

Habitabilität von Super-Erden: Gibt es eine Erde 2.0? Skalierungsgesetze für die Manteldynamik in Exoplaneten

J. Oberst, L. Noack, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Technische Universität Berlin

Kurzgefasst

- Die Habitabilität eines Planeten hängt von verschiedenen Faktoren wie Klima und Plattentektonik ab.
- Wir nutzen 2D und 3D Konvektionsmodelle, welche Auskunft über dynamische Vorgänge im Inneren eines Planeten liefern, jedoch sehr zeitaufwändig sind.
- Aus den Konvektionsmodellen leiten wir Skalierungsgesetze für 1D Modelle ab.
- Planeten von großer Masse sind im Inneren einem hohen Druck ausgesetzt, der untere Mantel stagniert (genannt Low-Lid) und nimmt nicht an der Konvektion teil.
- Der Druck hat einen großen Einfluss auf das gesamte Konvektionsverhalten und die Plattentektonikwahrscheinlichkeit sowie die Ausgasung durch Vulkanismus, was wiederum Konsequenzen für das Klima hat.

Seit einigen Jahren beschäftigt sich die Astrophysik mit der Suche nach einem habitablen Planeten außerhalb unseres Sonnensystems, d.h. einem Planeten, der die Fähigkeit besitzt erdähnliches Leben zu beherbergen. Für die Habitabilität eines Planeten (zumindest für komplexes Leben) wird die Existenz von Plattentektonik meist als Grundvoraussetzung angenommen. Durch die Erneuerung der Oberfläche wird zum Einen das Treibhausgas CO_2 der Atmosphäre, welches in Sedimenten gebunden wird, dem Mantel zurückgeführt und daher das Klima stabilisiert. Der Mantel kühlt außerdem dank des Materialtransports aus dem Planeteninneren an die Oberfläche sehr effektiv ab. Dies trägt auch dazu bei, dass ein Magnetfeld entstehen kann bzw. beibehalten werden kann.

Für Modelle zur Simulation der Mantelkonvektion eines Planeten ist die Umsetzung der Plattentektonik mit realistischen Parametern heute noch nicht zufriedenstellend realisierbar. Es ist jedoch möglich, erdähnliche Referenzmodelle zu definieren und Tendenzen anhand von Parametervariationen zu studieren. Diese Ergebnisse können Aufschluss darüber geben, ob die Wahrscheinlichkeit, auf einer Super-Erde mit mehreren Erdmassen Plattentektonik zu erhalten, höher oder niedriger ist als bei einem Planeten von einer Erd-

masse. Abbildung 1 zeigt die vorläufigen Ergebnisse aus unserem Projekt bezüglich der Tendenz der Plattentektonik abhängig von Zeit und Masse [1]. Massereiche Planeten haben aufgrund des hohen Drucks einen stagnierenden unteren Mantel, so dass die Plattentektonikwahrscheinlichkeit mit der Masse abnimmt. Kleine oder kalte Planeten können ebenfalls keine Plattentektonik entwickeln, da die Konvektion im Mantel zu schwach ist.

Für die Simulation und Abschätzung der Habitabilität eines extrasolaren Planeten werden aus den dreidimensionalen Mantelkonvektionsmodellen allgemein gültige Gesetze, die so genannten Skalierungsgesetze, hergeleitet. Diese können dann von eindimensionalen parametrisierten Modellen benutzt werden. Der Vorteil dieser Modelle liegt in dem niedrigen Anspruch an Rechenressourcen, weshalb sie bis heute von vielen Forschern benutzt werden. Einfache Skalierungsgesetze wurden bereits in den letzten Jahrzehnten für kleine bis erdgroße Planeten hergeleitet. Für massereichere Planeten können diese Skalierungsgesetze nicht mehr benutzt werden. In unserem Projekt leiten wir allgemein anwendbare Skalierungsgesetze her. Bei druckabhängigen Rheologien scheint ein simples globales Skalierungsgesetz nicht ausreichend zu sein, da sich die Abhängigkeiten von Geschwindigkeit und Wärmetransport stark mit der Tiefe verändern und nicht global beschrieben werden können. Eine besondere Rolle spielt dabei der untere Mantel, welcher bei sehr massereichen Planeten in einem rein konduktiven Regime ist, was von uns Low-Lid genannt wird [2]. Wir konnten bereits zeigen, dass ein Low-Lid entsteht, wenn die Viskosität mit der Tiefe um den Faktor 10^5 zunimmt [2]. Interessanterweise wurde bereits eine gleiche Klassifikation für die Lithosphäre (stagnierendes oberes Lid) festgelegt. Es ist überraschend, dass die Lithosphäre und das Low-Lid eine ähnliche Abhängigkeit von der Viskosität aufzeigen, obwohl die Lithosphäre durch die kalten Oberflächentemperaturen entsteht, während das Low-Lid durch den hohen Druck an der Kern-Mantel-Grenze gebildet wird.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes liegt auf dem Vergleich zwischen dem exponentiellen Arrhenius Gesetz für die Berechnung der Viskosität im Mantel und einer stark vereinfachten, jedoch sehr beliebten Viskositätslinearisierung, der Frank-Kamenetskii (FK) Approximierung. Diese Approximierung entsteht durch eine einfache Anwendung der Taylor-Reihenentwicklung um einen vorher bestimmten Linearisierungspunkt (an dem die Ap-

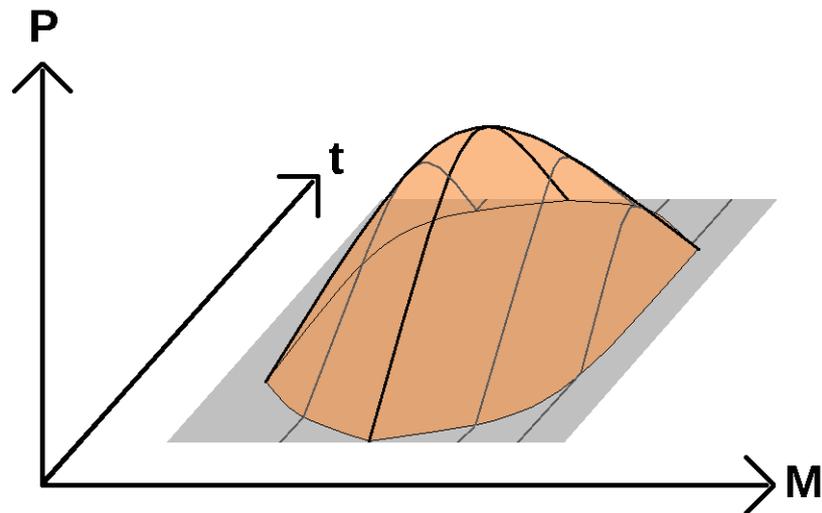


Abbildung 1: Tendenz (P; engl. propensity) der Plattentektonik auf Super-Erden abhängig von Zeit (t) und Masse (M).

proximierung exakt ist) und reduziert den Viskositätskontrast im Mantel. Bisher wurde diese Approximierung jedoch nur für temperaturabhängige Rheologien hergeleitet. Entweder wurde der Druck vernachlässigt, oder der Druck wurde in die einfache temperaturabhängige Approximierung eingesetzt, was zu falschen Ergebnissen führt. Oder die Effekte der Druckabhängigkeit wurden einfach geraten. Wir konnten zeigen, dass für die Benutzung eines realistischen Druckes bei einigen Simulationen die Approximierung nicht benutzbar ist. Wir haben jedoch eine neue FK Approximierung höherer Ordnung hergeleitet. Sie führt in allen untersuchten Fällen zu der gewünschten Genauigkeit und behält die Vorteile der FK Approximierung (kleiner Viskositätskontrast im Mantel) bei [3]. Die Herleitung der Skalierungsgesetze für temperatur- und druckabhängige Rheologien ist daher unabhängig von dem benutzten Viskositätsgesetz, falls die komplexere FK Approximierung benutzt wird.

Weitere gängige Vereinfachungen bei der Simulation der Mantelkonvektion sind die Vernachlässigung der Kompressibilität des Mantelgesteins sowie die Reduktion eines nichtlinearen Kriechverhaltens des Gesteins im oberen Mantel auf eine Newtonsche Rheologie, bei der die Viskosität des Mantels spannungsunabhängig berechnet wird. Skalierungsgesetze wurden bisher lediglich für inkompressible und meist Newtonsche Rheologien hergeleitet. Diese Vereinfachungen sind für Planeten inakzeptabel, welche größer als die Erde sind. Die Skalierungsgesetze werden daher im Rahmen unseres Projektes an realistischere Gegebenheiten angepasst, die nichtlineare Rheologie wird am Planeten Merkur [4] getestet.

Mehr zum Thema

1. Stamenkovic, V., L. Noack und D. Breuer, 2010: Low-lid formation on Super-Earths and implications for the habitability of Super-Earths and Sub-Earths. EGU General Assembly 2010, Geophys. Res. Abstracts 12, EGU2010-9380.
2. Noack, L., V. Stamenkovic und D. Breuer, 2010: Pressure-Dependent Viscosity on Sub-Earths and Super-Earths. EGU General Assembly, Vienna, 2010.
3. Noack, L. und D. Breuer, 2010: Damped Frank-Kamenetskii Approximation for Temperature- and Pressure-Dependent Rheologies and Consequences for the Simulation of Super-Earths. Geodynamik Workshop Münster, 06.-08.10.2010.
4. Grott, M., H. Hussmann, J. Oberst und M. Wählisch, 2009: Terrestrial Planets and Satellites: Geodetic and geophysical data. Landolt-Börnstein VI B, Springer, 182-199.

Förderung

HGF-Forschungsallianz "Planetary Evolution and Life"