

# Ringwoodit: Gigantische Wasserreservoirs in großer Tiefe?

Der erstmalige Fund des Minerals Ringwoodit in einem Diamanten erhärtet die Vorstellung, dass die Übergangszone vom oberen zum unteren Erdmantel wasserhaltig ist, und zwar in Form von im Kristallgitter eingebauten (OH)-Gruppen. Wird dieser Fund als repräsentativ für die gesamte Zone erachtet, so befänden sich in großer Tiefe Wasserreservoirs, die umgerechnet das Mehrfache der Wassermenge der heutigen Ozeane enthielten. Das Phänomen in Verbindung mit dieser Dimension erinnert an die in der Bibel erwähnten „Quellen der großen Tiefe“.

Michael Kotulla

## Einführung

Einen unmittelbaren Einblick in den tieferen Untergrund der Erde ist dem Menschen verwehrt; die Erforschung des Erdinneren erfolgt fast ausnahmslos auf indirektem Wege, beispielsweise durch theoretische Überlegungen, Experimente oder seismische Tomographie\* (vgl. KOTULLA 2014b). Seismische Analysen haben Diskontinuitäten – sprunghafte Anstiege in der Geschwindigkeit der Ausbreitung seismischer Wellen – bei etwa 410 und 660 km Tiefe aufgezeigt.<sup>1</sup> Diese rund 250 km mächtige Schale wird als Übergangszone definiert und trennt den oberen vom unteren Erdmantel (Abb. 4, rechter Teil). Die Diskontinuitäten in den Grenzbereichen werden auf Änderungen der Mineralphase und/oder des Chemismus zurückgeführt. So

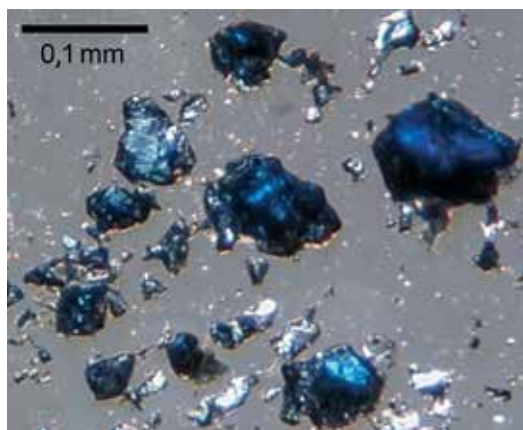
wird angenommen, dass das Mineral Olivin –  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  – den Hauptbestandteil des oberen Erdmantels bildet (Abb. 1). Die Übergangszone dagegen soll hauptsächlich von den Hochdruck-Modifikationen\* des Olivins, den dichter gepackten Mineralen Wadsleyit und Ringwoodit<sup>2</sup>, aufgebaut sein.

Ob die Mantelübergangszone (nahezu) wasserlos oder wasserhaltig ist, wird seit Jahrzehnten insbesondere im Kontext des plattentektonischen Konzepts (z. B. Wasser als „Schmiermittel“) kontrovers diskutiert. Direkte Indizien, die wesentlich zur Klärung dieses Problems hätten beitragen können, gab es bisher nicht. Zwar ist Ringwoodit zuerst in Meteoriten entdeckt worden, und künstlich konnten kleine Kristalle (Abb. 2) schon Mitte der 1990er-Jahre hergestellt werden, aber eine Probe aus dem tieferen Erdmantel existierte bislang nicht. Durch weitere Laborexperimente war allerdings bekannt (u. a. KOHLSTEDT et al. 1996), dass Ringwoodit aufgrund seiner spezifisch „lückenhaften“ Kristallstruktur flexibel – wie ein Schwamm – OH-Gruppen (Hydroxyl) aufnehmen kann, die umgerechnet Wassergehalten bis zu 2,5 Gewichtsprozent (Gew.-%) entsprechen. Dieses Vermögen hat gewöhnlicher Olivin nicht.

**Abb. 1** Olivinbombe. Fremdgesteinseinschluss (Xenolith) aus den Tephra-Ablagerungen des Laacher-See-Vulkans, Eifel. Das Bruchstück von Mantelgestein (Peridotit\*) ist von der aufsteigenden Magma mitgerissen worden und zeigt die Tiefenlage des Quellgebietes der Magma an (einige 10er km Tiefe). Breite: ca. 7 cm. Sammlung/Foto: M. KOTULLA.



**Abb. 2** Fragmente im Labor erzeugter (synthetischer) Ringwoodit-Mineralen. Synthese/Foto: S. JACOBSON; freundliche Zurverfügungstellung.



## Ringwoodit-Einschluss in Diamanten

2009 entdeckte John McNEILL bei einer Nachuntersuchung einen grünlichen, 40 Mikrometer kleinen Einschluss in einem in 2008 angekauften brasilianischen Diamanten (Abb. 3), der unweit eines Kimberlitschlots\* in einer Diamantseife\* kommerziell gewonnen worden war. Dem Fund folgte ein mehrjähriger Analyse-Marathon, an dem etliche Institute weltweit beteiligt waren. Dabei wurden ausschließlich Methoden bzw. Verfahren angewendet<sup>3</sup> – u. a. Synchrotron-Computertomografie, Einkristall-

**Der Diamant mit dem Ringwoodit-Einschluss ist aus Hunderten Kilometern Tiefe mit bis zu Schallgeschwindigkeit an die Erdoberfläche katapultiert worden.**

Röntgenstrukturanalyse, Raman- und Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie –, die keine Extraktion erforderten, also den Originalzustand des umschließenden Diamanten bewahrten.

Schließlich stand fest (PEARSON et al. 2014): Bei dem Einschluss handelt es sich um ein Ringwoodit/Walstromit-Mineralpaar. Der mit Hilfe des Infrarotspektrums geschätzte Wassergehalt des Ringwoodits liegt bei 1,4 bis 1,5 Gew.-% (Abb. 4) mit einer Unsicherheit von 50 %; die relativ hohe Unsicherheit ist auch dem unmittelbar angrenzenden („störenden“) Walstromit\* geschuldet. Zur Verifizierung des Ergebnisses erfolgte ein Vergleich mit Spektren synthetischer, wasserhaltiger Proben. Damit haben die Autoren einen ersten direkten Nachweis erbracht, dass die Übergangszone – zumindest lokal – wasserhaltig ist, bis zu 1 Gew.-%.

Der Fund zeige des Weiteren an, dass einige Kimberlite ihren primären Ursprung in dieser tiefen Mantelregion gehabt haben müssen. Und in Bezug auf die eingangs erwähnte Problemstellung sagt Co-Autor NASDALA (zitiert in SCHREIBER 2014): „Die Theorie, dass die heiße Schmelze im Erdmantel wasserfrei sei, haben wir damit widerlegt.“ Nach dieser Studie haben PEARSON und seine Kollegen ein weiteres, wasserhaltiges Ringwoodit-Kristall gefunden, sodass „die Indizienlage nun sehr solide ist“ (PEARSON zitiert in COGHLAN 2014).

Übergreifend heben PEARSON et al. (2014) – quasi als Tatsache – hervor: „Der letztendliche Ursprung des Wassers in der Hydrosphäre\* der Erde ist in der tiefen Erde, dem Erdmantel.“<sup>4</sup>



**Abb. 3** Der Diamant (Längserstreckung 5 mm) aus Brasilien, bei dem John McNEILL 2009 den winzigen Einschluss (40 µm) eines Ringwoodit/Walstromit-Mineralpaares entdeckte (siehe Markierung). Der Diamant wurde aus alluvialen Ablagerungen nahe des Rio Aripuana gewonnen, unweit eines Kimberlitschlots, und für \$20 erworben. S. auch Abb. 4. © University of Alberta, Edmonton, Kanada; freundliche Zurverfügungstellung.

**Eine Wasserfalle im Inneren der Erde?**

SCHMANDT et al. (2014) verknüpften Hochdruck-Laborexperimente und seismische Tomographie, um gegenwärtige Prozesse im Grenzbereich der Übergangszone zum unteren Erdmantel (660-km-Diskontinuität, vgl. Abb. 4) zu entschlüsseln.

Im experimentellen Teil setzten JACOBSON und Kollegen synthetisches Ringwoodit mit 1 Gew.-% H<sub>2</sub>O (blauer Kristall in Abb. 5B) in einer Diamantstempelkammer einem Druck von 30 GPa\* aus und erhitzten den Kristall punktuell mit einem Laser auf 1600 °C. Damit waren die angenommenen Druck- und Temperaturbedingungen 660 km unter Nordamerika nachgestellt worden. Der so herbeigeführte und beobachtbare Übergang von Ringwoodit zu Silikat-Perowskit<sup>5</sup> – (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub> – und Magnesiowüstit – (Mg,Fe)O – erfolgte unter Bildung von Schmelze zwischen den Mineralkorngrenzen (intergranular, Abb. 5C). Der Schmelzprozess kommt nur bei wasserhaltigem Ringwoodit in Gang. Das „Wasser“ wird regelrecht „ausgequetscht“ (Ringwoodit wird dehydratisiert); der Prozess wird demzufolge Dehydrations-schmelzen genannt. Silikat-Perowskit kann kein Wasser absorbieren.



**Abb. 4** Wasserreicher Ringwoodit. Der im Diamant eingeschlossene Ringwoodit stammt ursprünglich aus einer Tiefe von 410 bis 660 km (Übergangszone oberer zu unterer Mantel). Er enthält umgerechnet etwa 1,5 Gew.-% Wasser. Der Fund erhärtet die Annahme, dass die Übergangszone insgesamt wasserreich ist. Grafik: © University of Alberta, Edmonton, Kanada; freundliche Zurverfügungstellung – Deutsche Überarbeitung: M. KOTULLA und F. MEYER (Original: ALARY 2014; Titel siehe Grafik rechts unten).

## Glossar

**Diamantseife:** Sekundäre Anreicherung von Diamanten (Lagerstätte) in Sedimenten; hier in Form einer alluvialen Seife oder Flussschlämme (Transport durch fließende Gewässer).

**GPa:** Gigapascal,  $10^9$  Pascal;  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ , d. h. ein Druck von 30 GPa entspricht etwa dem 300 000-fachen des Normaldrucks (1013,25 mbar).

**Hochdruck-Modifikation:** Unter hohem Druck gebildete Modifikation eines Stoffes (Minerals), z. B. Diamant vom Kohlenstoff.

**Hydrosphäre:** Hier im weiteren Sinne das Wasser an oder nahe der Erdoberfläche, der bedeckende Teil (Flüsse, Seen, Meere), der in fester Form gebundene Teil (Eisschilde, Gletscher etc.) sowie Wasser des flacheren Untergrundes.

**Kimberlitschlot:** Bildung eines hochexplosiven Vulkanismus; in nur wenigen

Stunden wird Material aus Hunderten von Kilometern Tiefe in einem gesprengten senkrechten Aufstiegskanal (Schlot) an die Oberfläche befördert – die letzten Kilometer sogar mit Schallgeschwindigkeit. Das vulkanische (Trümmer-)Gestein im Schlot wird Kimberlit genannt; es enthält häufig Diamanten.

**Peridotit:** Gestein, aus welchem der größte Teil des Erdmantels besteht; mit hohen Anteilen an Olivin.

**Phasenübergang:** Hier Änderungen der Phasenzustände von Mineralen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur.

**Seismische Tomographie:** Die Durchleuchtung und Sichtbarmachung von Strukturelementen des Erdinneren, ähnlich dem Prinzip einer Röntgen-Computertomographie.

**Walstromit:** Mineral mit der chemischen Formel  $\text{BaCa}_2(\text{Si}_3\text{O}_9)$ .

Im seismischen Teil interpretierten SCHMANDT und Kollegen Daten des Seismometer-Netzwerkes USArray (MELTZER et al. 1999, KOTULLA 2014b) unterhalb der Great Plains und der US-kanadischen Grenze auf Grundlage eines Mantelzirkulationsmodells als einen Abwärtsfluss von Mantelmaterial. Diese Bewegungen führen sie auf unter Zentral- und Nordamerika (weiter) absinkende, subduzierte Platten zurück. Unmittelbar unterhalb der 660-km-Grenze war eine abrupte Reduzierung der Wellengeschwindigkeit festzustellen. Diese wurde als partielle Schmelze des Gesteins (um 1 %) gedeutet, wie es die experimentellen Ergebnisse aufgezeigt hatten. Ein analoger Prozess wurde auch für die 410-km-Grenze angenommen. Sie folgern abschließend, dass die Kombination des Dehydratationsschmelzens beim Absinken über die

660-km-Grenze und beim Aufsteigen über die 410-km-Grenze, wenn wasserreicher Wadsleyit in das stabile (wasserlose) Olivin-Feld gelangt, eine Langzeit-Falle für das Wasser in der Übergangszone schaffen könnte.

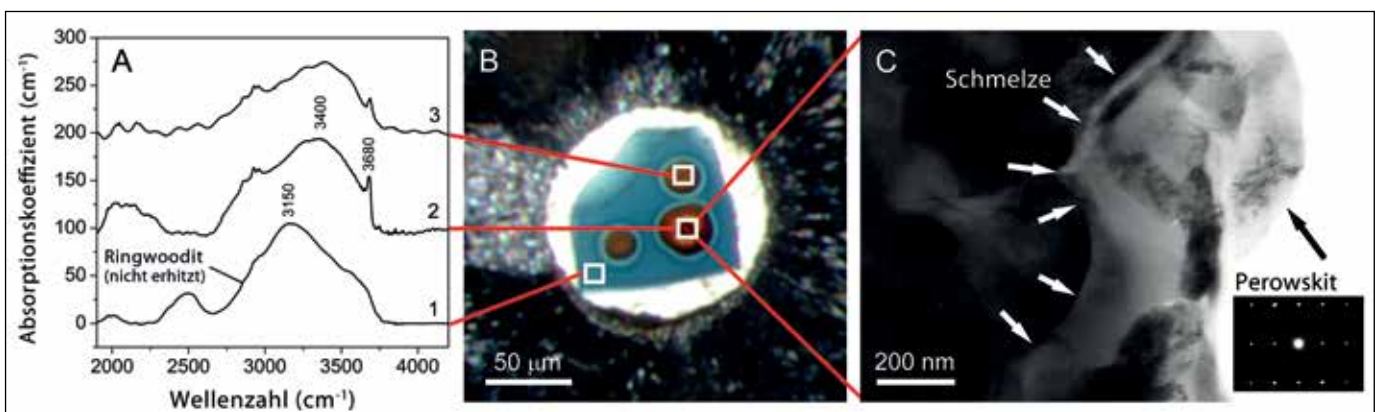
Aufgrund ihrer Ergebnisse gehen SCHMANDT et al. (2014) davon aus, dass zumindest eine große Region der Übergangszone – nämlich die untersuchte – wasserreich ist.

## Mögliche Dimension der Wasserreservoir

In den Fachartikeln werden keine Aussagen zur möglichen Dimension der Wasserreservoir im Inneren der Erde getroffen.<sup>6</sup> Diese sind nur in begleitenden Kommentaren und Mitteilungen sowie wissenschaftsjournalistischen Beiträgen zu finden; sie sind durch zusätzlich erhaltene Informationen der beteiligten Forscher angereichert (u. a. Interviews).

In der *Nature*-Rubrik News & Views gibt KEPPLER (2014) umgerechnet eine Größe von  $1,4 \times 10^{21} \text{ kg}$  Wasser an, unter der Annahme, dass die Ringwoodit-Probe mit einem Wassergehalt von etwa 1 Gew.-% für den unteren Bereich der Übergangszone (520 bis 660 km), in welcher Ringwoodit stabil sei, repräsentativ wäre. Dies entspricht der Masse aller heutigen Ozeane zusammen (Volumen 1,4 Milliarden  $\text{km}^3$ ).<sup>7</sup> So auch PEARSON (zitiert in ALARY 2014): „(...) die Übergangszone könnte so viel Wasser haben wie alle Ozeane der Welt zusammen.“<sup>8</sup>

JACOBSON zufolge könnte, so schreibt LINGENHÖHL (2014), im Erdmantel „dreimal so viel Wasser vorhanden sein wie in allen Ozeanen der Erde zusammen.“ Das gleiche Verhältnis nennt auch COGHLAN (2014); ihm gegenüber macht JACOBSON deutlich: „Wir sollten für dieses tiefe Reservoir dankbar sein. Wenn es nicht



**Abb. 5** Laborexperiment mit synthetischem, wasserhaltigem Ringwoodit (SCHMANDT et al. 2014). Nachbildung der Bedingungen in 660 km Tiefe und Auslösung eines Phasenübergangs\*.

**A** Infrarotspektrum der drei markierten Zonen von B: Nicht erhitzter Bereich (Spektrum 1) sowie erhitzte Bereiche (Spektrum 2 und 3).

**B** Ringwoodit-Kristall (blau) mit 1 Gew.-%  $\text{H}_2\text{O}$  in einer Diamantstempel-Druckzelle unter einem Druck von 30 GPa. Der Kristall wurde mit einem Laser punktuell

auf  $1600^\circ \text{C}$  erhitzt (orangerote Kreise), um einen Übergang zu Silikat-Perowskit und Magnesiowüstite herbeizuführen.

**C** TEM-Aufnahme eines erhitzten Bereiches: Kristalle von Silikat-Perowskit sowie Schmelze in Form einer amorphen Masse zwischen den Mineralkorngrenzen. Erläuterung siehe Textteil. Grafik/Fotos: S. JACOBSEN (Co-Erstautor), Northwestern University, IL, USA; freundliche Zurverfügungstellung.

dort wäre, würde es sich auf der Oberfläche der Erde befinden und das einzige Land, das [aus dem Mega-Ozean, MK] herauschauen würde, wären Bergspitzen.“ Unklar ist, wie dieser um den Faktor 3 höhere Wert zustande kommt. Bezogen auf die konkreten Zahlen von KEPP-  
LER (2014) könnte das Dreifache rechnerisch durch die Annahme eines Wassergehaltes von 1,5 Gew.-% (Faktor 1,5) und der Verbreitung über die gesamte Übergangszone (Faktor 2) gebildet werden (vgl. Abb. 4).

HARDY (2014) weist – unter Bezugnahme auf Co-Autor BRENKER und Kollegen und unter der Annahme einer gleichmäßigen Konzentration von 1 Gew.-% Wasser über die gesamte Übergangszone – sogar die „sechsfache der Wassermenge der heutigen Ozeane“ aus. Wie sich diese Größe errechnet, ist nicht angegeben.

Über die Fernsehprogrammzeitschrift *tv Hören und Sehen* hat die Meldung vom „Wasser im Erdmantel“ nach über einem Jahr auch einen größeren Teil der Allgemeinheit erreicht (Abb. 6). Die kurzen und sehr verdichteten Naturbeiträge sind auf Basis von Sekundärquellen i. d. R. fundiert recherchiert. ROGACKI (2015, 13) schreibt: „Der Geologe Steve Jacobson spricht von 4,2 Milliarden Kubikkilometern Wasser allein unter Nordamerika – mehr als das Dreifache des Volumens aller Weltmeere. Ließe man die Wassermassen auf die Erde regnen, würden nur noch die höchsten Gebirge aus dem auf diese Weise entstandenen Super-Ozean ragen ...“

### „Wasser ändert über die Weise, wie ein Planet funktioniert, alles.“

Unabhängig davon, ob potentiell die 1-, 3- oder 6-fache Masse zutreffender ist, mag die sich erhärtende Vorstellung entscheidend sein, wie sie PEARSON formuliert: „Wasser ändert über die Weise, wie ein Planet funktioniert, alles“ (zitiert in ALARY 2014).

#### Ein Ozean tief in der Erde

„In mancher Hinsicht“, so KEPPLER (2014), „ist es ein Ozean im Inneren der Erde, wie es von Jules Verne in seinem Roman von 1864, *Reise zum Mittelpunkt der Erde*, (Fig. 1) [mit Bezug auf die entsprechende Illustration von Édouard Riou, MK] visualisiert ist, wenn auch nicht in der Form flüssigen Wassers, sondern als OH-Gruppen in einem ungewöhnlichen Mineral.“

Diese Assoziation greift auch HARDY (2014) auf; es sei mehr als nur Science Fiction: „Jules Vernes Vision von großen Wassermengen im Erdinneren konnte jetzt bestätigt werden.“ Oder (SCHIEFER 2014): „Jules Verne hatte recht: Es gibt auch im Erdinneren erhebliche Mengen Wasser.“



## Grenzüberschreitungen

### Die „Quellen der großen Tiefe“

Die Bibel<sup>9</sup> berichtet im Buch Genesis von der Sintflut als einer umfassenden, globalen Katastrophe. Dabei scheint möglicherweise ein Großteil der Flutwasser dem Untergrund zu entstammen (Gen 7,11): „(...) an diesem Tag brachen alle Quellen der großen Tiefe auf, und die Fenster des Himmels öffneten sich.“ Hier werden keine wissenschaftlichen Begriffe verwendet, wie wir sie heute kennen. Es ist bildhafte, verdichtete und allgemeinverständliche Sprache – ähnlich wie sie teilweise auch im Wissenschaftsjournalismus Anwendung findet: „(...) Ozeane von Wasser tief in der Erde“ (FELLMANN 2014), „(...) gewaltige ‚Ozeane‘ unter der Erde“ (ALARY 2014) oder „Der Erde tiefes Wasserreservoir“ (KEPPLER 2014).

Der Bericht im Genesis-Buch enthält keine weiteren Einzelheiten. Es wird weder beschrieben, wie die Quellen beschaffen waren, noch aus welcher Tiefe die Wasser kamen. Das Phänomen allerdings – Wasser im Erdinneren – und die Dimension der Wasserreservoirs, die für eine globale Flutkatastrophe ausreichend waren, beides zusammen kann mit den mutmaßlichen „Ozeanen der Tiefe“ assoziiert werden.

Es soll damit keinesfalls gesagt werden, dass der vorsintflutliche Zustand der Situation gleichen könnte, die möglicherweise heute der Übergangszone des Erdmantels zugeschrieben wird, oder gar, dass die Flutwasser eventuell dieser Zone hätten entstammen können. Es soll vielmehr angedeutet werden, dass es grundsätzlich Möglichkeiten der Speicherung gigantischer Wassermassen im Erdinneren gibt und dass sich die Indizien für eine dieser Möglichkeiten nunmehr deutlich erhärtet haben.

Genesis 7 berichtet – unspezifisch – von „gigantischen Wasserreservoirs in großer Tiefe“.

Abb. 6 Der Artikel über einen „Ozean unter der Erde“ in der Fernsehprogrammzeitschrift *tv Hören und Sehen* (Ausgabe 40/2015). So erreichte die Meldung vom „Wasser im Erdmantel“ nach über einem Jahr auch einen größeren Teil der Allgemeinheit.

Eine Anerkennung setzt aber voraus, dass die Bibel als eine ernstzunehmende Erkenntnisquelle akzeptiert wird (vgl. KOTULLA 2014a).

Aktuell liegt das Wasser in der Übergangszone „gebunden“ vor – es wird auch hinsichtlich seines Flutpotentials (s. o., „nur noch die höchsten Gebirge würden aus dem Super-Ozean ragen“) gebunden bleiben. Denn es heißt weiter in Gen 9,12-15 mit Bezug auf die zuvor geschehene (universale) Flut: „Und Gott sprach: (...) dann werde ich an meinen Bund denken, der zwischen mir und euch und jedem lebenden Wesen unter allem Fleisch [besteht]; und nie mehr sollen die Wasser zu einer Flut werden, alles Fleisch zu vernichten.“

## Anmerkungen

- 1 Lokal davon abweichende Tiefenlagen, folglich auch teilweise unterschiedliche Dicken der Übergangszone.
- 2 Benannt nach dem Geowissenschaftler Alfred Edward RINGWOOD (1930-1993), der Pionierarbeit leistete, die Diskontinuitäten als Phasenübergänge des Minerals Olivin anzusehen (vgl. RINGWOOD 1959).
- 3 Eine Beschreibung dieser Verfahren und Methoden ist nicht Gegenstand dieses Beitrages.
- 4 Diese Aussage zielt auf die Fragestellung, woher das Wasser auf der Erde kommt. Damit wird der Vorstellung widersprochen, dass wasserreiche Kometen und Asteroiden das Wasser aus dem Weltraum zur Erde gebracht haben sollen. Siehe beispielsweise auch HALLIS et al. (2015). In diesem Zusammenhang sei auf die grenzüberschreitende Anmerkung in diesem Journal, Ausgabe 21/2, S. 122-123 hingewiesen.
- 5 Neue Bezeichnung nach dem Physiker Percy William BRIDGMAN (1882-1961), genehmigt von der Internationalen Mineralogischen Vereinigung: Bridgmanit (TSCHAUNER et al. 2014), nachdem das Mineral erstmals in einem Meteoriten nachgewiesen werden konnte.
- 6 Diese „Zurückhaltung“ ist unverständlich. Bereits AHRENS (1989) mutmaßte zwei „Ozeane“ im Erdmantel: „Thus, plausible water budgets for the Earth's interior (mantle) are in the range of at least two oceans' worth.“ Oder BERGERON (1997): „You have oceans and oceans of water stored in the transition zone. It's sopping wet.“
- 7 Zum Vergleich: Das Gesamtvolumen der Grundwasser-Reservoire in den oberen 2 km der kontinentalen Kruste beträgt nach einer aktuellen Schätzung etwa 23 Millionen km<sup>3</sup> (GLEESON et al. 2016). Nur 6 % dieses Grundwassers ist weniger als 50 Jahre alt.

- 8 Ob solche extremen Extrapolationen zulässig sind, ist durchaus fraglich.
- 9 Die Bibelzitate entstammen der revidierten Fassung der Elberfelder Bibel (1985) in ihrer 4. bearbeiteten Auflage von 1992.

## Literatur

- AHRENS TJ (1989) Water storage in the mantle. *Nature* 342, 122-123.
- ALARY B (2014) Rare mineral points to vast 'oceans' beneath the Earth. Pressemitteilung der University of Alberta vom 12. März 2014, Edmonton, Kanada.
- BERGERON L (1997) Deep Waters. *New Scientist* 155, 22-26.
- COGHLAN A (2014) Massive 'ocean' discovered towards Earth's core. *New Scientist* vom 12. Juni 2014.
- FELLMAN M (2014) New Evidence for Oceans of Water Deep in the Earth. Pressemitteilung vom 12. Juni 2014, Northwestern University, Evanston, IL., USA.
- GLEESON T, BEFUS KM, JASECHKO S, LUIJENDIJK E & CARDENAS B (2016) The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience* 9, 161-167.
- HALLIS LJ, HUSS GR, NAGASHIMA K, TAYLOR GJ, HALLDÖRS-SON SA, HILTON DR, MOTTI MJ & MEECH KJ (2015) Evidence for primordial water in Earth's deep mantle. *Science* 350, 795-797.
- HARDY A (2014) Jules Vernes Vision bestätigt: Es gibt Wasser im Erdinneren. Pressemitteilung der Goethe Universität vom 13. März 2014, Frankfurt/M.
- KEPLER H (2014) Earth's deep water reservoir. *Nature* 507, 174-175.
- KOHLSTEDT DL, KEPLER H & RUBIE DC (1996) Solubility of water in the  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  phases of (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. *Contrib. Mineral. Petrol.* 123, 345-357.
- KOTULLA M (2014a) Megafloten. *Stud. Integr. J.* 21, 4-11.
- KOTULLA M (2014b) Seismische Tomographie gewinnt an Schärfe. *Stud. Integr. J.* 21, 110-113.
- LINGENHÖHL (2014) Riesige Wassermassen im Erdinnern. *Spektrum der Wissenschaft*, 13. 6. 2014.
- MELTZER A, RUDNICK R, ZEITLER P, LEVANDER A, HUMPHREYS G, KARLSTROM K, EKSTRÖM G, CARLSON R, DIXON T, GURNIS M, SHEARER P & VAN DER HILT R (1999) USArray Initiative. *GSA Today*, November, 8-10.
- PEARSON DG, BRENKER FE, NESTOLA F, McNEILL J, NASDALA L, HUTCHINSON MT, MATEEV S, MATHER K, SILVERSMIT G, SCHMITZ S, VEKEMANS B & VINCZE L (2014) Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond. *Nature* 507, 221-224.
- RINGWOOD AE (1959) The olivine-spinel inversion in fayalite. *Am. Mineral.* 44, 659-661.
- ROGACKI M (2015) Der geheime Ozean unter der Erde. *TV Hören und Sehen* 40/15.
- SCHIEFER P (2014) Diamant bringt Wasser aus der Tiefe. *Uni:View Magazin* vom 13. März 2014, Universität Wien.
- SCHMANDT B, JACOBSON SD, BECKER TW, LIU Z & DUEKER KG (2014) Dehydration melting at the top of the lower mantle. *Science* 344, 1265-1268.
- TSCHAUNER O, MA C, BECKETT JR, PRESCHER C, PRAKAPENKA VB & ROSSMANN GR (2014) Discovery of bridgmanite, the most abundant mineral in Earth, in a shocked meteorite. *Science* 346, 1100-1102.