

Noble gases in the subcontinental mantle and the lower crust

Doctoral Thesis

Author(s):

Dunai, Tibor János

Publication date:

1993

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000935448>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH Nr. 10407

Noble gases in the subcontinental mantle and the lower crust

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Tibor János DUNAI
Diplom Mineraloge, Universität Heidelberg
born 29.9.1965
citizen of the Federal Republic of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. P. Signer, ETH-Zürich, examiner
Prof. Dr. M. Grünenfelder, ETH-Zürich, co-examiner
Prof. Dr. H. Staudigel, VU-Amsterdam, co-examiner

Zürich 1993

Part 2 of this dissertation was published in:
Earth and Planetary Science Letters, Volume 199
Elsevier

Kurzfassung von Teil 1

Das Ziel dieser Arbeit war es, einen Beitrag zum besseren Verständnis der geochemischen Entwicklung des subkontinentalen Mantels (SKM) zu leisten. Zu diesem Zweck wurden die isotopische Zusammensetzung und Häufigkeiten von He, Ne und Ar in Flüssigkeitseinschlüssen in Mantelxenolithen untersucht. Dies, da ich anahm, daß die gemeinsame Untersuchung dieser Edelgase allfällige Unterschiede zwischen dem reellen SKM und einem MORB ähnlichen Reservoir, wie es z.B. für Europa von verschiedenen Gruppen vermutet wird (Ref. in Kap. 5.2), am besten erkennen lassen würde.

In meiner Untersuchung habe ich ein Hauptaugenmerk auf den SKM unter West- und Zentraleuropa gelegt. Die meisten Proben stammen aus dem französischen Zentralmassiv und der Eifel, die mit jeweils 21 bzw. 16 Xenolithproben vertreten sind. Spitzbergen und der österreichische Kapfenstein sind mit lediglich 3 bzw. 5 Proben vertreten. Klinopyroxene von fünf untersuchten Eifelxenolithen wurden bereits früher auf ihre Sr- und Nd-Isotopenzusammensetzung hin analysiert (Ref. in Kap. 4.1.5).

Anhand meiner Ergebnisse kann ich zeigen, daß die Edelgassignatur des SKM von jener des MORB verschieden ist und daß sie in guter Übereinstimmung mit der angereicherten Natur des SKM ist, wie sie durch die Ergebnisse früherer Sr-, Nd-, Pb- und O-Isotopenuntersuchungen angezeigt ist (Ref. in Kap. 1.5.1-4). Aus den Ergebnissen dieser Arbeiten und meinen Daten schließe ich, daß die Edelgassignatur der Xenolithe im wesentlichen identisch mit jener der fördernden Basalte ist und weitgehend von der Sr- und Nd-Systematik der Xenolithe entkoppelt ist. Das Edelgasreservoir des Europäischen SKM kann als ternäre Mischung aus DMM-, EM2- und HIMU-Mantelkomponenten beschrieben werden. Der SKM hat ein signifikant niedrigeres $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis als jenes von MORB, wobei es für He über weite Gebiete, wie z.B. im Falle des Zentralmassivs über 90×180 km, sehr homogen ist. Die Variation der $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse, wie sie für die Eifel und das Zentralmassiv bestimmt wurden, macht nur 3-5 % der möglichen Bandbreite aus, die sich aus Mischungen der DMM-, EM2- und HIMU-Komponenten ergeben könnte. Diese Bandbreite liegt zwischen derer der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - und $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -Verhältnisse, die Variationen von 2-3 bzw. 8-9 % aufweisen. Daher nehme ich an, daß die He-Signaturen gemeinsam mit den Sr- und Nd-

Signaturen durch migrierende carbonatitische Schmelzen über einen größeren Bereich gemittelt wurden.

Für die untersuchten Gebiete ergeben sich folgende mittlere $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse: Zentralmassiv: $6.53 \pm .25 R_a$, Eifel: $6.03 \pm .14 R_a$, Spitzbergen: $6.65 \pm .25 R_a$ und Kapfenstein: $6.1 \pm .7 R_a$ ($R_a = (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{Probe}} / (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{Luft}}$, $(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{Luft}} = 1.39 \times 10^{-6}$). Die gemessenen Ne-Isotopenverhältnisse sind vorwiegend atmosphärisch, was auf eine Kontamination mit atmosphärischen Ne zurückzuführen ist. Auch die $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Verhältnisse sind atmosphärisch kontaminiert, was sich in den gemessenen Verhältnissen zwischen dem atmosphärischen Wert von 296 und 17000 widerspiegelt. Trotz alledem kann ich das ursprüngliche, unkontaminierte $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Verhältnis rechnerisch auf Werte ≥ 30000 einschränken. Die $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ -Verhältnisse in den Xenolithproben sind mit Werten um 0.25 alle deutlich fraktioniert und sind daher kleiner als das gegenwärtige Produktionsverhältnis von ~ 5.5 und das heutige Verhältnis in MORB von 2.1. Das ursprüngliche, unfraktionierte $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ -Verhältnis läßt sich jedoch rekonstruieren. Dabei ergeben sich für das Zentralmassiv und die Eifel Werte von $2.36 \pm .07$ bzw. $2.49 \pm .07$.

Ich verwende die gemessenen $^3\text{He}/^4\text{He}$ - und die rekonstruierten $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ -Verhältnisse um den Grad der kristalen Kontamination des SKM und deren Zeitpunkt einzugrenzen. Für die Eifel ergibt sich daraus ein Zeitraum zwischen 350-1450 Ma während dem 0.5-2.7% krustales Material in den SKM eingetragen wurden. Die entsprechenden Werte für das Zentralmassiv sind 610-2000 Ma und 0.3-1.1%. Da O-, Sr-, Nd- und Pb-Isotopendaten einen Eintrag von mindestens 1-2 % krustalen Materials in den SKM erfordern, erachte ich es am wahrscheinlichsten, daß die Kontamination während oder unmittelbar vor der Herzynischen Gebirgsbildung stattfand.

Um eine bessere Vorstellung über das Ausmaß des Eintrags von sedimentären Kohlenstoff in den SCM zu erhalten, wurden 23 Xenolithproben von verschiedenen Lokalitäten aus aller Welt auf ihre Edelgase hin untersucht, an welchen bereits von Mathez et al. (1984) die Kohlenstoffgehalte bestimmt wurden. Die resultierenden $\text{C}/^3\text{He}$ -Verhältnisse sind eine bis vier Größenordnung höher als das MORB-Verhältnis von $\sim 2 \times 10^9$. Ein Unterschied von etwa einer Größenordnung läßt sich durch Fraktionierungsprozesse erklären. Größere Unterschiede im $\text{C}/^3\text{He}$ -Verhältnisse zeigen jedoch deutlich die Existenz von subduzierten sedimentären Kohlenstoff im SKM an.

Abstract of Part 1

The aim of this study was to improve the knowledge of the geochemical evolution of the subcontinental mantle (SCM). To this goal, I determined the isotopic composition and abundances of He, Ne and Ar trapped in fluid inclusions of mantle xenoliths. These determinations appeared promising because I expected that the combined analysis of noble gases would best constrain possible differences between the actual SCM and a MORB-like noble gas source that was formerly postulated by others, as e.g. for the European SCM (refs, see sect. 5.2).

I concentrated on the SCM beneath Western and Central Europe. The major body of samples comes from various locations in the Massif Central, France, and the Eifel, Germany, with 21 and 16 xenoliths, respectively. From Spitsbergen and Kapfenstein, Austria, I studied 3 and 5 xenoliths, respectively. Clinopyroxenes of five xenoliths from the Eifel studied had been previously analyzed for their Sr- and Nd-isotopic composition by others (refs. in sect. 4.1.5).

My study shows that the noble gas systematics of the SCM is different from that of average MORB. The results are fully consistent with an enriched nature of the SCM as concluded from the results of previously published Sr-, Nd-, Pb and O-isotope studies (refs. in section 1.5.1-4). From these studies and my noble gas data I judge that the noble gas isotopic signatures of the xenoliths are identical to that of the host magma and are effectively decoupled from the Sr-, and Nd-systematics of the xenoliths. The noble gas source of the European SCM can be described as ternary mixtures of DMM-, EM2- and HIMU-mantle components. The SCM reservoir has a significantly lower $^3\text{He}/^4\text{He}$ -ratio than average MORB and is laterally rather homogenous over large areas, e.g. 90 x 180 km in the case of the Massif Central. The variation in the He-isotopes in the Eifel and Massif Central covers only 3-5 % of the range that could be realized by the mixing of DMM-, EM2- and HIMU-endmembers. This is intermediate between the variation of the published Sr- and Nd-isotopic ratios which cover 2-3 and 8-9 % of that range, respectively. Thus, I conclude that the He-signature, together with the Sr- and Nd-signature, was integrated by migrating carbonatitic melts.

The mean $^3\text{He}/^4\text{He}$ -ratios of the areas investigated are: Massif Central: $6.53 \pm .25 R_a$, Eifel: $6.03 \pm .14 R_a$, Spitsbergen: $6.65 \pm .25 R_a$, Kapfenstein: $6.1 \pm .7 R_a$

($R_a = (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{sample}} / (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{atm.}}$, with $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.39 \times 10^{-6}$). Ne-isotopic ratios are mainly close to the atmospheric ratios, which I attribute to atmospheric contamination. Also the $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -ratios are affected by atmospheric contamination, and range between the atmospheric value of 296 and 17000. Nevertheless, I calculate that the original, uncontaminated $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -ratio of the European SCM reservoir is ≥ 30000 . The $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ -ratios of the xenolithic samples are around 0.25. This I ascribe to fractionation because this mean value is below both, the production ratio of about 5.5 and the current MORB-value of 2.1. Nonetheless, the value of the initial, unfractionated $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ -ratio of the noble gas source can be reconstructed. My estimates are $2.36 \pm .07$ and $2.49 \pm .07$ for the Massif Central and Eifel magma source, respectively.

I use the measured $^3\text{He}/^4\text{He}$ - and reconstructed $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ -ratios to model the fraction of terrigenous material contaminating the SCM as well as the time when this contamination could have occurred. The resulting model-age ranges for the contamination event are 350-1450 Ma and 610-2000 Ma for the Eifel and the Massif Central, respectively. In that period the SCM beneath the Eifel and the Massif Central was contaminated with 0.5-2.7 % and 0.3-1.1 % crustal material, respectively. Because published O-, Sr-, Nd- and Pb-isotope date demand for at least 1-2 % crustal material in the SCM, I judge that the contamination most probably occurred during or slightly prior to the Herzynian orogeny.

In addition, I attempted to derive the C/ ^3He -ratio of the SCM, to constrain the input of sedimentary carbon into the SCM. To this goal I analyzed the noble gases in 23 mantle xenoliths of locations worldwide, which had been previously been analyzed for their carbon content by Mathez et al. (1984). The C/ ^3He -ratios obtained are one to four orders of magnitude higher than the MORB-value of about 2×10^9 . About one order of magnitude difference result from fractionation processes. Larger differences I interpret as a proof for the presence of subducted sedimentary carbon in the SCM.

Kurzfassung von Teil 2

Um einen Einblick in die Herkunft von Fluiden in der Unterkruste zu gewinnen, wurde an mehreren Mineralseperaten einer Enderbitprobe aus den Nilgiri Hills, Süd Indien, die He-, Ne und Ar-Isotopenzusammensetzung bestimmt. Diese Probe enthält sehr viele hochdichte CO₂-Einschlüsse, die durch vorangegangene Untersuchungen durch Touret und Hansteen (1988) sowie Srikantappa et al. (1992) bereits gut charakterisiert wurden. Der Granat enthält primäre synmetamorphe Flüssigkeitseinschlüsse, wohingegen Quarz und Plagioklas nur sekundäre reequilibrierte Flüssigkeitseinschlüsse enthalten. Die Edelgase wurden durch Mörsern oder Heizen der Proben extrahiert. Die gemessenen ³He/⁴He Verhältnisse sind sämtlich größer als das 0.01-0.02-Fache des atmosphärischen Wertes (R_a), wie es für alte krustale Gesteine zu erwarten wäre. Das Helium in den Flüssigkeitseinschlüssen des Granates hat mit 2.34±.36 R_a das höchste ³He/⁴He Verhältnis. Der ³He-Überschuß läßt sich nur durch einen Beitrag von Mantel-Helium und nicht durch kosmogenes oder nucleogenes ³He erklären. Die Isotopen- und Elementverhältnisse von He, Ne und Ar in allen untersuchten Mineralien können durch Kombination verschiedener Prozesse erklärt werden, wie z.B. Elementfraktionierung durch Diffusion, radiogene/nucleogene Produktion von ⁴He, ²¹Ne, ²²Ne und ⁴⁰Ar, sowie durch atmosphärische Kontamination. Abhängig von den Annahmen, die wir für die für die Evolution des He in den Flüssigkeitseinschlüssen machen, erhalten wir Mischungsverhältnisse zwischen Mantel- und krustalem He von 20 % bis zu reinem Mantelhelium. Ich erachte es jedoch am wahrscheinlichsten, daß vor 2.5 Ga reines Mantelhelium in den Flüssigkeitseinschlüssen eingeschlossen wurde.

Die Daten legen nahe, daß die Enderbitprobe ein Teil einer früheren tonalitischen Magma darstellt, die aus dem Erdmantel aufgestiegen ist und ihre flüchtigen Bestandteile während ihrer Kristallisation entmischt hat. Die Freisetzung großer Mengen CO₂, verbunden mit der thermischen Energie aus vergleichbaren Intrusionen, könnte zur Dehydrierung amphibolitfazieller Gesteine nördlich der Nilgiri Hills geführt haben.

Abstract of Part 2

To gain information about the provenance of lower crustal fluids, the He-, Ne- and Ar-isotopic composition of several mineral separates from a 2.5 Ga old enderbite sample from the Nilgiri Hills, Southern India were analyzed. The sample contains abundant high density carbonic fluid inclusions, which have been well characterized in previous studies (Touret and Hansteen, 1988; Srikantappa et al. 1992) on that particular sample. Garnet contains synmetamorphic primary fluid inclusions, while quartz and plagioclase contain reequilibrated secondary inclusions. The noble gases were extracted by crushing or heating of the minerals. All measured $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios are above the typical value of old crustal rocks, which is about 0.01-0.02 times the atmospheric ratio (R_a). Fluid inclusions from the crushed garnet sample contain helium with the highest $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio of $2.34 \pm 0.36 R_a$. The ^3He excess is mantle derived and can not be explained by a cosmogenic or nucleogenic ^3He . The elemental and isotopic ratios of He, Ne and Ar in all minerals can be explained by a combination of elemental fractionation during diffusional loss of noble gases, production of radiogenic and/or nucleogenic ^4He , ^{21}Ne , ^{22}Ne and ^{40}Ar , as well as atmospheric contamination. Depending on the assumptions made for the evolution of the He trapped in the garnet fluid inclusions, we obtain mixing ratios between mantle derived He and crustal He of about 20 % to essentially pure mantle He. However, probably pure mantle He was trapped in the minerals 2.5 Ga ago.

These data suggest that the enderbite sample represents a former mantle derived tonalitic magma which exsolved its volatiles upon crystallization in the lower crust. Liberation of a huge amount of CO_2 by similar intrusions, together with the heat provided by them, might be responsible for the dehydration of the former amphibolite facies rocks bordering north to the Nilgiri Hills.