

DETERMINATION OF
A CONSISTENT VISCOSITY DISTRIBUTION
IN THE EARTH'S MANTLE
BENEATH NORTHERN AND CENTRAL EUROPE

vorgelegt von
Holger Steffen

DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades
im Fachbereich Geowissenschaften
am Institut für Geologische Wissenschaften
der Freien Universität Berlin
Berlin, 2006

Tag der mündlichen Prüfung:

1. Gutachter:

2. Gutachter:

5. Dezember 2006

Prof. Dr. Georg Kaufmann

Prof. Dr. Serge A. Shapiro

Zusammenfassung

Während der letzten Eiszeit bedeckten große Eisschilde Nordamerika, Grönland, Nordeuropa, Teile Asiens und die Antarktis. Das Wachstum der Eisschilde begann nach dem letzten Interglazial vor etwa 125.000 Jahren. Ihre größte Ausdehnung erreichten die Eisschilde zum Letzten Glazialen Maximum (LGM) vor ca. 22.000 Jahren v. h. und durch ihr Gewicht drückten sie die darunterliegende Erdoberfläche nach unten. Im Anschluss an das LGM verschwanden die Eisschilde relativ schnell, aber die deformierte Erde stellt sich immer noch aufgrund der zeitabhängigen viskoelastischen Eigenschaft des Erdmantels auf ein neues isostatisches Gleichgewicht ein. Diese Ausgleichsbewegung wird heute noch beobachtet. Dabei stellen u.a. alte Küstenlinien (Meeresspiegeldaten) und die derzeitigen Krustenbewegungen wichtige Beobachtungen dar.

Diese Arbeit bedient sich einer Vielzahl von Meeresspiegeldaten aus Nord- und Mitteleuropa und den durch das skandinavische BIFROST-Projekt mittels GPS beobachteten Krustengeschwindigkeiten. Die Daten werden genutzt, um unterhalb dieses Gebietes die Viskositätsstruktur im Erdmantel mit Hilfe eines realistischen Eismodells und verschiedener Rechentechiniken, wie einer Inversionsmethode und der Finite-Element-(FE)-Modellierung, zu untersuchen. Dabei wird auf die folgenden Regionen und Strukturen eingegangen: (i) der Erdaufbau unter Skandinavien, insbesondere mit Augenmerk auf einen niedrigviskosen Kanal im obersten Mantel, der in diversen Veröffentlichungen diskutiert wird, (ii) das post-glaziale Verhalten der Nordsee anhand neuer, erst kürzlich veröffentlichter Meeresspiegeldaten, und (iii) die dreidimensionale Struktur des Mantels, die aus einem Scherwellen-Tomographiemodell und unterschiedlichen thermodynamischen Annahmen berechnet wurde. Des Weiteren wird eine Sensitivitätsanalyse mit einem FE-Modell und dem BIFROST-Datensatz durchgeführt, und die Wasserlast des Hohenwarte-Stausees in Thüringen genutzt, um den Mantelaufbau zu untersuchen. Dabei werden vorher erzielte Ergebnisse in das FE-Modell einbezogen.

Die Ergebnisse der Inversionsmethoden deuten auf eine niedrigviskose Schicht unter der Barentssee hin. Sie befindet sich zwischen 120 und 200 km Tiefe und ist durch Viskositäten von 10^{19} - 10^{20} Pa s gekennzeichnet. Unter Skandinavien kann eine solche Zone nicht nachgewiesen werden, während für Nordwesteuropa keine zweifelsfreie Aussage dafür oder dagegen möglich ist. Die Mächtigkeit der Lithosphäre nimmt von etwa 60 - 70 km unterhalb von Nordwesteuropa und der Barentssee in Richtung Skandinavien zu. Unter der Nordsee ist sie ca. 90 km mächtig, in Skandinavien 120 km. Zusätzlich wird das relativ stabile Verhalten des London-Brabanter Massives, das sich am Rand des Gebietes mit anhaltender Ausgleichsbewegung befindet, während und nach der Eiszeit bestätigt. Dagegen zeigt die südliche Nordsee von den Niederlanden bis nach Norddeutschland eine deutliche Beeinflussung durch die isostatische Ausgleichsbewegung.

Mit den FE-Modellierungen können Unterschiede von bis zu 7 mm/a zwischen den berechneten vertikalen Krustenbewegungen der ein- und dreidimensionalen Erdmodelle ermittelt werden. Die Horizontalkomponenten werden noch stärker beeinflusst: Mit dem besten dreidimensionalen Erdmodell findet man zusätzlich zu der bekannten divergenten Ausgleichsbewegung ein regionales Geschwindigkeitsfeld von der norwegischen Küste zum Baltischen Schild hin. Durch eine Sensitivitätsanalyse zeigt sich, dass dieses in der Übergangszone zwischen 450 und 670 km Tiefe entsteht. Weitere spezielle Sensitivitätsa-

Analysen zum oberen Mantel mit dem realistischen Eismodell zeigen, dass die Vertikalgeschwindigkeiten generell an Viskositätsvariationen zwischen 220 und 540 km Tiefe gekoppelt sind, die Horizontalgeschwindigkeiten dagegen an die Übergangszone. Die durch die Wasserlast des Hohenwarter-Stausees induzierten Deformationseffekte können auf eine instantane elastische Krustendeformation zurückgeführt werden. Die Wasserlast des Stausees ist damit zu gering, um Aussagen über die Beschaffenheit des Erdmantels in diesem Gebiet machen zu können.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die beobachtete Ausgleichsbewegung in Nord- und Mitteleuropa keine Rückschlüsse auf die Viskosität im unteren Erdmantel zulässt. Für eine genauere Bestimmung der dreidimensionalen Struktur der Erde in diesem Gebiet bedarf es weiterer Beobachtungsdaten wie Meeresspiegeldaten und Krustengeschwindigkeiten, aber auch hochauflösender seismischer Profile.

Abstract

During the last ice age, large ice sheets covered North America, Northern Eurasia, Greenland and Antarctica. The ice sheets expanded slowly between 125,000 years BP and the last glacial maximum around 22,000 years BP to their maximum size, and depressed the solid Earth underneath. Subsequent to the last glacial maximum, the ice sheets disappeared rapidly and the solid Earth is readjusting towards a new isostatic equilibrium. Due to the time-dependent viscoelastic behaviour of the Earth's mantle this process, called glacial isostatic adjustment (GIA), is still observable today. It is documented in numerous observations, such as palaeo-shorelines and ongoing crustal movements.

In this work, palaeo-shoreline data from Northern and Central Europe, as well as crustal velocities from the BIFROST GPS campaign, are used to infer the viscosity structure of the Earth's mantle underneath this area. The following regions or structures are investigated with the help of a realistic ice model and different techniques such as a global inverse procedure and Finite Element (FE) modelling: (i) the Earth's structure beneath Scandinavia, including the search for a low-viscosity zone in the upper mantle, which has been proposed in the literature, (ii) the post-glacial behaviour of the North Sea area with new, recently published sea-level data, and (iii) the three-dimensional (3D) structure of the mantle derived from a seismic shear-wave tomography model and different thermodynamic considerations. Furthermore, a sensitivity analysis of the BIFROST data to variations of the mantle viscosity is made, and in a regional study the mantle structure in Thuringia, Germany, based on former results, is investigated with a FE model and the water load of the Hohenwarte reservoir.

The results from inverse procedures indicate a low-viscosity zone underneath the Barents Sea, with viscosities between 10^{19} - 10^{20} Pa s in a depth interval of 120 - 200 km. No such low-viscosity zone is found underneath Scandinavia, and there is no clear indication for such a zone underneath northwestern Europe. The thickness of the rheological lithosphere increases from 60 - 70 km underneath northwestern Europe and the Barents Sea towards 90 km underneath the North Sea area and finally to values exceeding 120 km underneath Scandinavia. In addition, it is confirmed that the Belgian crust (London-Brabant massif), which is in the periphery of the GIA area, was fairly stable during and after the last ice age and insensitive to GIA. The southern North Sea region including the Netherlands and northwestern Germany, however, has a strong GIA-induced signal.

The FE modellings reveal that between 3D and one-dimensional earth models the vertical crustal velocities have differences of up to 7 mm/yr, and that horizontal crustal velocities are affected even stronger. The horizontal motions of the best 3D earth model indicate a regional velocity field with movements away from the Norwegian coast towards the old Baltic Shield. A sensitivity analysis shows that the dramatic change in the horizontal flow pattern has its origin in the deeper upper mantle, between 450 and 670 km depth. The detailed sensitivity analysis of the upper mantle with the realistic ice-sheet model reveals that the present-day uplift velocity is mostly sensitive to viscosity variations in upper-mantle layers between 220 and 540 km depth. For the present-day horizontal velocity, the sensitivity is strongly influenced by lateral viscosity variations in the transition zone of the mantle. The FE modelling concerning deformation effects caused by the water load of the Hohenwarte reservoir, shows that effects are mainly induced by instantaneous elastic deformation, which indicates the insensitivity of the water

load of the reservoir to the time-dependent relaxation of a realistic mantle model.

All methods and investigations confirm that the observed GIA process in Northern and Central Europe is not sensitive to the viscosity structure in the lower mantle. The determination and understanding of the Earth's 3D structure needs more observational data, from geological records to seismic profiles, for a clearer view.

Contents

Zusammenfassung	i
Abstract	iii
1 Introduction	1
1.1 Concept of the thesis	6
1.2 Outline of the thesis	7
2 Glacial isostatic adjustment of Scandinavia and northwestern Europe and the radial viscosity structure of the Earth's mantle	11
2.1 Introduction	11
2.2 Theory	14
2.3 Ice and ocean models	14
2.4 Observational data	15
2.5 Results	17
2.5.1 Three-layer models	17
2.5.2 Multi-layer models	20
2.5.3 Comparison with sea-level observations	24
2.6 Discussion	25
3 Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of north-western Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea)	27
3.1 Introduction	28
3.2 Sea-level observational data: an overview	29
3.2.1 Nature and constraints of the applied sea-level observational data	29
3.2.2 The database	31
3.2.2.1 Belgium	32
3.2.2.2 The Netherlands	34
3.2.2.3 North-western Germany	36

3.2.2.4	The southern North Sea	37
3.3	Comparison of north-western European sea-level curves: relative isostatic subsidence . . .	39
3.4	Geodynamic modelling	43
3.4.1	Earth model	44
3.4.2	Ice model	44
3.5	Observational data	44
3.6	Results	46
3.6.1	Model results without compaction corrections in the observational dataset	46
3.6.2	Model results with compaction corrections in the observational dataset	49
3.6.3	Comparison with sea-level observations	50
3.7	Conclusions	55
4	Three-dimensional finite-element modeling of the glacial isostatic adjustment in Fennoscandia	59
4.1	Introduction	60
4.2	FE-model geometry	62
4.3	Ice load	64
4.4	Earth models	64
4.4.1	1D viscosity profiles	65
4.4.2	3D viscosity structures	66
4.5	Results	70
4.5.1	1D earth model	70
4.5.2	3D earth models	72
4.5.3	Sensitivity of GIA predictions to upper-mantle viscosity structure	76
4.6	Conclusions	78
5	Sensitivity of crustal velocities in Fennoscandia to radial and lateral viscosity variations in the mantle	81
5.1	Introduction	81
5.2	FE-Modelling	83
5.2.1	Earth models	83
5.2.2	Ice load	85
5.3	Results	86
5.3.1	Coarse model (1000 km × 1000 km block models, central area)	87
5.3.2	Intermediate model (1000 km × 1000 km block models, whole area)	89
5.3.3	Fine model (600 km × 600 km block models)	90

5.3.4	Sensitivity of blocks in selected distances	90
5.3.5	Effects on BIFROST stations	91
5.4	Conclusions	98
6	Numerical modelling of deformation changes induced by lake-level fluctuations of the Hohenwarte reservoir, Thuringia, Germany	101
6.1	Introduction	101
6.2	Saale Kaskaden	102
6.3	Geodynamic Observatory Moxa	103
6.4	Model description	104
6.4.1	Geometry	104
6.4.2	Boundary conditions	105
6.4.3	Water load	106
6.5	Results	107
6.5.1	Short-term seasonal variations	107
6.5.2	Long-term seasonal variations	110
6.6	Conclusions	112
7	Discussion	113
7.1	Results of the forward modellings	113
7.2	Results of the FE modellings	114
7.3	General conclusions	116
7.3.1	Lithospheric thickness	116
7.3.2	Upper-mantle viscosity	116
7.3.3	Lower-mantle viscosity	117
7.3.4	On the used ice model	117
7.3.5	On the database	117
7.3.6	Possible model improvements	119
	References	121
A	Appendix	131
	Acknowledgements	137

