der Rapakivigranite in SE-Fennoskandien befassen und dabei die Wirkungsweise der Kristallisation einer Granitschmelze unter Bedingungen einer ausgeprägten Druckentlastung bei sehr flachem Temperaturgradienten bestätigen.

Des besseren Verständnisses wegen sei an dieser Stelle kurz das Granitproblem angesprochen, das bis in die zweite Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts hinein die Fachwelt in Unruhe hielt. Mehnert (1987) hat in seinem Aufsatz "50 Jahre Granitforschung" die Entwicklung des Granitproblems im zwanzigsten Jahrhundert aus seiner Sicht geschildert und Pitcher (1997) berichtete in seinem Buch "Beschaffenheit und Entstehung von Granit" umfassend darüber. Pekka Salonsaari's Dissertation "Hybridisierung im subvulkanischen Jaalaiitti- Komplex und ihr petrogenetisches Verhältnis zu Rapakivigraniten und assoziierten mafischen Gesteinen in SE-Finnland" (1995) entstammt das nachfolgende Schema zur Entstehung der Rapakivigranite und die Hybridisierung mit einem gleichzeitig vorhandenen mafischen Magma. Wichtig sind die zu a) und b) dargelegten Abläufe der Ansammlung mafischen Magmas aus dem obersten Mantel und die dadurch bedingte spätere Aufschmelzung der Unterkruste. Beide Magmen entstanden annähernd zur gleichen Zeit, sie sind aber nicht komagmatisch. Die gelegentlich von Transformisten vorgetragene Idee der Rapakivientstehung durch Metasomatose wird nicht mehr vertreten, sie ist endgültig überholt.

Die Abbildungen a und b sind nach Huppert und Sparks (1988) sowie Rämö und Haapala (1991) abgeändert (aus Salonsaari,1995).



- a) Unterhalb der Krustenbasis wird durch aufströmendes mafisches Magma, das sich vom oberen Mantel herleitet, eine mafische Magmaschicht (mafische Unterplatte) ausgebildet und in höher gelegene Krustenhorizonte injiziert. Das führt zur Ausbildung von gabbroiden und anorthositischen Gesteinen, Basaltgängen und mafischen Vulkaniten (Haapala,1989; Rämö und Haapala, 1991).
- b) Die mafische Magmaschicht bewirkt eine Teilaufschmelzung der Unterkruste (Rämö,1991), wobei es zur Entstehung SiO₂-reicher Sekundärmagmen kommt, die nach oben in die Kruste injiziert werden und Rapakivigranit-Komplexe ausbilden. Dies vollzieht sich in Begleitung von Caldera-Absenkung sowie der Bildung von sauren sauren Ganggesteinen (Quarzfeldspatporphyr) und Vulkaniten.



- c) Mehrfach wiederkehrende Injektionen von mafischem Magma felsischen Magmakammern (unter b sind in Frage kommende Bereiche angeführt) führen im felsischen Teil der Magmakammer eine Konvektion herbei, durch die mafisches Magma in ellipsoiden Körpern verbreitet wird.

Wenn das thermische Gleichgewicht erreicht ist, erzeugt der chemische Stoffausgleich eine geschichtete Abfolge von Hybridmagmen, welche in Bruchzonen hochgeführt werden.

- c) Die Injektion von mafischem Magma durch ein teilweise kristallisiertes Rapakivigranit-Magma führt zur Bildung von zusammengesetzten Gängen unter Beimengung von Einsprenglingen.
- d) Wenn ein Rapakivigranit-Magma und ein Basaltmagma gleichen Alters in höher gelegene Krustenhorizonte injiziert werden, entstehen ebenfalls zusammengesetzte Gänge mit beigemengten Einsprenglingen.
- e) Vergrößerung des Bereiches g) in Abb. c. Dargestellt ist das Einfangen großer Alkalifeldspateinsprenglinge des felsischen Magmas durch das mafische Magma und das spätere Abrunden der Einsprenglinge in letzterem.

Die Ausbildung der Rapakivistruktur

In ihrem Aufsatz "Die Entstehung der Rapakivistruktur unter annähernd isothermischer Druckentlastung" führen Eklund und Shebanov bereits in der Einleitung mehrere Hypothesen hinsichtlich der Entstehung der Rapakivistruktur an. Zuerst stellen sie die Folgerungen von Rämö und Haapala (1995) vor, dass Rapakivistrukturen aus mehreren Prozessen hervorgehen können, dass aber eine Ausdehnung des Stabilitätsfeldes von Plagioklas zu Lasten von Kalifeldspat und Quarz zur Ausbildung der Struktur erforderlich ist, wobei die Zunahme der Plagioklas-Stabilität auf physikalische Bedingungen und/oder veränderte Zusammensetzung des Magmas zurückzuführen ist. Dann gehen sie auf Stimac und Wark (1992) ein, die für die Rapakivistruktur ein Modell vollständiger Magma-Vermengung konstruierten, das auf Untersuchungen von natürlichen Mineralen in Verbindung mit Laboruntersuchungen beruht, und folgerten, dass die Struktur durch eine vollständige Vermengung von Magmen mit leicht unterschiedlichen Zusammensetzungen ausgebildet wurde. Anschließend weisen sie auf Dempster u. a. (1991,1994) hin, welche vortrugen, dass die Rapakivistruktur durch Entmischung und Diffusion von Komponenten im Inneren von Kalifeldspat entstand, in welche die Plagioklaskomponente zum Saum des Ovoids diffundierte, während die Orthoklaskomponente im Kern konzentriert wurde. Zuletzt zitieren sie Nekvasil (1991), dass die Rapakivistruktur eher eine Folge von Veränderungen der physikalische Bedingungen als Veränderungen der Zusammensetzung sein kann. Diese Annahme wird durch Stabilitätsberechnungen im Q-Or-Ab- Diagramm für sieben Rapakivi-intrusionen untermauert. Eklund und Shebanov stimmten den Vorstellungen von Stimac und Wark uneingeschränkt zu. Letztere beschrieben 1992 die Entstehung von oligoklasummantelten Sanidinkernen in den Daziten der Clear Lake Intrusion in Kalifornien, welche sie auf eine vollständige Vermengung eines basaltisch-andesitischen mit einem granitischen Magma zurückführten. Sie betonten, dass je mafischer das sich ergebende Magma war, desto stärker die Sanidineinsprenglinge durch Aufschmelzung gerundet und die Plagioklassäume entwickelt waren. Eine weitere typische Struktur vollständiger Magmavermengung im gleichen Gestein stellen die mit Augit ummantelten Quarzkörner dar. Hinsichtlich der Temperaturen weisen die Autoren auf etwa 750°C für das durch vollständige Vermengung entstandene Magma und etwa 950°C für das intrudierende basaltisch-andesitische Magma hin. Es war ihnen möglich (Wark und Stimac, 1992), experimentell durch eine vollständige Magmavermengung teilweise aufgeschmolzene Sanidine mit Plagioklasmänteln zu erzeugen! Diesen Autoren gelang es, ihre theoretischen Modellvorstellungen mit einer beeindruckenden Beweisführung zu untermauern.

In der Regel sind Rapakivigranite mit gleichaltrigen mafischen Gesteinen vergesellschaftet, deren mafische Magmen der Zusammensetzung nach gabbroid bis monzodioritisch und höher temperiert sind als die Rapakivimagmen (z. B. werden die Initialtemperaturen für die mit Anorthosit verknüpften basischen Magmen in SW-Finnland mit > 1100°C bestimmt (Shebanov und Eklund,1997). Die Wechselwirkung zwischen den Magmen der Rapakivigranite und den mit ihnen vergesellschafteten mafischen Magmen erfolgt meistens in Form einer unvollständigen Vermengung von Kristallen und Schmelze in

Zufuhrkanälen, in denen Einsprenglinge des granitischen Magmas vom mafischen Magma eingeschlossen werden und Einsprenglinge des mafischen Magmas in das granitische Magma hinüberwechseln können (Rämö, 1991; Lindberg und Eklund, 1992; Eklund 1993; Salonsaari, 1995). Andersson und Eklund (1994) erwähnten, dass sich felsische Xenokristen des SiO₂-reichen Magmas vollständig auflösen, wenn sie hinreichend lange in manchen Magmapartien verweilen.

Eklund u. a. (1994) untersuchten ein hybrides Gestein der Rapakivireihe mit einer angenommenen Zusammensetzung von 15% Fe-reichem monzodioritischem und 85% rapakivigranitischen Magma. Dieses Gestein führt strukturell nur stark aufgelöste Kalifeldspatovoidreste (Größe der übrig gebliebenen Ovoide <1cm) während die Quarzeinsprenglinge gut der Resorption widerstanden. Alle Quarzkörner sind mit Amphibol ummantelt, d. h. hier haben wir es mit der typischen Struktur einer vollständigen Magmavermischung zu tun (Sato, 1975; Hibbard, 1991 und 1995; Stimac und Wark, 1992). Diese Rapakivispielart ist noch immer granitisch (SiO₂-Gehalt rund 68%), hat aber ihre Kalifeldspatovoide infolge einer Aufschmelzung verloren, die auf ein Zusammenspiel von Druckentlastung und Wärmezufuhr aus dem mafischen Magma zurückzuführen ist.

Dies weist darauf hin, dass vor einer vollständigen Magmavermischung vor allem ein mafisches Magma mit chemischen und physikalischen Eigenschaften benötigt wird, das lediglich eine geringe Aufschmelzung von Kalifeldspat und Quarz sowie die gleichzeitige Ausscheidung von saurem Plagioklas bewirkt. Ein in solch einem System vollständiger Magmavermischung erzeugter hybrider Rapakivigranit sollte keine anderen Anzeichen magmatischer Vermischung enthalten, weder strukturelle - z. B. mit mafischen Mineralen ummantelte Quarzkörner - noch chemische, da sich die Rapakivistruktur auch in sehr felsischen Granitarten findet.

Dempster u. a. (1994) untersuchten zwei große Feldspatovoide mit Plagioklasummantelung aus dem Wiborg-Batholith. Sie stellten in dem Plagioklasmantel einen leicht erhöhten radiogenen Sr-Gehalt im Vergleich zum Kalifeldspat fest. Daraufhin gelangten sie zu der Auffassung, dass die Plagioklas Komponente ein relativ spätes Entmischungsprodukt des Kalifeldspats sei. Eklund und Shebanov konnten diese Interpretation mit einer Beobachtung aus der zusammengesetzten Intrusion von Hammarudda/Åland in Abrede stellen. Sie diskutierten von dieser Örtlichkeit einen Åland-Quarzporphyr mit einem mafischen magmatischen Einschluss, dessen äußere Hybridzone große plagioklasummantelte Kalifeldspatovoide mit einem Durchmesser von bis zu 2 cm enthält, während die Kalifeldspatovoide im einschließenden Quarzfeldspatporphyr einen Durchmesser von nur etwa 1cm aufweisen. Dies wird als Nachweis einer Resorption der Feldspatkristalle während des Magmaaufstiegs in Betracht gezogen. Die Feldspatovoide in der Hybridzone werden dagegen als Kristalle gedeutet, welche vom mafischen Einschluss eingefangen und in ihm "eingefroren" wurden. Auf diese Art und Weise waren sie vor einer Aufschmelzung während des Magmaaufstiegs geschützt. Nach Schätzungen fand das Einfangen unter einem Druck von etwa 3 kbar statt, während der einschließende Åland-Quarzporphyr bei 1kba kristallisierte. Dies bedeutet, dass sich die Umhüllung der Kalifeldspatovoide in Tiefenlagen von mehr als/oder 3 kbar in der Magmenkammer entwickelte. Dagegen setzte sich die Auflösung von Quarz und Kalifeldspat sowie die Ausscheidung von Plagioklas bis in den Horizont der Platznahme (1 kbar) hinein fort. Nach den verfügbaren thermometrischen Ergebnissen lief

der Resorptions-Ummantelungs-Prozess unter magmatischen Temperaturen (T=760 bis 780 °C) ab, nicht aber unter den relativ niedrigen Temperaturen einer von Dempster u. a. angenommenen Entmischung des Kalifeldspats.

Abb. 3 aus Eklund und Shebanov (1999, S. 139)
(Erklärung siehe unten)

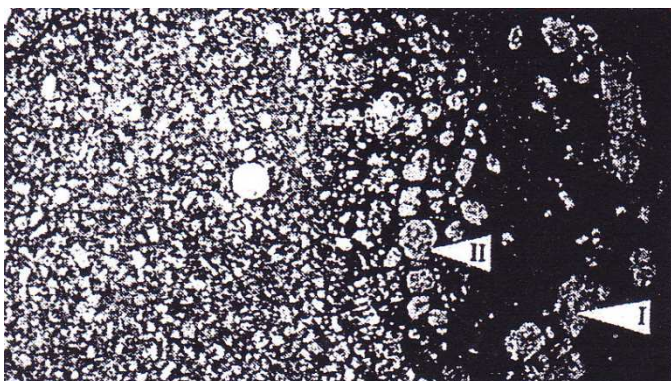


Photo einer mafisch - SiO_2 reichen Wechselwirkung in der zusammengesetzten Intrusion von Hammarudda. Auf der linken Seite befindet sich der Quarzfeldspatporphyr. Die großen Kalifeldspateinsprenglinge haben einen Durchmesser von ca. 1 cm. Diese Anschnittfläche entspricht einem subvulkanischen Niveau (1kbar). Auf der rechten Bildseite erscheint ein mafischer magmatischer Einschluss von monzodioritischer Zusammensetzung, der große Labradoritkristalle führt (I). Die Bildmitte stellt eine Hybridzone dar, welche eingekapselte große Kalifeldspäte mit einem Durchmesser von 2 cm enthält (II). Diese wurden in dem Einschluss bei einem Druck von rund 3 kbar eingekapselt und „eingefroren“, sie repräsentieren deshalb die Größe der Kalifeldspateinsprenglinge in einem Krustenhorizont von >3 kbar. Offenbar wurden die Kalifeldspateinsprenglinge während des Magmaaufstiegs von 3 auf 1 kbar im felsischen Wirtsgestein resorbiert.

Gemäß der isothermischen Druckentlastung von Nekvasil, die 1991 für sieben Rapakivigranittypen die Kristallisationspfade von 8 bis 1 kbar bestimmte und folgerte, dass eine Rapakivistruktur ausgebildet werden kann, wenn die magmatischen Systeme folgenden Kriterien entsprechen:

1. Sie dürfen während des Aufstiegs nicht mit leichtflüchtigen Bestandteile gesättigt sein
2. Während des Magmaaufstiegs liegt der Abkühlungsgrad zwischen 5 und $10^\circ\text{C}/\text{k bar}$, d. h. es überwiegen Bedingungen für einen annähernd isothermischen Aufstieg.

Jedoch nahm Nekvasil einen vollständig aufgeschmolzenen Rapakivi an, der, vor dem Beginn des annähernd isothermischen Aufstiegs in erdoberflächennahen Horizonten, bei 5 k bar mit Quarz, Kalifeldspat und An-reichem Plagioklas gesättigt sein sollte. Eklund und Shebanov fanden aber bei ihrer Untersuchung der Kernzonen von Kalifeldspat- und Quarzeinsprenglingen keine eingeschlossenen Mineralvergesellschaftungen, welche auf eine Kristallisation bei Liquidustemperatur ($T > 950^\circ\text{C}$ bei 5 k bar) hinweisen, und bis jetzt wurden für Rapakivigranite keine Bildungstemperaturen von $>790^\circ\text{C}$ bekannt. Ein weiterer Grund, der gegen Schmelzbedingungen in Nähe der Liquiduskurve spricht, ist die Anwesenheit von Annit (Fe-reiches Biotit-Mischkristallendglied), der in den Kernen von Feldspatovoiden und Quarzeinsprenglingen eingeschlossen ist. Dieser Fe-reiche Biotit zerfällt bei Temperaturen $>850^\circ\text{C}$ und sein Stabilitätsfeld verringert sich, wenn Feldspat und/oder Quarz mit Glimmer koexistieren. Zusätzlich bewahren Kernzonen von Feldspatovoiden und Quarzeinsprenglingen manchmal Paragenesen, die einer Ausgangstemperatur $T_0 < 700^\circ\text{C}$ entsprechen. Ein Granitmagma mit einem Gehalt an fluiden Bestandteilen von ca. 1 Gewichtsprozent H_2O ; 0,17 Gew.% F und 0,1 Gew.% CO_2 würde unter einem Druck von 5 k bar bei dieser Temperatur nur etwa 20% Schmelze enthalten. Nach rheologischen Modellen bedeutet dies, dass das Magma bewegungsunfähig sein dürfte. In den Phasenbedingungen für das Granitsystem (vereinfacht nach Shkodzinsky, 1985) wird auf diesen Vorgang weiter unten genauer eingegangen.

Eklund und Shebanov (1999, Abb.5) veröffentlichten ein Phasenzustandsdiagramm für ein subeutektisches Granitsystem, in welches thermobarometrische Ergebnisse für Kalifeldspatovoide führende Rapakivigranite eingetragen sind. In diese Diagramm stimmt der gefolgerte Magmapfad gut mit den letzten Entwicklungsstufen (annähernd isothermische Druckentlastung, beginnend bei 5 k bar und 780°C und endend bei etwa 2 k bar und 760°C) in den Berechnungen von Nekvasil (1991) überein. Nekvasil (1991) berechnete diesen Pfad unter Verwendung der Gesamtzusammensetzungen von sieben Rapakivigraniten und führte aus, dass dieser Pfad alle Kennzeichen der Rapakivistruktur erzeugt. Sie wies auch darauf hin, dass "wenn in einer dieser Zusammensetzungen etwas kristallines Material restitisch ist, dann ist, solange sich dasselbe im Gleichgewicht mit einer Schmelze befand, der berechnete Pfad der Gesamtzusammensetzung dennoch gültig."

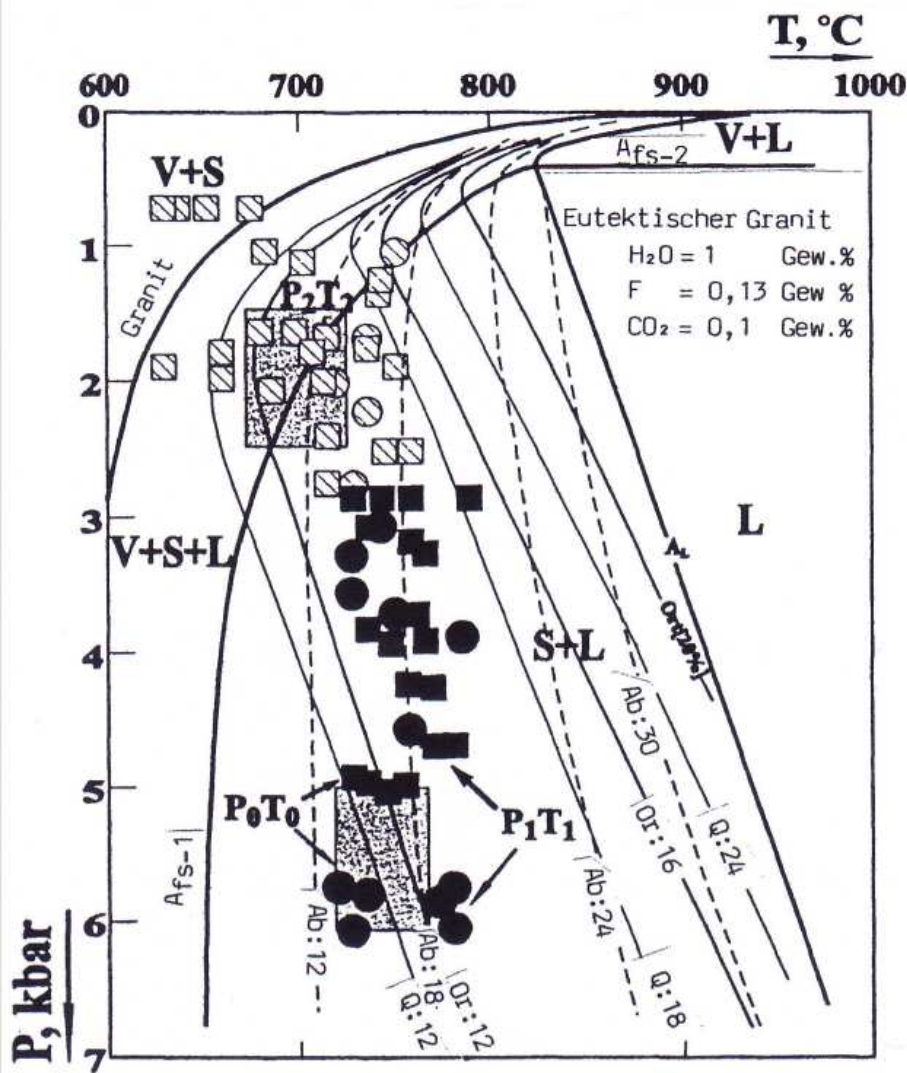


Abb. 4 aus Eklund und Shebanov (1999, S. 133).

Thermobarometrische Ergebnisse für Kalifeldspatovoide führende Rapakivi-granite der Batholithe von Wiborg (punktierte Felder) und Salmi

Salmi (○, ●) und

Åland (□, ■),

die in ein Phasenzustandsdiagramm für ein subeutektisches Granitsystem eingetragen sind, welches 1 Gew.% H₂O, 0,3 Gew.% F und 0,1 Gew.% CO₂ enthält. Das Diagramm ist nach Shkodzinsky (1985) vereinfacht. Die P,T-Ergebnisse erarbeiteten Shebanov (1994), Shebanov und Eklund (1997) und Shebanov (nicht veröffentlichte Daten). Drei allgemeine Gruppen von P,T-Ergebnisse lassen sich unterscheiden. P₀T₀ und P₁T₁ wurden für die Mineraleinschlüsse der ersten Mineralvergesellschaftung (in aufgenommenen Fragmenten) und Kernbereichen von Kalifeldspatovoiden

und P₂T₂ für die zweite Mineralvergesellschaftung in mittleren und randlichen Zonen der Kalifeldspatovoide und in der Grundmasse erzielt. Die gefüllten Symbole stellen Ergebnisse für Einschlüsse in den Kernbereichen von Kalifeldspatovoiden und Quarzeinsprenglingen dar. Die schraffierten Symbole geben die Ergebnisse für die Einschlüsse am Rande der Kalifeldspatovoide und für die Grundmasse wieder. Solidus-, Liquidus- und Sättigungskurve für Fluide (A_{fs-1} und A_{fs-2}) sind durch stark ausgezogene Linien gekennzeichnet. Diese Kurven trennen fünf Phasenfelder (V + L: überkritische Lösung und Schmelze; V + S: Fluid (H₂O + F + CO₂) und Kristalle (Ab, Or, Q); L: granitische Schmelze mit gelösten überkritischen Bestandteilen. Im Feld S+L (Kristalle und Schmelze) verringert sich der Schmelzanteil (eutektische Schmelze) von rechts nach links. Der prozentuale Anteil von Ab(18%), Q (12%) usw. stellt Ab-, Or- und O-Komponenten in schmelzflüssigem Zustand für das Gesamtsystem (Schmelze+ Kristalle) dar. Veränderungen von Phasenzustand, Phasenanteilen und Schmelzzusammensetzung während der Druckentlastung werden in Abb.6 (Eklund und Shebanov,1999,S.137) erklärt.

In der Interpretation ihrer Ergebnisse folgen Eklund und Shebanov teilweise dem Restitmodell. Dieses wurde benutzt, um die chemische Variationsbreite in vielen granitischen Gesteinsreihen zu erklären (White und Chappell, 1977; Chappell et al.,1987). In den Anfangsstadien der magmatischen Entwicklungsgeschichte gestattet das Vorhandensein von kristallinen Resten, dass die Schwierigkeiten der Kristallkeimbildung in rasch abkühlenden Magmen - wie in den Gang- und Kontaktvarietäten der Feldspatovoide führenden Rapakivigranite überwunden werden.

Chappell et al. (1987) wiesen darauf hin, dass das während eines Teilaufschmelzungsereignisses entstandene Produkt eine mehr oder weniger OH-haltige Schmelze ist, die häufig größtenteils OH-freien Restit enthält. Die Kalifeldspatovoide führenden Rapakivigranite liefern den petrographischen und geochemischen Nachweis, der eine Beteiligung von restitischem Material bekräftigt.

Wenn wir in Betracht ziehen, dass die P,T-Parameter der ersten Mineralvergesellschaftung P_0T , den Ausgangsdruck und die Ausgangstemperatur für das magmatische System darstellen (siehe Abb.6a) ist unwahrscheinlich, dass ein Magma mit diesen Parametern bewegungsfähig war, denn in solch einem System war der Anteil der kritischen Schmelzmenge zu klein (etwa 20%). Die erforderliche kritische Schmelzmenge von 30 bis 35% (Fernandez und Barbarin, 1991), die zum Einsetzen des Magmaaufstiegs notwendig ist, entstand bei ungefähr 780 °C. Wenn ein derart kristallgesättigtes Magma unter annähernd gleichbleibender Temperatur aufdringt, unterliegen Quarz und Kalifeldspat der Aufschmelzung (Abb.6b und 6c) und bei 1 kbar verringert sich der Kristallgehalt des Magmas auf 40 % (Abb.6a). Dieser aus dem Diagramm übernommene Kristallgehalt entspricht den Einschätzungen für den Åland-Quarzporphyr von Hammarudda (Shebanov und Eklund, 1997). Demgemäß ist anzunehmen, dass die untersuchten Rapakivigranite aus quarz- und feldspatreichen Ausgangsgesteinen hervorgingen, welche einer Teilaufschmelzung ausgesetzt waren.

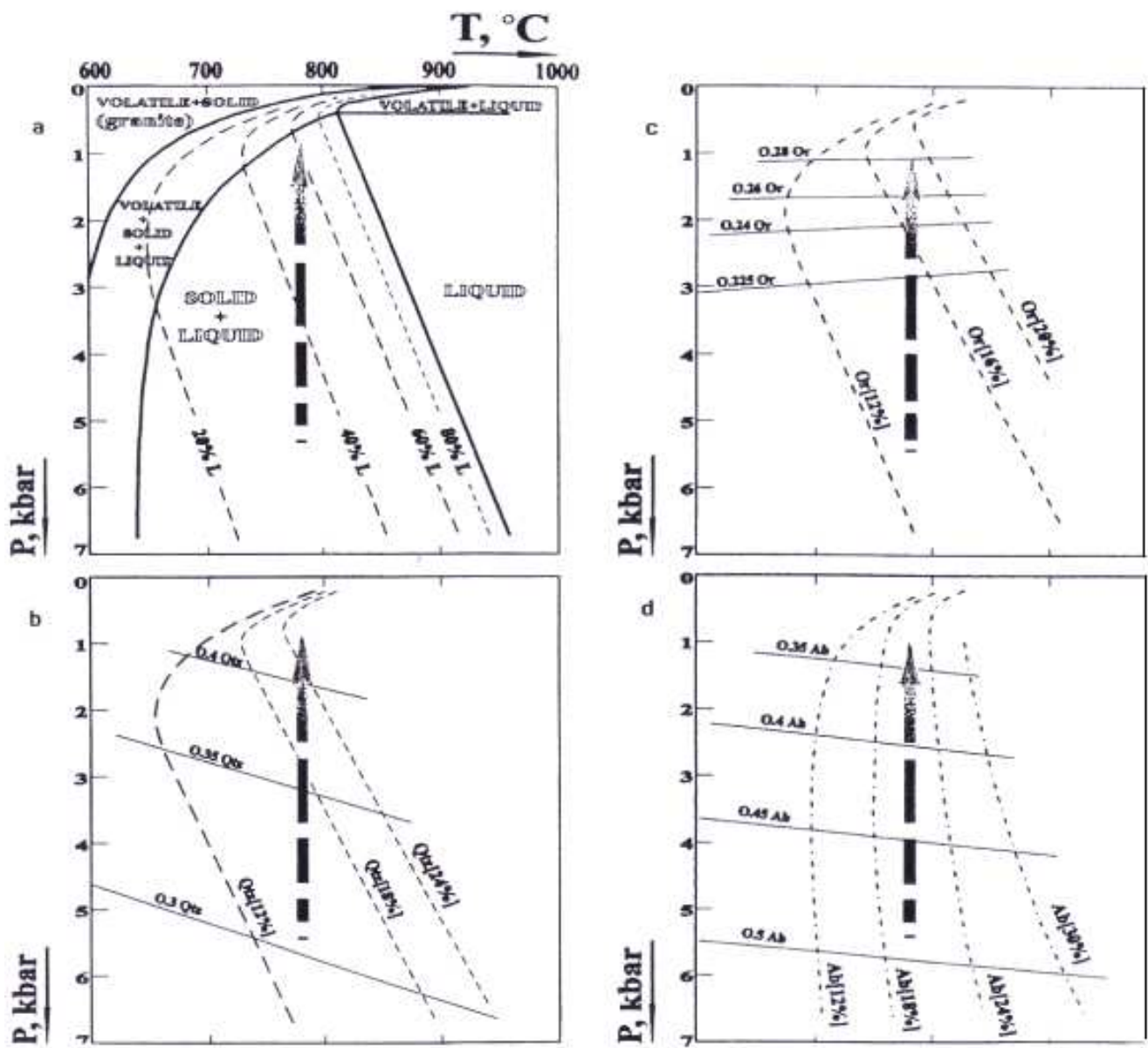


Abb.6 aus Eklund und Shebanov (1999, S. 137): Phasenbedingungen des Granit-Systems in Form von Druck und Temperatur (nach Shkodzinsky, 1985, vereinfacht). Der Pfeil entspricht einer hypothetischen isothermischen Druckentlastung.

- a) Stark ausgezogene Linien trennen fünf Felder mit unterschiedlichen Phasen zuständen
 Rechtes Feld: Schmelze (reine Granitschmelze, fluiduntersättigt);
 Feld oben rechts: Schmelze mit einer separaten Fluidphase;
 Mittleres Feld: fluiduntersättigte granitische Schmelze mit Kristallen ($Or + Ab + O$);
 Linkes Feld: fluidgesättigte granitische Schmelze mit Kristallen in Koexistenz mit einer separaten Fluidphase. In diesem Feld kann es zum magmatischen Aufsieden kommen (pegmatitisch-pneumatolytisches Stadium);
 Feld oben links: erstarrter Granit mit Restlösungen.
 Der prozentuale Schmelzanteil im Magma wird durch die gestrichelten Linien dargestellt. Der Pfeil deutet einen Aufstiegsfad im P,T-Feld an, in welchem während einer annähernd isothermischen Druckentlastung sich der Schmelzgehalt eines kristallgesättigten Magmas erhöht. Er beginnt mit einem Magma, das bei 5 k bar einen Schmelzanteil von 40% aufweist. Bei 1 k bar enthält das Magma 60% Schmelze und überquert die Sättigungskurve für Fluide. Wenn ein Magmapfad diese Kurve kreuzt, entweichen die flüchtigen Bestandteile, die eine separate Phase ausbilden, und es setzt eine sich steigernde Kristallisation des Granits ein. Dieser Übertritt beschränkt das obere Niveau für ein aufsteigendes Magma.
- b) Die gestrichelten Schnittlinien stehen für den Prozentgehalt der Quarzkomponente des Gesamtsystems im schmelzflüssigen Zustand (% Q. in Schmelze) wobei $Q_s + Q_r + Or_s + Or_k + Ab_s + Ab_k = 100$; die ausgezogenen Linien stellen Quarzisoplethen in der Schmelzphase dar (Quarzgehalt im Schmelzanteil), hier ist $Q_s + Or_s + Ab_s = 100$. Während der isothermischen Druckentlastung (Pfeil) vergrößert sich der prozentuale Quarzgehalt in der Schmelze auf Kosten der kristallinen Phasen.
- c) Die gestrichelten Linien stehen für den Prozentgehalt der Orthoklaskomponente des Gesamtsystems im schmelzflüssigen Zustand; ausgezogene Linien stellen Orthoklasisoplethen in der Schmelzphase dar. Während der isothermischen Druckentlastung (Pfeil) vergrößert sich der prozentuale Orthoklasgehalt in der Schmelze auf Kosten der kristallinen Phasen.
- d) Die gestrichelten Linien stehen für den Prozentgehalt der Albitkomponente des Gesamtsystems im schmelzflüssigen Zustand; ausgezogene Linien stellen Albitisoplethen in der Schmelzphase dar. Während der isothermischen Druckentlastung (Pfeil) verringert sich der prozentuale Albitgehalt in der Schmelze ein wenig, was auf den gering positiven Neigungsverlauf der gestrichelten Kennlinien zurückzuführen ist.

Da sich der Anteil des Kristallvolumens angemessenermaßen mit dem Druck vergrößert (Abb.6a), ist in der Tiefe eine höhere Viskosität des Ausgangsmagmas zu erwarten. Diese Folgerung deckt sich mit dem vorgeschlagenen kristallgesättigten Ausgangszustand des Magmas. Die verhältnismäßig niedrigen Viskositäten der ursprünglichen Rapakivimagmen werden durch ihre Fähigkeit bestätigt, sowohl die verschiedenartigen Xenolithe fortzuschaffen, einschließlich jener aus tieferen Krustenhorizonten (Belyaev u. a., 1996), als auch die mafischen magmatischen Einschlüsse auszuräumen (Eklund, 1996; Shebanov und Eklund, 1997).

Rapakivigranite sind weltweit häufig mit mafischen Gesteinen vergesellschaftet (Rämö und Haapala, 1995). Insbesondere auf dem Fennoskandischen Schild sind ihnen räumlich und zeitlich Diabas-schwärme zugeordnet. Diese mafischen Gangschwärme liefern für die Platznahme der Rapakivigranite den Nachweis eines Entstehungsbereiches unter einem spezifischen Spannungsregime. Nach dem Modell von Huppert und Sparks (1988) weisen diese Schwärme auch auf die zeitgleiche Intrusion von bedeutenden basischen Magmamengen in die Erdkruste hin, die den normalen geothermischen Gradienten vergrößern konnten. Deshalb dürfte der zeitgleiche basische Magmatismus die Wärmequelle gewesen sein, welche im Ausgangsgestein hinreichend Schmelze erzeugt (rund 30 bis 35 % bei T_1P_1) und so dem Rapakivigranitmagma den Aufstieg gestatten konnte. Der Zusammenhang mit dem

zeitgleichen mafischen Magmatismus begründet das Aufdringen des Rapakivimagmas unter annähernd isothermischen Bedingungen.

Die vorstehenden Ausführungen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Eklund und Shebanov (1999) haben die drei mittelproterozoischen Rapakivibatholithe (Salmi, Wiborg, Åland), den Pluton von Vehmaa und den Rapakivikomplex Rödö in der Form ihrer Thermobarometrie, Phasenverhältnisse, strukturellen Besonderheiten und ihrer H₂O-Gehalte untersucht, um die Entstehung der Rapakivi-Struktur zu verstehen. Die Magmen, welche die jetzt in der Oberkruste befindlichen Rapakivigranite ausbildeten, waren vor ihrem Hochdringen H₂O-untersättigte, kristallgesättigte Kristallbreie (>80% Kristallinat) unter geschätzten P,T-Bedingungen von 5 bis 6 k bar und 680 bis 720 °C. Die Intrusion von mafischem Magma in die Unterkruste kann der Auslöser gewesen sein, der die Temperatur des Ausgangsgesteins auf ungefähr 780°C an hob, das daraufhin genügend Schmelze (etwa 30 bis 35%) für den Magmaaufstieg erzeugen konnte. Eine wichtige Folgerung daraus ist, dass die Magmen, aus denen die Kalifeldspatovoide führenden Rapakivigranite kristallisierten, sich mutmaßlich niemals in vollständig schmelzflüssigem Zustand befanden. Eher kann davon ausgegangen werden, dass diese Magmen über ihre ganze Entwicklungsgeschichte hinweg kristallgesättigt waren. Während des Aufdringens dieser Magmen verringerte sich durch eine partielle Aufschmelzung die Gesamtmenge der Kristalle. In Hammerudda/Åland enthielt das Magma unter einem Druck von 1 kbar ungefähr 40% Kristalle.

Während des annähernd isothermischen Aufstiegs des kristallgesättigten Magma: aus dem Niveau der Mittelkruste hin zu erdoberflächennahen Magmakammern bildete sich die Rapakivi-Struktur aus. Dieser annähernd isothermische Aufstieg bewirkte eine Teilaufschmelzung von Quarz- und Kalifeldspateinsprenglingen, während Plagioklas ausgeschieden wurde. Im Verlauf des weiteren isothermischen Aufstiegs erhöhte sich entsprechend den Druck-Temperatur-Veränderungen der Schmelzanteil um rund 20 %. Dieser Vorgang erklärt die rundlichen Formen und tiefen Einbuchtungen der Quarzeinsprenglinge, die gerundeten Formen mancher Kalifeldspatovoide und das Auftreten mikrographischer Verwachsungen in ihren Zwischenräumen. Darüber hinaus kam es während der Intrusion zu Spätausscheidungen von Plagioklas, die jetzt entweder als Ummantelungen von Kalifeldspatovoiden oder in Gestalt einzelner idiomorpher Kristalle vorhanden sind.

Die uns derzeit bekannten Rapakivivorkommen des Fennoskandischen Schildes

Richten wir aber nun unsere Aufmerksamkeit auf die Verteilung der Rapakivivorkommen in Schweden, Finnland, am Meeresboden der Ostsee und unter der Osteuropäischen Tafel. In dem bereits erwähnten Forschungsbericht der SGU (Ser. Ca 87, 1997) befindet sich eine Übersichtskarte mit den einzelnen Rapakivi-Komplexen und ihren radiometrischen Alterswerten. Auf derselben fällt sofort die regelhaftige geographische Verteilung der Kristallisationsalter dieser Vorkommen ins Auge. Sieht man vom Salmi-Batholithen und seinen zugehörigen Gesteinen ganz im Osten ab, deren Alter zwischen 1,56 und 1,53 Ga liegen, besitzen nach Westen zu die einzelnen Vorkommen zunehmend jüngere Alterswerte. Die Komplexe in SE-Finnland (einschließlich Wiborg-Batholith) und im Norden Estlands sind mit 1,65 bis 1,61 Ga die ältesten. Westlich dieser Gruppe findet sich eine annähernd N - S streichende Zone mit Rapakivivorkommen die vom Masuren-Batholith im Süden über die Batholithe von Riga, Åland und Laitila, den Vehmaa-Pluton sowie den Siipy-Stock hinweg bis hinauf zum Nordingrå-Komplex im Norden reicht. Das Alter dieser Rapakivigesteine schwankt zwischen 1,59 und 1,50 Ga. Im Westen dieser Zone schließen die jüngsten Rapakivi-Komplexe des Fennoskandischen Schildes an. Von S nach N zählen dazu die Intrusionen von Jungfrun-, Virbo- und Göttemar-Granit im N der Provinz Kalmar - die bis in die 1970er Jahre hinein dem Transskandinavischen Magmatitgürtel zugeordnet wurden und im NE von Oskarshamn auf dem topographischen Blatt Vimmerby SE vorkommen. In der SGU-Publikation

"Erze, industriell nutzbare Minerale und Gesteine der Provinz Kalmar" (1991), berichten die Verfasser auf S.16 "Der Granit östlich und südlich von Figeholm ist ebenfalls rot und grobkörnig. Er führt die Bezeichnung Uthammar-Granit und ist in seinem N-Teil feinkörnig und etwas deformiert. Eine schwache Schieferung findet sich im Übrigen auch in anderen Teilbereichen dieses Granits. Im NE der Bucht Figeholmsfjärden geht das Uthammar-Massiv in Virbo-Granit über, der gelegentlich auch eine schwache Schieferung aufweist". Da die Rapakivigranite kratonisierte Krustenabschnitte intrudierten, unterlagen sie nach ihrer Platznahme keiner Deformation! Deshalb sind weitere Untersuchungen am Uthammar- und Virbo-Granit notwendig, um hier Klarheit zu schaffen.

Dann folgt das Noran-Massiv in der Provinz Dalarna, das den spätorogenen svekokarelidischen Malingsbo-Granit durchbricht. Nach N zu erscheinen danach das Strömsbro-Massiv in der Provinz Gävleborg, das Rödö-Massiv sowie der Nordingrå-Komplex, die beide in der Provinz Västernorrland liegen, und schließlich der Ragunda-Rapakivi-Komplex, der sich zu beiden Seiten des Grenzverlaufs der Provinzen Västernorrland und Jämtland erstreckt, mit seinen kleinen Satellitenkörpern Mårdsjö, Nordsjö, Mullnåset und Strömsund, die sich alle aus Gesteinen der Rapakivifamilie aufbauen und als Ausläufer des Ragunda-Komplexes nach NW in die Provinz Jämtland hinein angesehen werden.

Claesson und Kresten (1997) weisen in ihrem Aufsatz "Die anorogene Noran-Intrusion" all diesen jüngsten fennoskandischen Rapakivigesteinen ein Kristallisationsalter zu, das im Zeitabschnitt 1,53 bis 1,47 Ga schwankt. Ihrem Artikel entstammt die nachfolgende Übersichtskarte (Abb.1), die geradezu modellhaft die einzelnen Zonen mit den unterschiedlich alten Rapakivivorkommen wiedergibt. Hinsichtlich der Dala-Granite (Siljan- und Garberg-Granite) und ihren komagmatischen Dala-Vulkaniten, die dem Transskandinavischen Magmatitgürtel angehören, und westlich des Noran-Massivs anstehen, vor allem am Siljansee und nordwestlich davon, gelangten Ahl u. a. (1999) zu folgenden Schlussfolgerungen: Die Dala-Granite stellen mit ihren zugehörigen Vulkaniten einen post- bis anorogenen magmatischen Komplex dar, welcher sich aus vier Hauptkomponenten zusammensetzt:

1. der Järna-Granit, der vor etwa 1,79 Ga in einem relativ tiefliegenden Krustenniveau Platz nahm. Dieser Dala-Granit besitzt eine Anzahl geochemischer Kennzeichen, die auf ein nicht differenziertes Magma hinweisen, das unter einer tektonischen Kompressionsregime entstand.
 2. der Siljan- und
 3. der Garberg-Granit, die beide als subvulkanische Intrusionen vor etwa 1,71 bis 1,68 Ga aufdrangen.
- Beide sind weitaus stärker differenziert als der Järna-Granit und weisen geochemische Merkmale auf, die auf eine Magma-Entstehung in einem tektonischen Dehnungsregime verweisen.

Die felsischen Dala-Vulkanite (sog. Dala-Porphyre) haben ein radiometrisches Alter von rund 1,7 Ga. Ihre Kristallisation lief in höheren Krustenniveaus ab als die des Garberg-Granits. Sie werden als komagmatische Produkte des Garberg-Granits betrachtet.

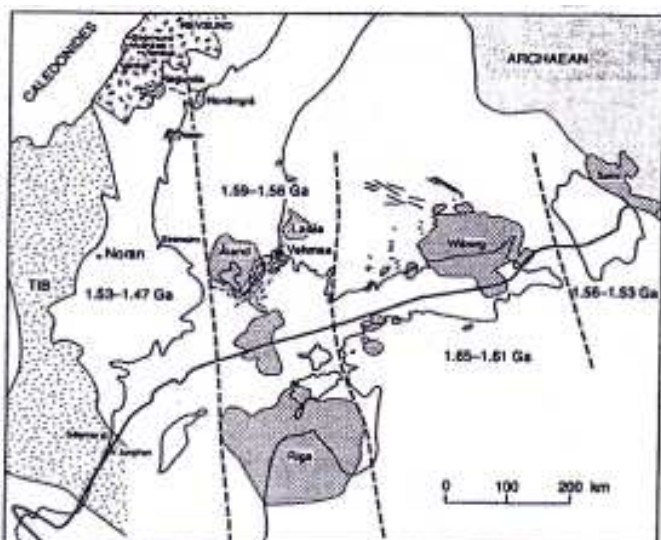


Abb.1 aus Claesson und Kresten (1997, S.11 Karte abgeändert nach Andersson (1996). Dargestellt sind die Örtlichkeit des Noran-Granits und die mittleren Bereiche des Fennoskandischen Schildes mit den Rapakivi-Vorkommen und anderen Hauptgesteinseinheiten. Die svekokarelidische Kruste grenzt im NE an die 2,7 bis 2,4 Kruste des Archaikum, im NW an den paläozoischen Gebirgsgürtel der Kaledoniden und im W und SW an die Granite und Vulkanite des 1,85 bis 1,68 Ga alten Transskandinavischen Magmatitgürtels (TIB).

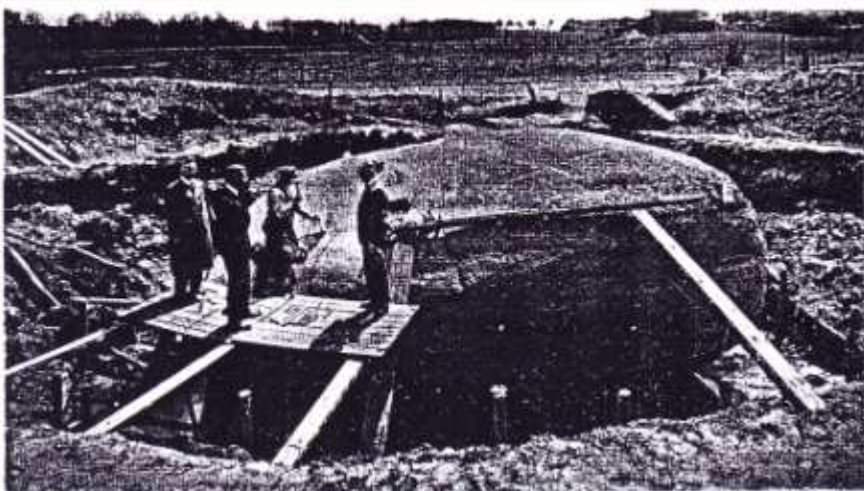
Zwischen den anorogenen Intrusionen von Göttemar und Jungfrun verläuft die Grenzlinie der paläozoischen Deckgesteine der Osteuropäischen Plattform. Die svekokarelidischen Gesteine werden von mehreren Generationen von Erguss- und Tiefengesteinen dominiert, die 1,9 bis 1,7 Ga alt sind. Von diesen ist nur der große posttektonische Revsund-Granitkomplex ausgehalten, der eine gewisse Ähnlichkeit mit den Gesteinen des Transskandinavischen Magmatitgürtels hat.

Für den Wachstumsprozeß der Svekofennidischen Orogenese war ein tektonisches Kompressionsregime verantwortlich, das die magmatischen Aktivitäten maßgeblich, steuerte als fast alle Teile des Transskandinavischen Magmatitgürtels bereits entwickelt waren (einschließlich der Småland-Värmland-Granite und des Järna-Granits). Im Zeitabschnitt von 1,81 bis 1,77 Ga entsprechen diese Teilbereiche des Transskandinavischen Magmatitgürtels dem subduktionsbedingten Magmatismus. Zur Ausbildung der 1,71 bis 1,68 Ga alten Siljan- und Garberg-Granite war im Wesentlichen ein dehnungsgeprägter Bildungsbereich verantwortlich. Beide Granite drangen unmittelbar vor den 1,65 bis 1,51 Ga alten anorogenen Rapakivigraniten auf, welche unter platteninternen tektonischen Bedingungen Platz nahmen. Deshalb können die Dala-Granite als ein magmatischer Übergangskomplex betrachtet werden, der sowohl die letzten Auswirkungen eines von Subduktion abhängigen Magmatismus als auch die Initialprodukte eines mit Dehnung verknüpften Magmatismus im Inneren eines sich stabilisierenden Kratons repräsentiert.

Die Finnische Geologische Landesanstalt veröffentlichte 1994 eine Übersichtskarte im Maßstab 1:1 000 000 unter dem Titel: "Das präkambrische Grundgebirge des Finnischen Meerbusens und seiner Umgebung". Auf dieser sehr empfehlenswerten Karte erkennt man nicht nur die klassischen Rapakivi-Vorkommen Finnlands, sondern auch die durch neue Untersuchungen am Meeresboden der Ostsee, unter der Rigaer Bucht und unter Estland bekannt gewordenen Rapakivigesteins-Vorkommen, die alle von den paläozoischen Deckgesteinen der Osteuropäischen Tafel überlagert sind. Außerdem ist eine lobenförmige Linie eingetragen, die angibt, bis wie weit nach N das proterozoische Grundgebirge heutzutage noch vom phanerozoischen Deckgebirge verhüllt ist. Die Loben selbst sind ein Nachweis der abhobelnden Tätigkeit durch das nordische Inlandeis. Es ist klar, dass südlich dieser Grenzlinie keine präkambrischen Gesteine des Grundgebirges vom Inlandeis aufgenommen und als Geschiebe fortgeführt werden konnten! Vom SE-Rand des Åland-Batholithen bis hin zum grobkörnigen Rapakivigranit-Vorkommen am Meeresboden der Kökarfjärden beträgt die Entfernung 21 km. Acht Schären repräsentieren hier in der südlichen Åland-See ein Gesteinsvorkommen von 500 km². Hausen (1964) unterteilte dessen Gesteine in rapakiviähnlichen, grobporphyrischen und sehr grobporphyrischen Pyterlit. Für letzteren führt er an: "Kennzeichnend für die auftretenden sehr grobporphyrischen Pyterliten sind die roten dicktafeligen Orthoklaskristalle, welche in einer sehr grobkörnigen Zwischenmasse aus Plagioklas, Orthoklas, Mikroklin, Quarz, Glimmer oder Hornblende liegen. Die Orthoklaseinsprenglinge sind bis zu 12 cm lang. Einerseits ähneln diese Granite den Pyterliten des Wiborg-Gebietes, andererseits Gesteinstypen mit einigen der eigentümlichen Rapakivi-Kennzeichnungen (u. a. Kalifeldspatovoide). Von diesen Gesteinen haben Mende und Postelmann während ihrer Finnland-Exkursion 1924 Proben mitgebracht, darunter auch ein Handstück von der Schäre Söderharu. Postelmann (1936) konnte mit dem Vergleichsmaterial dieser Schäre ein Großgeschiebe (> 100 m³) identifizieren, das im ostpreußischen Samland bei Cojehne gefunden, dann bearbeitet und als "Hindenburgstein" (6,75 x 2,20 x 1,80 m) im Reichsherenmal Tannenbergr eingefügt wurde. Am Ende seiner Ausführungen vertritt Postelmann die These, "dass in Ostpreußen und damit wohl auch in ganz Norddeutschland keine Rapakivigeschiebe aus dem Wiborg-Gebiet vorkommen". Diese Behauptung stützt die Feststellung, dass Quarzporphyre von der Insel Hogland, die die Effusivfazies des Wiborg-Batholithen darstellen, als Geschiebefunde in Brandenburg nicht erscheinen. Im Bereich von Berlin und Brandenburg ist der Wiborg-Rapakivi (Wiborgit) dem Verfasser in seiner mehr als 50 jährigen Sammeltätigkeit niemals unter die Augen gekommen. Doch wohin sind die Tirilite zu beheimaten, die im Laufe dieser Zeit Bestandteil seiner Geschiebesammlung wurden?

Die östliche Grenze der aus S-Finnland bis nach Brandenburg verfrachteten Kristallingeschiebe dürfte wohl im Bereich westlich Helsinki zu ziehen sein, bewertet man die nicht häufigen Funde von Perniö-Granit, Küstengneis und Hangö-Granit. Wobei letzterer dem Verfasser nur einmal unter die Augen kam. Möglicherweise bieten die isolierten Rapakivi-Vorkommen Obbnäs, Bodom und Onas, im Großraum Helsinki anstehend, die Chance, hier durch identifizierte Funde Klarheit zu schaffen - sollten sie sich als Leitgeschiebe eignen.

Nördlich der Åland-Inseln befindet sich das Anstehende der Bottenmeer-Porphyre, die als Effusivfazies von Rapakivigraniten anzusprechen sind. Ihr Verhältnis zu den Batholithen von Åland und Laitila sowie zum Vehmaa-Pluton ist bis heute ungeklärt. Da die Variationsbreite dieser Vulkanite groß ist, verwundert es nicht, dass Verwechslungsmöglichkeiten mit Vulkaniten anderer Rapakivi-Vorkommen bestehen. In Zweifelsfällen lassen sich Fehlbestimmungen nur durch Handstückvergleich und Dünnschliffuntersuchung ausschließen. Statistische Geschiebeverhältniszählungen und Streukegelkonstruktionen für bestimmte Leitgeschiebe können nicht zur Klärung des Sachverhalts beitragen. Es ist bekannt, daß Hjelmqvist (1966) in seiner "Geologischen Beschreibung der Provinz Kopperberg" einen Dala-Porphyr beschreibt und feststellt, "daß dieser Porphyr einem Bottermeer-Porphyr zum Verwechseln ähnelt."



Der "Hindenburgstein" als Großgeschiebe an seinem Fundort im samländischen Ort Cojehne/ Ostpreußen.

Südlich des Åland-Batholithen sind auf der oben zitierten Übersichtskarte zwei große, nicht spezifizierte "Rapakivigranit-Gebiete" eingetragen, die beide von der lobenförmigen Grenzlinie durchzogen werden. Das eine derselben befindet sich rund 70 km SSE, das andere etwa 105 km SSW des Åland-Batholithen. Ersteres soll nach Milthers (1933) die Mutterkluft des Roten Ostsee-Quarzporphyrs, letzteres die des Braunen Ostseequarzporphyrs und des Ostsee-Syenitporphyrs sowie nach Hedström (1894) auch die des basaltähnlichen Ostsee-Diabases sein. Diese beiden Effusivgesteinsvorkommen sind die größten, die in Beziehung zu den fennoskandischen Rapakivis stehen. Dagegen ist die Insel Hogland im Finnischen Meerbusen, die Mutterkluft des Hogland-Quarzporphyrs, klein und das Ignimbrit-Vorkommen auf der Schäre Blåklobb/Eckerö (Åland) geradezu winzig.

Abschließend sei auf die Fülle an Leitgeschieben hingewiesen, die als Gesteine der Rapakivi-Familie angesprochen werden. Bereits ein Blick auf das Inhaltsverzeichnis des Hesemann'schen Bestimmungsbuches (1936) weist darauf hin, dass sie die wichtigste Gruppe der Leitgeschiebe darstellt, die uns in den weichselkaltzeitlichen Ablagerungen Norddeutschlands relativ unverwitterte Geschiebe anbietet, die sich im Erhaltungszustand mit dem Anstehenden durchaus messen können.

Literaturverzeichnis

- Ahl, Martin et al. (1997): Rapakivi granites and related rocks in central Sweden. Sveriges Geologiska Undersökning, Series, Ca 87, Uppsala.
- Andersson, U. B. und Eklund, O. (1994): Cellular plagioclase intergrowths as a result of crystal-magma mixing in the proterozoic Åland rapakivi batholith, SW Finland. *Contrib. Miner. Petrol.*, Band 117, pp.124 bis 136.
- Belyaev, A. M. et al. (1991): Petrogenesis of Rapakivi Granites and related Rocks in: Haapala et al: Symposium on Rapakivi Granites and Related Rocks, p.6. (Geol. Führer Nr. 34 der Finnischen Geologischen Landesanstalt).
- Chappell et al. (1987): The importance of residual source material in granite petrogenesis. *J. Petrol.*, Band 28, pp.1111 bis 1138.
- Claesson, S. und Kresten, P. (1997): The anorogenic Noran intrusion - a Mesoproterozoic rapakivi massif in south-central Sweden. *Geologiska Foreningen i Stockholm Förhandlingar*, Band 119, pp.115
- Cohen, E. und Deecke, W. (1891+ 1896): Über Geschiebe aus Neu-Vorpommern und Rügen. *Mitt. naturwiss. Vereinigung Neu-Vorpommern und Rügen*. Band 23, pp. 1 bis 84; Band 86, pp. 1 bis 95.
- Dempster, T. J. et al. (1991): Textural evolution of the rapakivi granites, south Greenland - Sr, O and H isotopic investigations. *Contrib. Miner. Petrol.*, Band 107, pp. 459 bis 471.
- Dempster, T. J. et al. (1994): The origin of rapakivi texture. *J. Petrol.* Band 35, pp. 963 bis 981.
- Edelman, N. (1965): A geotectonic model of the Svecofennian orogeny. *GFF* Band 87, pp.257 bis 269.
- Ehlers, C. et al. (1979): Geologisk Exkursion i Ålands - Abolands Skärgård. (Exkursionsführer) Herausgeber: Geologisk-mineralogiska institutionen vid Åbo Akademi.
- Eklund, O. (1993): Coeval contrasting magmatism and magmatic mixing in Proterozoic post- and anorogenic granite. Åland, SW Finland. (Dissertation). Åbo Akademi
- Eklund, O. et al. (1994): Magma mixing, the petrogenetic link between anorthositic suites and rapakivi granites, Åland, SW Finland. *Miner. Petrol.*, Band 50, pp.3 bis 19.
- Eklund, O. (1996): An attempt to estimate the ascent speed for an A-Type magma through a dike. In: *Annal. Univ. Turkuensis*, Ser. O 126, pp.83 bis 90, (nur teilweise in englisch).
- Eklund, O. und Shebanov, A.D. (1999): The origin of rapakivi texture by subisothermal decompression. *Precambrian Research*, Band 95, pp.129 bis 146
- Fernandez, A.N. und Barbarin, B. (1991): Relative rheology of coeval mafic felsic magmas: nature of resulting interaction processes and shape and mineral fabrics of mafic microgranular enclaves. In: Didier et al: *Enclaves and Granite Petrology* pp.263 bis 275, Elsevier, Amsterdam.
- Haapala I. (1989): Suomen rapakivigraniiteista - Rapakivi granites of Finland. *Academica Fennica*, Year Book 1988 bis 1989, pp.135 bis 140
- Haapala I. und Rämö, O.T. (1999): Rapakivi granites and related rocks: an introduction. *Precambrian Research*, Band 95, pp.1 bis 7.
- Hausen, H. (1964): Geologisk Beskrivning över Landskapet Åland. *Skrifter Utgivna av Ålands Kulturstiftelse IV*, Mariehamn.
- Hedström, H. (1894): Studier öfver Bergarter fran Morän vid Visby, *GFF*, pp. 247 bis 274.

- Hesemann J. (1936): Zur Petrographie einiger nordischer Leitgeschiebe. Abhandl. d. Preuß. Geol. Landesanstalt; Neue Folge, Heft 173.
- Hibbard M. J. (1981): The magma-mixing origin of mantled feldspars. *Contrib. Mineral. Petrol.*, Band 76, pp.158 bis 170.
- Hibbard M. J. (1991): Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems. In Didier et al: *Enclaves and Granite Petrology*, pp.431 bis 444, Elsevier, Amsterdam.
- Hibbard, M. J. (1995): *Petrography to Petrogenesis*. Prentice Hall, New Jersey.
- Högbom, A. G. (1893): Om postarkäiska eruptiver inom det svensk-finska urberget. *GFF* Band 15, pp.209 bis 240:
- Huppert H. E. und Sparks, R. S. J. (1988): The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *J. Petrol.* Band 29, pp.599 bis 624.
- Lindberg B. und Eklund, O. (1992): Mixing between basaltic and granitic magmas in a rapakivi related quartz-feldspar porphyry, Åland, SW Finland. *GFF* Band 114, pp.103 bis 112.
- Mehnert, K. R. (1987): 50 Jahre Granitforschung. *Geologische Rundschau*, Band 76, pp.1 bis 14.
- Mende, Fritz (1225+1926): Typengesteine kristalliner Diluvialgeschiebe aus S-Finnland und Åland. *Zeitschrift für Geschiebeforschung*. Band 1: pp.117 bis 139 Band 2: pp.1 bis 22.
- Milthers, V. (1933): Leitgeschiebe auf Gotland und Gotska Sandön sowie die Heimat der Ostsee-porphyre. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, Band 55, pp.19- 28
- Nekvasil, H. (1991): Ascent of felsic magmas and formation of rapakivi. *American Mineralogist*, Band 76 pp.1279 bis 1290.
- Pitcher, W. S. (1997): *The Nature and Origin of Granite*, 2.Auflage. Chapman and Hall, London.
- Postelmann, A. (1936): Der "Hindenburgstein" für das Reichsehrenmal Tannenberg. *Zeitschrift für Geschiebeforschung*, Band 12, pp.1 bis 32.
- Rämö O. T. (1991): Petrogenesis of the Proterozoic rapakivi granites and related basic rocks of southeastern Fennoscandia: Nd and Pb isotopic and general geochemical constraints. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 355.
- Rämö O. T. und Haapala, I. (1991): The rapakivi granites of eastern Fennoscandia: a review with insights into their origin in the light of new Sm-Nd isotopic data. In: *Mid-Proterozoic Laurentia-Baltica*. Geological Association of Canada, Special Paper, Vol.38, pp.401 bis 415.
- Rämö, O.T. und Haapala, I. (1995): One hundred years of Rapakivi Granite. *Miner. Petrol.*, Band 52, pp.129 bis 185.
- Salonsaari, Pekka, T. (1995): Hybridization in the subvolcanic Jaala-litti complex and its petrogenetic relation to rapakivi granites and associated mafic rocks of southeastern Finland (Dissertation). *Bulletin of the Geological Society of Finland*, Band 67, Teil Ib.
- Sato, H. (1975): Diffusion coronas around quartz xenocrysts in andesite and basalt from Tertiary volcanic region in northeastern Shikoku, Japan. *Contrib. Miner. Petrol.*, Band 50, pp.49 bis 64.
- Schulz, W. (2003): *Geologischer Führer für den norddeutschen Geschiebesammler*. cw Verlagsgruppe, Schwerin.
- Shebanov A. D. (1994): Abyssal and hypabyssal associations of the dark hydroxyl-bearing minerals in rapakivi granites, (in russisch). *Proc. Russ. Miner. Soc.*, Band 5, pp.16 bis 32.

Shebanov A. D. und Eklund, O. (1997): Mineralogical and thermobarometrical assessment of the acid-basic magmatic interaction: an example from the subvolcanic rapakivi granite Hammarudda complex, SW Finland. *Petrologica*, Band 5 (2) ,pp.160- 187.

Shkodzinsky, V. S. (1985): *Phase Evolution of Magmas and Petrogenesis*, (in russisch). Nauka, Moskau.

Stimac, J. A. und Wark, D.A. (1992): Plagioclase mantles and sanidine in silicic lavas, Clear Lake (California): implications for the origin of Rapakivi texture. *Geol. Soc. Am., Bulletin* 104, pp.728 bis 744.

Wark, D. A. und Stimac, J. A. (1992): Origin of mantled (rapakivi) feldspars: experimental evidence of a dissolution- and diffusion-controlled mechanism. *Contrib. Miner. Petrol.*, Band 111, pp.345 bis 361.

White, A. S. J. und Chappell, B. W. (1977): *Ultrametamorphism and granitoid genesis*.

Tectonophysics, Band 43, pp.7 bis 22.