

Zusammenfassung:

Das gegenwärtige Klima der Erde ist nicht repräsentativ für die längerfristigen Klimabedingungen, die auf der Erde seit 600 Millionen Jahren geherrscht haben. Paläoklimatische Untersuchungen (geobiowissenschaftlicher Archive) zeigen, dass ein viermaliger Wechsel von "Icehouse" und "Greenhouse" stattgefunden hat. Wir leben heute seit ca. 55 Millionen Jahren in einem kalten Klimazustand (Icehouse), der sich allmählich entwickelte. Vor 30 Millionen Jahren kam es zur Eisbildung auf dem Südpol und die Vereisung beider Polkappen ist erst seit ca. 2,8 Millionen Jahren festzustellen.

Die heutige Oszillation mit Perioden von jeweils ~ 100.000 Jahren mit Kalt- (80.000 Jahre) und Warmzeiten (~ 20.000 Jahre) kann mit Sicherheit erst seit ca. 800.000 Jahren beobachtet werden. Diese Klimavariabilitäten auf verschiedenen Zeitskalen sind wesentlich zum Verständnis der Klimadynamik und beherrschen auch unsere heutige Warmzeit seit 11.660 Jahren B.P. Sie geschehen auf Skalen von Jahren, die hochfrequenten Schwankungen sind in niedrigfrequenten Wechseln "genestet".

Diese natürliche Klimavariabilität ist Basis für die Erkennung eines anthropogenen Einflusses, der heute in der Diskussion aufgrund von Modellen im Vordergrund steht. Die Detaildiskriminierung der Ursachen dieses multikausalen Klimageschehens steckt noch in den Anfängen. Verschiedene Versionen werden vor dem Hintergrund natürlicher Variabilitäten diskutiert.

Mit der Entstehung der Erde haben sich Lithosphäre, Pedosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre in Wechselwirkung entwickelt, wobei die Biosphäre im Übergang zur Photosynthese einen wesentlichen Sprung zur Entwicklung höherer Lebewesen gemacht, wie sie auch für die Reduzierung des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre und Hydrosphäre gesorgt hat. Klima als ein komplexes Wirkungsgefüge aller Abläufe auf der Erdoberfläche einschließlich vulkanischer Großereignisse und von Meteoriteneinschlägen ist demnach als ein offenes, z. T. chaotisches System zu begreifen, wobei sich in der längerfristigen Erdgeschichte viele Rahmenbedingungen z. T. dramatisch verändert haben. Das Modell GAIA versucht dieses Gesamtsystem Erde als eine Art selbstregulierenden Mechanismus darzustellen. "Herausforderungen" in Form der Veränderungen klimarelevanter Parameter werden durch Antworten in der Art und Weise eines "Thermostaten" geregelt, so dass sich durch die Erdgeschichte der letzten 600 Millionen Jahre die "Klimabedingungen" in einer Weise entwickelt haben, dass man von relativ konstanten, Leben ermöglichenden Umständen sprechen kann.

Das schließt tiefgreifende Veränderungen nicht aus. So hat die Erde seit 600 Millionen Jahren 4 warme und 4 kalte Klimamodi durchlebt, d. h. ohne und mit Polkappenvereisungen. Seit 55 Millionen Jahren befinden wir uns in einem Modus der Abkühlung, der seit 2,8 Millionen Jahren auch zu dem heute herrschenden relativ einmaligen Zustand einer bipolaren Vereisung geführt hat.

Aus der Untersuchung der Erdgeschichte lässt sich u. a. entnehmen, dass die Kopplung verschiedenster geologischer Prozesse, so der sich durch Kontinentaldrift (Plattentektonik und Ozeanbodenspaltung) ergebenden Wanderung von Kontinenten in Polarregionen, eine Isolation des Pols vom "ozeanisch-atmosphärischen Wärmeaustauscher" verursacht und somit Ort möglicher Abkühlung durch die Strahlungsbedingungen wird. Dies ist wahrscheinlich eine der Basishypothesen für den Klimamodenwechsel der letzten 600 Millionen Jahre, also für Zeiten mit und ohne Polkappenvereisung. Zugleich ist auffällig,

dass die 4 kalten Klimamodi (Pol- und Gebirgsvergletscherung) mit Zeiten von Gebirgsbildungsphasen, der unterschiedlichen Verteilung von Kontinenten und Ozeanen und gekoppelten Meeresspiegelschwankungen sowie der Änderung der Kontinentflächen im Verhältnis zum Meeresraum zusammenfallen. Abb. 1 demonstriert diese komplexen Zusammenhänge für die letzten 65 Millionen Jahre, also die Zeit der "Eiszeit", in der wir heute leben.

Demnach scheinen tektonische Prozesse mit Zeitskalen von 10^5 bis 10^7 Jahren, periodische Zyklen durch orbitale Prozesse mit 10^4 bis 10^6 Jahren Zyklizität und seltene, aberrante schnelle Klimaverschiebungen und extreme Klimaumschwünge mit 10^3 bis 10^5 Jahren Dauer Ursache zu sein. Besonders seit 2,8 Millionen Jahren sind die sog. Milankovič-Zyklen erkennbar, seit 800.000 Jahren mit Periodizitäten von ca. 100.000 Jahren mit ausgeprägten Warmzeiten von ca. 15.000 bis 20.000 Jahren. Wir leben also heute in einem kalten Klimamodus, auch Eiszeit aufgrund der Polkappenvereisung genannt. Innerhalb einer solchen Eiszeit wechseln Warm- und Kaltzeiten mit Eis an den Polen und Grönland bzw. Eis an den Polen mit weiter südlicher Ausdehnung auf den nordhemisphärischen Kontinenten ab. Diese Erkenntnisse wurden erst 1875 zur Gewissheit. Erst seit dieser Zeit gibt es eine Eiszeittheorie, die bis heute viele Unsicherheiten birgt (Tab. 1, Tab. 2).

Tab. 1: Klima und Klimamessung

KLIMA

Def.: Langzeitverhalten atmosphärischer Größen in globaler Verteilung

Mittelung > 30 Jahre

heute: jenseits der Wettervorhersage

Was wird gemessen?

seit ca. 150 Jahren

Meteorologische Messwerte

Temperatur, Niederschlag, Feuchtigkeit etc.

seit ca. 3.000 Jahren

(lückenhaft, zufällig, Extremereignisse)

Historische Aufzeichnungen über:

Fluten, Dürren, Kälteperioden (zugefrorene Seen), Winterstrenge, andere Beobachtungen, Beispiel: Temperaturverlauf seit 1100

von heute in die Erdgeschichte zurück in verschiedenen Archiven mit 1-, 10-, 100-jähriger Auflösung
(→ Millionen Jahre)

Proxy- bzw. Stellvertreterdaten

Proxies für Niederschlag, Temperatur etc. in verschiedenen Archiven; über Multiproxy-Parameter-Netzwerke erfolgt die Ableitung von Klimavariablen

Klima-Archive:

(als "geo-biowissenschaftliche" Messinstrumente in allen Klimaarealen)

Baumringe, Speleotheme, Eis, Korallen, See- und Meeressedimente

Tab. 2: Klimavariabilität

Klimavariabilität (regelmäßig – unregelmäßig)			
kurzfristig ± rezent, basierend auf meteorologischen Messreihen	mittelfristig in meteorologi- schen Messreihen und Proxydaten	langfristig (Proxydaten)	ultralangfristig
NAO 5 – 7 Jahre ENSO El Niño QBA 2 Jahre	Warvierte Seesedimente (Dickenvariationen), Eis, ¹⁴ C in Baumringen, Speleo- themdicken, kosmogene Isoto- pe, 11, 22, 88, 210, ~ 500, 1050, ~ 1500, 2500 Jahre z. B. kleine Eiszeit, Holozänes Klimaoptimum, Dansgaard/Oeschger-Zyklen, Heinrich-Events	Wechsel von Warm- und Kaltzeiten, z. B. im Quartär 19.000, 23.000, 41.000, 100.000, 413.000	z. B.: Vereisung der Nordhemisphäre seit ca. 2,7 Millionen Jahren, Entwicklung des Monsuns in Asien
Mögliche Ursachen: Rotation der Erde, Atmosphärenbewe- gung, Ozeanströme, Treibhausgase, troposphärische Aero- sole (SO ₄), vulkan. Aerosole, CO ₂ -Senken, Albedo-Änderungen, solar	Mögliche Ursachen: Jahre – Jahreszeiten (Rotation der Erde) orbitale Parameter solar (Strahlungsdifferenzen?), da mit Sonnenfleckenaktivität korreliert Änderung thermohaliner ozea- nischer Zirkulation	Mögliche Ursachen: orbitale Parameter (Insolation) Milankovič-Zyklen Präzession, Schiefe, Exzentrizität	Mögliche Ursachen: Schließung der Panamastraße, Hebung von Tibet

Vor ca. 21.000 Jahren war das Maximum der letzten großen Vereisung, seitdem schmilzt das Eis besonders auf der Nordhalbkugel zurück, der Meeresspiegel ist seitdem um ca. 110 m angestiegen, und die ehemals vom Eis bedeckte Fläche hebt sich heraus (z. B. Hebung Skandinaviens).

Eine integrierte Klimasystemanalyse ist also immer eine Paläoklimaanalyse, da bei Prozessen über einige Jahre hinweg (> 10 Jahre) alle beteiligten Systeme (Atmosphäre, Ozean) und Klimasubsysteme (Eis, Vegetation, Boden etc.) und ihre externe und interne Anfachung (Insolation, Albedo, Treibhausgase) involviert sind.

Damit steht man vor zwei Problemen. Erstens gibt es keine direkten Klima-Messdaten für die Vergangenheit vor ca. 300 Jahren, und zweitens kann man keine Experimente vornehmen, sondern um Klima zu verstehen, benötigt man Klimamodelle, wobei diese bisher im wesentlichen von meteorologischen Überlegungen ausgegangen sind, also den heutigen Zustand beschreiben, aber nur vereinzelt die Vielfalt der im Klimasystem enthaltenen Komponenten einbeziehen. Das Projekt "Natürliche Klimavariationen in historischen Zeiten bis 10.000 Jahre vor heute" (KIHZ), ein Strategiefondsprojekt der Helmholtz-Gemeinschaft, versucht erstmals, eine physikalisch konsistente, räumliche und

zeitliche Interpolation von Proxydaten zu erreichen, indem Klimazustände in einem globalen Computermodell in die Nähe der aus Proxydaten abgeleiteten Zustände gezwungen werden (Datenassimilation). Diese basieren auf Beziehungen zwischen Proxydaten und großräumigen Klimaanomalien mit Ausdehnungen von mehreren tausend Kilometern (upscaling).

Da Proxydaten keine meteorologischen Größen darstellen, müssen aus ihnen durch Transferfunktionen oder über das obige Verfahren Klimaparameter abgeleitet werden. Somit wird auf die in Abb. 2 vermerkten Proxydaten zurückgegriffen, die quasimeteorologische Messreihen ergeben. Die orbitalen Parameter stellen die niederfrequenten Klimaschrittmacher dar, wobei wir heute seit 11.600 Jahren in einer Warmzeit leben. Sie ist Anfang einer möglicherweise 50.000 Jahre andauernden Warmzeit, da die Interferenz der Laufbahnparameter der Erde eine Situation ergeben hat, in der die Erdbahn nahezu einen Kreis statt einer Ellipse darstellt, was ca. alle 400.000 Jahre auftritt (Loutre & Berger 2000).

Das Holozän, also die Zeit seit 11.600 Jahren, zeigt nicht die extremen Klimaschwankungen während der Kaltzeit, sie sind jedoch größer als bisher angenommen. So lässt sich aus verschiedensten Archiven entnehmen, dass im Früh- und Mittelholozän ein Klimaoptimum festzustellen ist, dass "wärmer" als heute war. Selbst während des letzten Millenniums hat es klare Klimaschwankungen gegeben, und in der Römerzeit muss zu mindestens im Alpenraum ein wärmeres Klima als heute geherrscht haben, da der große Aletsch-Gletscher weiter zurückgezogen war (Abb. 3). Aufgrund von Archiven mit annueller und saisonaler Auflösung (Baumringe, warvierte Seesedimente) kann vermutet werden, dass solare Einflüsse bei den hochfrequenten Schwankungen des Holozäns als Ursache beteiligt waren. Verschiedene Modelle weisen darauf hin, dass von den letzten 1000 Jahren die Klimaschwankungen der ersten zwei Drittel solar, danach solar und vulkanogen und die letzten 150 Jahre immer stärker anthropogen überprägt zu sein scheinen. Das ist besonders seit 1970 der Fall, wie eingehend im letzten IPCC-Bericht dargestellt wird.

Die durch Klimamodelle simulierte Szenarien durch anthropogenen Einfluss (im wesentlichen CO₂), besonders seit 1970 sichtbar, prognostizieren einen Temperaturanstieg zwischen 1,5 und 4,5 °C, wobei man sich bewusst bleiben muss, dass es sich um Szenarien handelt, die auf vereinfachten Annahmen beruhen. Das Klimasystem ist aber bei weitem komplexer und wird auch in Zukunft Überraschungen bereithalten. Man sollte nicht übersehen, dass bisher das GAIA-System wie ein "Thermostat" gewirkt hat und dass möglicherweise "Pufferungsmöglichkeiten" entdeckt werden, die bisher übersehen wurden (u. a. Auftreten und Verbreitung der C₄-Pflanzen mit höherem Wasserspeichervermögen, somit geringerer Wolkigkeit verknüpft, was Abkühlung bedeuten würde [Die Wolken stellen ca. 50 % des primären Treibhauseffekts], CO₂-Speicherung in Boden und Vegetation).

Resultat:

Das Klimasystem ist ein hochkomplexes System mit vielfältigen Ursachen, die sich verstärken aber auch abschwächen können.

- Es ist fraglich, inwieweit der Mensch das Klima beeinflusst hat und beeinflusst.
- Seit 1970 scheinen Temperaturwerte auf einen menschlichen Einfluss zu deuten.
- Variabilitäten waren jedoch allein seit römischer Zeit bis in kleine Eiszeit größer.
- Der Mensch reagiert z. B. auf den Meeresspiegelanstieg seit 1000 Jahren an der Nordsee mit Änderung von Flachsiedlung über Küstenbau bis zur Eindeichung. Der Meeresspiegel hebt sich seit 22.000 bis 18.000 Jahren vor heute von -110 m auf das heutige Niveau und oszilliert. Es handelt sich hier um einen linearen, vom Menschen

unbeeinflussten Anstieg von 20 cm pro Jahrhundert!

- Die sog. Eem-Warmzeit – der heutigen seit 11.600 Jahren vor heute etwa vergleichbar – hatte einen etwas höheren Meeresspiegel als heute, der generelle Verlauf war an der Nordseeküste ähnlich.
- Der Mensch ist dem Klima "gefolgt" und wird das auch in Zukunft tun.
- Jedoch: Plötzliche Klimaänderungen wie in der Jüngeren Dryas – Kälteeinbruch für ca. 1100 Jahre – könnte Systeme unanpassungsfähig machen.

Die Jüngere Dryas trat innerhalb von 25 Jahren (Messwert aus Warven der Eifel) in Mitteleuropa ein und erzeugte einen Temperaturrückgang um ca. 6 bis 7 °C! Sie endete in 60 Jahren mit einer Erwärmung auf das heutige Temperaturniveau.

Das Klima ist zur Zeit unberechen- und unkalkulierbar (Tab. 3).

Tab. 3: Ursachen für Klimawechsel

1. Die Erde hat seit 600 Mio. Jahren 4 Warm- und 4 Kaltzeiten durchlaufen.
 2. Ursache für eine Eiszeit, d. h. Polvereisung, ist die Isolation der Polregion vom Wärmeaustauscher Ozean.
 3. Mechanismus: Kopplung der Kontinentdrift (Plattentektonik und Ozeanbodenspaltung) – Gebirgsbildung – Polvereisung – Meeresspiegelabsenkung – Phase der Kontinentalität.
 4. Seit 55 Mio. Jahren ⇒ Kaltzeit (Temperaturabnahme), Hebung von Tibet, Monsunentwicklung.
Seit 2,8 Mio. Jahren ⇒ bipolare Vereisung (Sonderzustand), Schließung der Straße von Panama.
Seit ca. 800.000 Jahren ⇒ deutliche orbitale Variabilitäten ⇒ Milankovič-Zyklen (65° N stärkste Auswirkung, deshalb dort Gletscherbildung).
Genestet: Sub-Milankovič-Zyklen, wahrscheinlich solar (11, 22, 88, 210, 510, 1050 Jahre) zusätzlich saisonale Variabilitäten in nördlicheren Breiten.
 5. Klimaschrittmacher:

natürlich:	Plattentektonik (langfristig) Orbitale Ursachen (langfristig) Solare Ursachen (kurzfristig)
gekoppelt:	Polare Vereisungen Meeresspiegelschwankungen Meteoriteneinschläge (groß – klein) Vulkanische Gase (Eruptionen) (tropisch – nichttropisch) Staubstürme (Sahara)
- Variabilitäten innerhalb des Klimasystems, z. B. NAO (Nordatlantische Oszillation), ENSO (La Niña, El Niño)
- anthropogen: Atmosphärische Gase (CO₂, CH₄, N₂O, O₃, CFCS), Aerosole, Vegetationsänderung durch Landnutzung

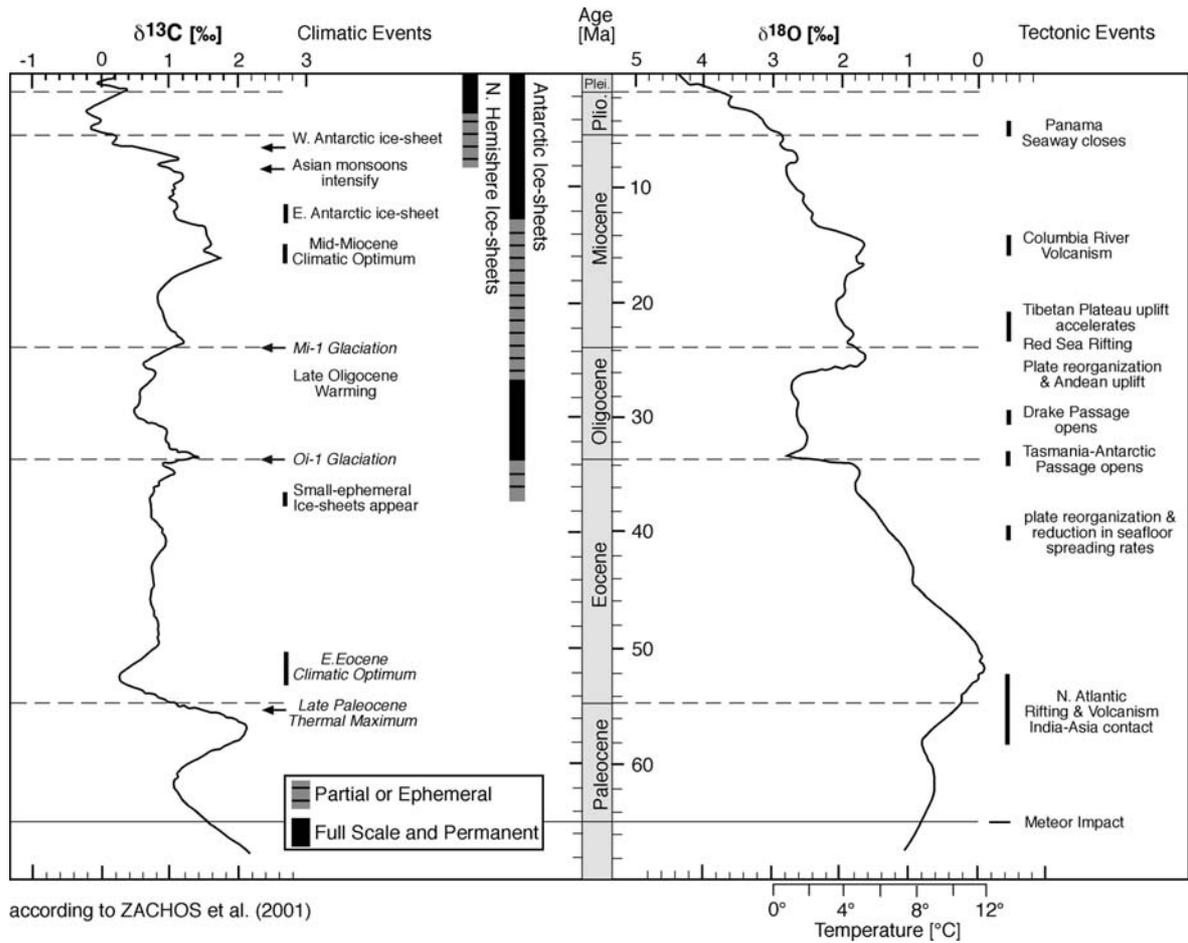


Abb. 1: Die Klimaentwicklung während des Känozoikums (kalter Klimamodus) und ihre möglichen Ursachen.

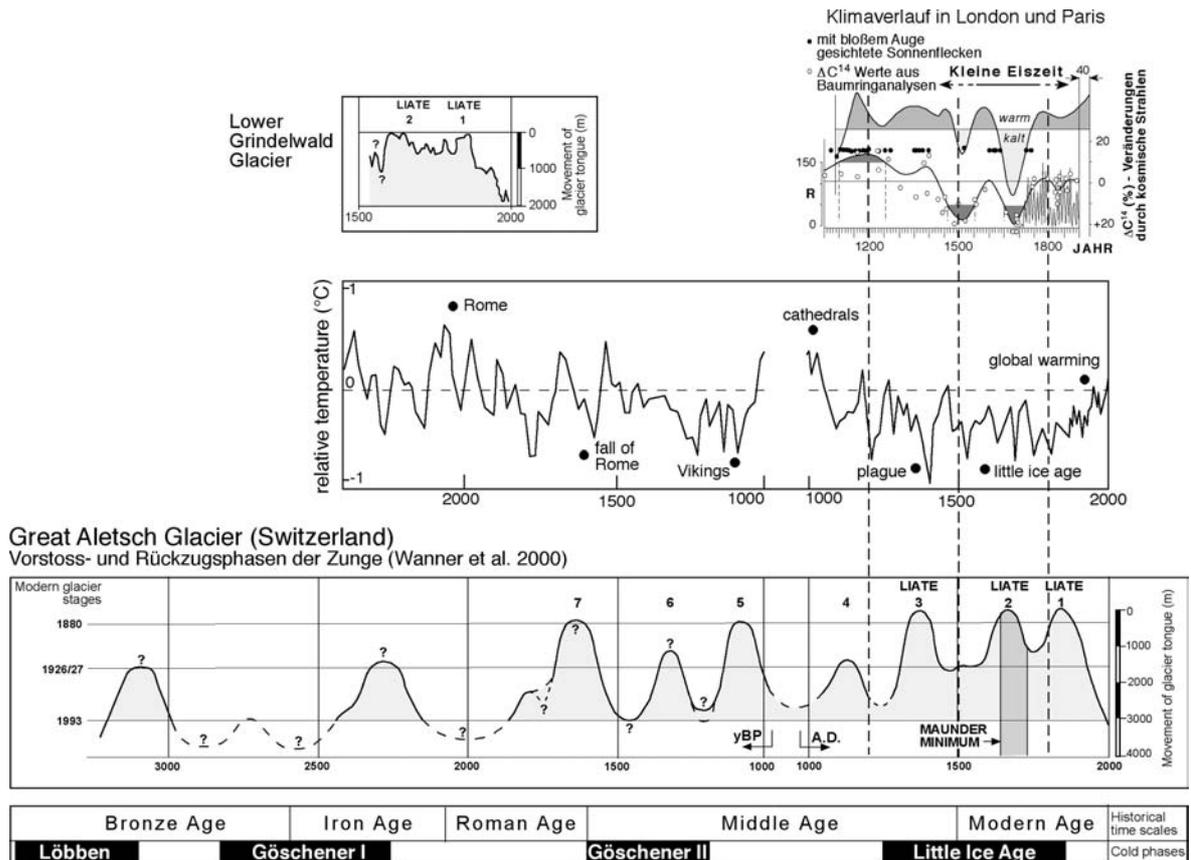


Abb. 3: Der Aletsch-Gletscher und seine Vorstoß- und Rückzugsphasen im Vergleich zum "relativen Temperaturverlauf" des Grönlandeises und zum Klimaverlauf in London und Paris während des letzten Millenniums.

Literatur:

Loutre, M. F. & Berger, A. (2000): *Future climatic changes: Are we entering an exceptionally long Interglacial?* Climatic Change 46: 61-90.

Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. & Billups, K. (2001): Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* 292: 686-693.

Prof. Dr. Jörg F. W. Negendank ist Direktor des Aufgabenbereiches „Struktur und Evolution der Lithosphäre“ am GFZ Potsdam