

Vorläufige Bemerkungen zum möglichen Einfluß der Deformationsgeometrie der Mantellithosphäre auf die Entwicklung der Ostalpen seit der Kreide

Von Kurt STÜWE*)

Mit 3 Abbildungen

Zusammenfassung

Vertikale, isostatische Bewegungen der Kruste (Gebirgs- oder Beckenbildung) werden wesentlich von Änderungen des Mächtigkeitsverhältnisses von Kruste und Mantellithosphäre beeinflusst. Spezifische Betrachtung des Deformationszustandes *beider* Teile der Lithosphäre ist daher zur Interpretation von beobachteten isostatischen Bewegungen absolut notwendig. Entsprechendes gilt für die Interpretation der thermischen Geschichte. In diesem Zusammenhang wird vorgeschlagen, daß zur Erklärung der tertiären Tauernmetamorphose eine plötzliche Verdünnung der Mantellithosphäre unter der verdickten Kruste des Tauernfensters vor 30-40 Ma in Frage kommt. Solch eine Verdünnung könnte in einer seit der Kreide homogen verdickten Lithosphäre im gesamten Ostalpenraum passiert sein. Erscheinungen wie die Beschränkung der Tauernmetamorphose auf die penninischen Fenster, sowie synchrone Erscheinungen wie, unter anderen, der relativ plötzliche Sedimentationsbeginn in den Molassezonen und die laterale Extrusion der Ostalpen, werden im Licht dieses Modelles diskutiert.

Summary

Vertical movements of the crust are largely controlled by changes of the thickness ratio of crust and mantle lithosphere. Specific consideration of the deformative state of both parts of the lithosphere is therefore critical for the interpretation of isostatic movements. Respective considerations apply to the interpretation of thermal evolutions. Here, it is suggested that thinning of the mantle lithosphere under the Tauern window around 30-40 Ma may offer answers to a range of questions that cannot be resolved by consideration of thickness changes of the crust alone. The idea is not new, but it is shown here that a range of observations from *outside* the Tauern window can be explained as features that are associated with the subcrustal lithosphere evolution in the Tauern window. These features include, amongst others, the mid-Tertiary lateral extrusion of the Austro-alpin, the rapid onset of sedimentation in the Molasse zones and the fact that the Tauern metamorphic event is confined to the Penninic windows of the Eastern Alps.

1. Einleitung

In den letzten Jahren sind große Fortschritte bei der Entwicklung von plattentektonischen Modellen, die die Evolution der Ostalpen seit der Kreide beschreiben, gemacht

*) Adresse des Verfassers: Kurt STÜWE, Department of Geology, Adelaide University, GPO Box 498, Adelaide, SA 5001, Australien; Telefon 0061/8/228/5841; Fax 0061/8/232-0143.

worden (unter anderen: FRISCH, 1979; FRISCH et al., 1987; TOLLMANN, 1980; 1987; FRANK, 1987; NEUBAUER und GENSER, 1990; GENSER und NEUBAUER, 1989; RATSCHBACHER et al. 1991; NEUBAUER, 1989). In vielen dieser Modelle, insbesondere denen der deutschsprachigen Literatur, wird die Entwicklung von alpinen sedimentären Becken direkt mit der Verdünnung der Kruste durch Dehnung, sowie der Beginn von Aufstieg und Erosion der Ostalpen direkt mit Krustenverdickung durch Konvergenz in Zusammenhang gebracht. Diese direkte, unkritische Schlußfolgerung überrascht, weil wir wissen, daß plattentektonische Prozesse nicht die Konsequenz von Horizontalbewegungen der Kruste allein, sondern die der gesamten Lithosphäre sind, da die bewegungsantreibende Konvektion erst in der *darunterliegenden* Asthenosphäre stattfindet. Mehr noch: die *vertikalen* Bewegungen der Lithosphäre, die viele der von uns beobachteten geologischen Erscheinungen kontrollieren, sind Prozesse, die sich über der isostatischen Kompensationstiefe abspielen und diese liegt nicht an der MOHO, sondern definiert den Boden der mechanischen Lithosphäre. Es wäre daher vorzuschlagen, daß alle plattentektonische Modelle die Bewegungen der rheologischen Einheit der Gesamtlithosphäre und nicht nur die der Kruste in Betracht ziehen sollten. Wenn man dies tut, kann man sich durchaus Deformationsgeometrien vorstellen, die Aufstieg, Erosion und Gebirgsbildung auch während der *Verdünnung* der Kruste, sowie Beckenbildung auch während der *Verdickung* der Kruste zur Folge haben (siehe unten und Abbildung 2). Solche Deformationsgeometrien sind unwahrscheinlich und es soll hier auch nicht versucht werden, die Ostalpen im Lichte des Zuletztgesagten neu zu interpretieren. Es soll jedoch mit diesem Artikel versucht werden, diese Problematik erneut zusammenzufassen und einige Fragen aufzuwerfen, die in den Ostalpen ungelöst bleiben, weil Betrachtungen der Kruste allein die beobachteten Beziehungen zwischen thermischer- und Deformationsgeschichte nicht zu klären vermögen. Am Beispiel der tertiären Tauernmetamorphose soll gezeigt werden, daß die Betrachtung des Deformationszustandes der Mantellithosphäre möglicherweise Lösungswege zu einer Reihe ungeklärter Fragen eröffnen könnte, die die tertiären Ereignisse in den Ostalpen betreffen.

Detaillierte quantitative Überlegungen und numerische Modelle zu dieser Problematik sind an der Universität Adelaide, Australien, in Arbeit.

2. Physikalische Eigenschaften der Lithosphäre – eine Zusammenfassung

In den letzten Jahren sind viele quantitative Daten zu den isostatischen, thermischen und rheologischen Eigenschaften der Lithosphäre publiziert worden. Einige der für die folgende Diskussion wichtigen Daten sollen in diesem Abschnitt kurz zusammengefaßt werden, um jene Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Kruste und Mantellithosphäre herauszustrreichen, die die Basis für die folgende Diskussion bilden.

Es ist allgemein bekannt, daß sich die Erdkruste im oberen Teil spröde und im unteren Teil duktil verhält. Für den Mantelteil der Lithosphäre ist diese Teilung des Deformationsverhaltens weit weniger gesichert, aber es ist durchaus möglich, daß auch im obersten Erdmantel spröde Deformation vorherrscht. Diese Eigenschaften zu quantifizieren, ist erst in den letzten zwei Jahrzehnten gelungen (z. B.: BYERLEE, 1968; BRACE und KOHLSTEDT, 1980), und daher erst in den letzten Jahren erfolgreich zur Beschreibung des Verhaltens der Lithosphäre während der Gebirgsbildung herangezogen worden (z. B.: SONDER und ENGLAND, 1986; SANDIFORD et al., 1991). Es hat sich dabei gezeigt, daß die grobe Annahme, das Deformationsverhalten der Kruste mit den Eigenschaften von Quarz (Dichte = 2700

kg/m³) und jenes der Mantellithosphäre durch die Eigenschaften von Olivin (Dichte = 3300 kg/m³) zu beschreiben, in erster Annäherung zielführend ist. Die schematische Darstellung in Abbildung 1 zeigt, daß das Stärkeprofil der Lithosphäre durch diese erste Annäherung bimodal verteilt ist, daß also eine Schwächestelle der Lithosphäre im Bereich der MOHO liegt. Es ist daher vorstellbar, daß sich Kruste und Mantelteil der Lithosphäre getrennt deformieren können. Nichtsdestotrotz ist wichtig, zu erkennen, daß es das gesamte Profil über der isostatischen Kompensationstiefe (also dem Boden der Lithosphäre) ist, das die thermische und vor allem die isostatische Struktur der Kruste bestimmt. Um die isostatischen und thermischen Effekte in Krustengesteinen für verschiedene Deformations-

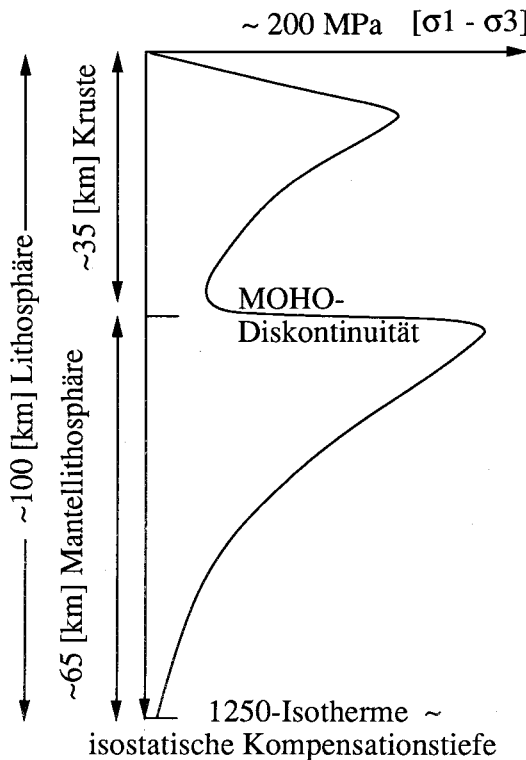


Abb. 1: Ein schematisches Profil durch stabile kontinentale Lithosphäre, aufgetragen gegen den zur Deformation notwendigen Streßunterschied ($\sigma_1 - \sigma_3$). Die sich daraus ergebende Fehlkurve setzt sich aus mehreren Teilen zusammen. Im obersten Teil ist sie durch spröde Deformation bestimmt, für die der nötige Streßunterschied ($\sigma_1 - \sigma_3$) eine mit der Tiefe linear zunehmende Funktion ist. In der unteren Kruste ist die Deformation durch duktilen Verhalten bestimmt, das eine mit zunehmender Temperatur und abnehmender Strainrate abnehmende Exponentialfunktion beschreibt. Die Mantellithosphäre ist stärker, weil sie durch das duktile Verhalten von Olivin bestimmt wird. Im Bereich der 1250 Grad Isotherme wird die Stärke der Lithosphäre verschwindend klein und die isostatische Kompensationstiefe befindet sich daher in diesem Bereich. Die Gesamtstärke der Lithosphäre ergibt sich aus dem Flächenintegral bis zur isostatischen Kompensationstiefe. Die hier gezeigte Kurve ist schematisiert und direkt aus der im Text angeführten Literatur übernommen.

geometrien der Kruste *und* des Mantelteils der Lithosphäre darstellen zu können, haben SANDIFORD und POWELL (1990, 1991) eine Beschreibung der Lithosphäre durch die Parameter f_c und f_l vorgeschlagen, wobei f_c die Mächtigkeit der betrachteten Kruste relativ zur Mächtigkeit normaler Schildkruste und f_l die Mächtigkeit der betrachteten Gesamtlithosphäre gegenüber normaler Lithosphäre ist. f_c und f_l stellen daher relative Verdickungs- (Verdünnungs-) größen dar, wobei $f_c=2$ eine Krustenverdopplung bedeuten würde. Verschiedene Deformationspfade der Gesamtlithosphäre können anschaulich anhand solcher Diagramme diskutiert werden (SANDIFORD und POWELL, 1990, 1991) und Änderungen der Seehöhe, der horizontalen Extensionskräfte oder des Temperaturprofils können für verschiedene Mächtigkeitsverhältnisse, bei entsprechender Konturierung des f_c - f_l Raumes, leicht abgelesen werden. So ist es zum Beispiel interessant zu überlegen, daß bei homogener Deformation der Gesamtlithosphäre (eine Gerade mit 45 Grad positiver Steigung durch den Ursprung, Abbildung 2) nicht zur Gebirgs- oder Beckenbildung von Ausmaßen, wie wir sie zum Beispiel im Himalaya beobachten, kommen kann, obwohl man annehmen sollte, daß ein solcher Deformationspfad die natürliche Konsequenz zweier konvergierender Lithosphärenplatten ist. Dieser Hinweis soll hier als Einführung genügen und es sei nur noch abschließend auf die Diskussion von verschiedenen Deformationspfaden im f_c - f_l Raum in den Arbeiten von SANDIFORD und POWELL (1990, 1991) verwiesen.

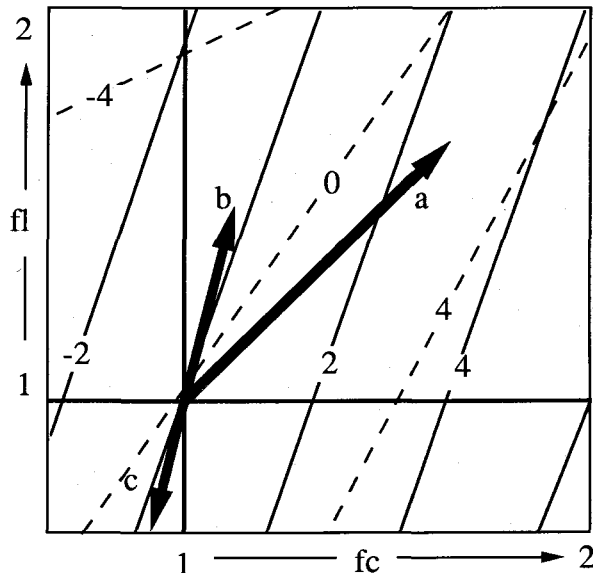


Abb. 2: Ein f_c - f_l Diagramm mit Konturen für relative Seehöhen in 10^3 [m] (durchgezogene Linien) und horizontale Extensionskräfte in 10^{12} [Nm] (gestrichelte Linien). Angenommene Dichten sind 2750 [kg/m³] für die Kruste und 3300 [kg/m³] für den Mantelteil der Lithosphäre. Andere physikalische Detailannahmen, wie zum Beispiel Wärmeausdehnung der Kruste, sind bei SANDIFORD und POWELL (1990) angeführt. Pfeil (a) beschreibt einen homogenen Deformationspfad, mit dem es unmöglich ist, Gebirge von der Höhe mancher Teile der Himalayas zu erreichen. Pfeil (b) und (c) stellen Deformationspfade dar, bei denen Beckenbildung durch Krustenverdickung und Gebirgsbildung durch Krustenverdünnung möglich wären.

3. Bemerkungen zur Deformationsgeometrie der Lithosphäre in den Ostalpen – eine Diskussion

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind viele der Fragen zur Herkunft und Natur von Metamorphose- und Deformationsereignissen der Ostalpen in den vergangenen Jahren mit Modellen diskutiert worden, die oft *nicht* das Verhalten der gesamten Lithosphäre in Betracht ziehen, sondern sich im wesentlichen auf die Beschreibung der Evolution der Kruste beschränken. In diesem Abschnitt sollen nun einige Fragen zur Geologie der Ostalpen im Licht der obigen Diskussion, also insbesondere mit Hinsicht auf das Verhalten des Mantelteils der Lithosphäre, diskutiert werden.

Eine der zentralen Fragen der Ostalpengeologie ist es, den Zusammenhang zwischen der weit verbreiteten eoalpinen Metamorphose der Oberkreide und der Tauernmetamorphose vor 30-40 Ma zu erklären. Erstere hat die meisten Teile der Ostalpen erfaßt, letztere im wesentlichen nur die penninischen Gesteine des Tauern-, Engadiner- und Rechnitzer-Fensters (FRANK, 1987). Gründe für die Metamorphose beider Ereignisse sind viel diskutiert worden und es scheint weitgehend geklärt, daß die frühe Hochdruckmetamorphose, zumindest in den penninischen Fenstern, eine Folge der rapiden Versenkung der Gesteine während der Subduktion des penninischen Ozeans in der Oberkreide war (FRANK et al., 1987).

Im Tauernfenster gliedert sich diese eoalpine Hochdruckmetamorphose in ein jüngeres eklogitfazielles Ereignis, das nur einen schmalen Streifen am Südrand des Tauernfensters erfaßt und dessen Herkunft direkt mit der Subduktionszone des Penninischen Ozeans in Verbindung gebracht wird (MILLER et al., 1980), sowie ein etwas jüngeres blueschistfazielles Ereignis. Dieses jüngere Ereignis wurde von RAITH et al. (1980) auf 90-60 Ma datiert und erfaßt die meisten Gesteine der oberen Schieferhülle. Es wird von HOLLAND und RICHARDSON (1979) mit der Überschiebung des Ostalpinen Deckenstapels in Verbindung gebracht, obwohl ZIMMERMANN und FRANZ (1983) vorschlagen, daß Teile dieser jüngeren kretazischen Metamorphose als Folge der Subduktion nicht auszuschließen seien. Im Ostalpinen Deckenstapel ist dieses eoalpine Ereignis auch weit verbreitet und viele Parallelen sind erkennbar. So entsprechen die Drucke und Temperaturen der Eklogite des Ostalpins in der Sau- und Koralm weitgehend denen des Tauernfensters (MILLER, 1990) und werden auch teils mit dem eoalpinen Ereignis in Verbindung gebracht (MILLER und FRANK, 1983; MILLER, 1990). Kretazische, retrograde, amphibolitfazielle Überprägung der Eklogite könnte möglicherweise mit dem Blueschist-Ereignis des Tauernfensters in Zusammenhang gebracht werden. Die meisten Gesteine des Ostalpins haben jedoch zu dieser Zeit grünschieferfazielle Metamorphose erfahren, für deren Genese relativ hohe Wärmeflüsse notwendig waren (FRANK, 1983).

Die Herkunft der tertiären Tauernmetamorphose dagegen ist noch ein Punkt großer Debatte. So schlagen zum Beispiel die Arbeiten von DROOP (1985) und CLIFF et al. (1985) vor, daß die Metamorphose nur die Folge der Aufheizung nach der tektonischen Überlagerung durch den Ostalpinen Deckenstapel sei, wogegen OXBURGH und TURCOTTE (1974) vorgeschlagen haben, daß zusätzlicher Wärmefluß vom Mantel notwendig sei.

Dazu sei hier folgendes zur Diskussion gebracht. Es ist bekannt, daß die bis an die Amphibolitfazies reichende Tauernmetamorphose des Tauernfensters, abgesehen von kleinen Übergriffen auf das Ostalpin in der Südwestecke des Tauernfensters, im wesentlichen auf die penninischen Gesteine des Fensters beschränkt ist und an den Deckengrenzen

stoppt (FRANK, 1987). Dies ist bemerkenswert, nachdem wir wissen, daß die Stapelung der Ostalpinen Decken über das Penninikum des heutigen Tauernfensters mit dem Ende der Kreide beendet war, aber substantielle Erosion noch nicht eingesetzt hatte (z. B.: TOLLMANN, 1980; 1987; FRANK, 1983; 1987) und daß daher seit dieser Zeit penninische und ostalpine Teile als eine Einheit agiert haben. Besonders für ein Modell nach DROOP (1985) oder CLIFF et al. (1985) wäre es daher zu erwarten, daß der Metamorphosegrad der Tauernmetamorphose zwar von den unteren penninischen zu den oberen ostalpinen Gesteinen hin abnimmt, aber nicht nahezu direkt mit den Deckengrenzen zum Ostalpin hin korreliert. Die Ostalpinen Gesteine außerhalb des Fensters sind zwar zur Zeit der Tauernmetamorphose als neben dem Fenster und nicht über dem Fenster anzusehen, aber auch der laterale Abfall des Metamorphosegrades ist steil. So läßt sich im Ostalpin das Ereignis der Tauernmetamorphose lediglich durch einen zum Tauernfenster hin zunehmenden Inkohlungsgrad der Kohlen der inneralpinen tertiären Becken, sowie in Spaltspuren-Altern erkennen (SACHSENHOFER, 1991; SACHSENHOFER, pers. Mitt.). Deformationen, die nach der Tauernmetamorphose stattgefunden haben, können auch nicht zu diesem steilen Abfall der Isograde an den Grenzen des Penninikums beigetragen haben, weil es sich bei der tertiären Deformation im wesentlichen um Extensionsstrukturen handelt (GENSER und NEUBAUER, 1989, RATSCHBACHER, 1991) und solche hätten nicht zur Kompression, sondern höchstens zum Ausbreiten der metamorphen Isograde beitragen können.

Größere Krustenmächtigkeit und damit verbundene Anhäufung wärmeproduzierender Elemente ist daher zusammenfassend schwer als Erklärung hinzunehmen, weil: 1. der steile laterale Abfall des Metamorphosegrades der Tauernmetamorphose damit nicht erklärbar ist und 2. das Vorhandensein alpiner Eklogite und anderer Hochdruckgesteine im Ostalpin darauf hinweist, daß auch große Teile des Ostalpins östlich des Tauernfensters ähnlich tief versenkt waren und daß also auch dort große Krustenmächtigkeiten vorgeherrscht haben. Rapide, spätkretazische Exkavierung der Gesteine östlich des Tauernfensters könnte ein tertiäres Aufheizen im Ostalpin verhindern. Allerdings ist bekannt, daß massive Krustenverkürzung östlich des Tauernfensters erst in der Abkühlphase der eoalpinen Metamorphose stattfand (FRANK, 1983, 1987) und es ist daher unwahrscheinlich, daß die Gesteine schon zu diesem Zeitpunkt herausgehoben wurden. Im Gegenteil, massive Krustenverkürzung erst während der Abkühlphase deutet an, daß zumindest in diesem Teil der Ostalpen Erwärmung der Gesteine durch alpine Krustenstapelung sicher *nicht* möglich sein kann (siehe auch: FRANK, 1987) und daß diese Erwärmung somit ein Problem bildet, das wahrscheinlich nicht durch Deformation der Kruste allein beantwortet werden kann.

In Anbetracht dieser Fragestellungen wird hier vorgeschlagen, daß eine Delaminierung des unteren Teils der verdickten alpinen Lithosphäre vor 30-40 Ma für die tertiäre Metamorphose der penninischen Gesteine des Tauernfensters verantwortlich sein kann. HOUSEMAN et al. (1981) haben gezeigt, daß solch eine Verdünnung der Wurzel einer homogen verdickten Lithosphäre etwa 20-40 Ma nach dem Beginn einer Kontinent-Kontinent Kollision durch konvektive Delaminierungsprozesse vorkommen kann, sich aber dann in recht kurzem Zeitraum entwickelt. Im folgenden wird dieses Modell als Interpretation für die Tauernmetamorphose angenommen und werden die daraus folgernden, thermischen und isostatischen Konsequenzen für andere Bereiche des Ostalpenraumes diskutiert werden.

In Abbildung 3 ist der vorgeschlagene Deformationspfad der Lithosphäre unter dem Tauernfenster schematisch dargestellt. Im Vergleich mit den Konturen, die auf Abbildung 2 eingezeichnet sind, ist zu sehen, daß der vorgeschlagene Delaminierungsprozeß (in Abbil-

dung 3 durch das plötzliche Absinken von fl für den dunklen Pfeil zwischen (B) und (C) dargestellt) nicht nur mit einem plötzlichen Anstieg der Seehöhe, sondern auch mit einem Anstieg der horizontalen Extensionskräfte verbunden ist. Dieser Anstieg korreliert zeitlich direkt mit dem Prozeß der Lateralextrusion von RATSCHBACHER et al. (1991), der im Oligozän als Erklärung für die Ost-West-Extension östlich des Tauernfensters diskutiert wird und der durch den vorgeschlagenen Prozeß ausgelöst worden sein könnte. RATSCHBACHER et al. (1991) bringen diese laterale Extrusion in erster Linie mit der langsamen postkretazi-

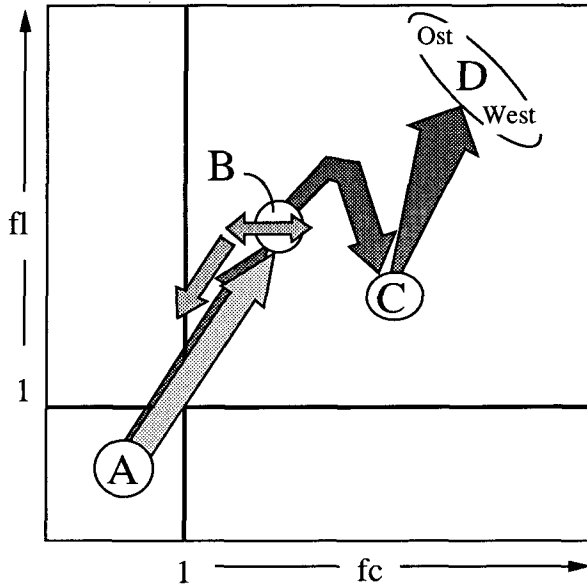


Abb. 3: Ein fc - fl Diagramm mit dem Deformationspfad, der hier für die Ostalpen seit der Kreide vorgeschlagen wird. Dunkle Pfeile stellen die Entwicklung im Bereich des Tauernfensters, helle Pfeile die des Ostalpins östlich des Katschberges dar. Das Diagramm ist rein schematisch und es wurde daher auf quantitative Angaben und Konturen verzichtet. (A) stellt die Ausgangssituation in der mittleren Kreide dar. Erhöhter Wärmefluß und allgemein verdünnte Lithosphäre wird zu diesen Zeitpunkt von einer Reihe von Autoren vorgeschlagen. Der Weg nach (B) stellt die Altpidische Kompression dar, die zur kretazischen Metamorphose in den meisten Teilen der Ostalpen führte und von der hier vorgeschlagen wird, daß sie Kruste und Mantellithosphäre in ähnlichem Ausmaß betraf. Der horizontale Pfeil bei (B) stellt kleinräumige Beckenbildung und/oder Verdickung des Ostalpins dar, wie es von NEUBAUER und GENSER (1990) für die Zeit der Gosau diskutiert wird. Der dunkle Pfeil (B) – (C) stellt die hier vorgeschlagene plötzliche Verdünnung der Mantellithosphäre unter dem Tauernfenster im mittleren Tertiär dar und der helle Pfeil Richtung Ursprung die dadurch ausgelöste Ostalpine Verdünnung der Lithosphäre durch Lateralextrusion. Der Pfeil (C) – (D) gibt die Entwicklung der Lithosphäre im Bereich des Tauernfensters während der letzten 10 Millionen Jahre wieder, wobei die Daten für den derzeitigen Zustand nach ARIC et al. (1989) zusammengefaßt sind. Im östlichen Ostalpinen Raum wird seit der Lateralextrusion keine Deformation der Mantellithosphäre mehr interpretiert und es gibt daher keinen entsprechenden Pfeil auf der Abbildung. (D) gibt das derzeitige Verdickungsverhältnis im Bereich des Tauernfensters an, wobei Ost für den Bereich des Sonnblicks und West für den Bereich des Großvenedigers steht.

schen Erwärmung und der damit verbundenen Erweichung des Ostalpins in Verbindung. Dies ist jedoch ein kontinuierlicher Prozeß und das wiederum steht im Gegensatz zu der Plötzlichkeit der gleichzeitigen Prozesse von Ansatz der lateralen Extrusion und alpiner Topographiebildung, die durch den massiven Ansatz der Molassesedimentation zu dieser Zeit dokumentiert wird. Die etwa gleichzeitige Entwicklung der Tauernmetamorphose im Tauernfenster (FRANK et al., 1987), dem relativ plötzlichen Beginn der Sedimentation in den peri-alpinen Becken (ENGLAND, 1981) und der Beginn der lateralen Extrusion nach Osten (RATSCHBACHER et al., 1991) könnten daher mit solch einem Modell in relativ einfachen Zusammenhang gebracht werden.

Ein zeitlich vorausgehendes, aber mit dem Obigen korrelierbares Problem ist die gleichzeitige Formierung metamorpher Dome und sedimentärer Becken durch Krustendehnung. Solch ein Prozeß wird von NEUBAUER und GENSER (1990) für Teile des Ostalpins während der Oberkreide vorgeschlagen. Diese regionalen Strukturen im Zehner-Kilometer Maßstab sind sicher viel eher die Konsequenz von flexurellen-, deformations- und streßbedingten vertikalen Bewegungen der Kruste (NEUBAUER und GENSER, 1990) und nur vertikale Bewegungen in der Größenordnung von hundert Kilometer oder mehr könnten mit dem isostatischen Verhalten der Lithosphäre in Verbindung gebracht werden. Nichtsdestotrotz ist das parallele Auftreten sedimentärer Becken (z. B.: Gosaubecken) und der Aufstieg kleinräumiger metamorpher Dome (z. B.: Gleinalm) generell nur möglich, wenn die Mächtigkeiten der Kruste und Mantellithosphäre ein allgemein seehöhenneutrales Verhältnis aufweisen. Es ist daher anzunehmen, daß im östlichen Ostalpenraum zur Zeit der Oberkreide mehr oder weniger *homogen* verdickte Lithosphäre vorlag. Dies wäre auch als die natürliche Konsequenz der altalpinen Kompression anzusehen und ist auf Abbildung 3 mit den Pfeilen von (A) nach (B) dargestellt. Der damit verbundene leichte Anstieg der horizontalen Extensionskräfte (die entgegen der Kompressionskräfte wirken), könnte das Ausweichen der ursprünglichen Kompressionsrichtung aus der Ost-West-Längsachse des Orogens (RATSCHBACHER und NEUBAUER, 1989) in den Nordtransport mit beeinflussen. Homogene Deformation der gesamten Lithosphäre verändert das Temperaturprofil der Kruste nur geringfügig, weil sich die durch Krustenverdickung gesteigerte radioaktive Wärmeproduktion und der durch Mantellithosphärenverdickung verringerte Mantelwärmefluß größtenteils aufheben (SANDIFORD und POWELL, 1990). Die häufig dokumentierte Abkühlung der Gesteine zu dieser Zeit der Krustenverdickung (FRANK, 1987; SCHIMANA, 1986) muß daher nicht bindend mit Aufstieg und Erosion verbunden sein, sondern könnte nur die natürliche Konsequenz massiver Mantellithosphärenverdickung sein. Diese Abkühlung steht daher keineswegs im Gegensatz zu der gleichzeitigen großräumigen Nord-Verkürzung der Kruste östlich des Tauernfensters, wenn man annimmt, daß Verkürzung der gesamten Lithosphäre stattgefunden hat und daß das endgültige Verdünnen der ostalpinen Lithosphäre zum heutigen Zustand (ARIC et al., 1989) erst in Zusammenhang mit der Lateralextrusion stattgefunden hat. Mehr noch: die überaus hohen Wärmeflüsse, die zum Teil für die eoalpine Metamorphose östlich des Tauernfensters notwendig waren (FRANK, 1983), sind möglicherweise ein Hinweis darauf, daß Modelle im Stil von ENGLAND und RICHARDSON (1978) überhaupt nicht auf die eoalpine Metamorphose des östlichen Ostalpenraumes anwendbar sind und mögen eher ein Hinweis auf die altalpidische Lithosphärenmächtigkeit sein.

Es ist gezeigt worden, daß viele der Erscheinungen der Ostalpen durch eine ursprünglich homogene Deformation der Gesamtlithosphäre und, im mittleren Tertiär, durch eine

plötzliche Verdünnung der Mantellithosphäre im Bereich des Tauernfensters erklärt werden können. Die Interpretation der endgültigen Krusten- und Mantellithosphärenverdünnung im östlichen Teil der Ostalpen während des Prozesses der Lateralextrusion wird durch die Sedimentationsdaten der inneralpinen tertiären Becken unterstützt. Die subsequente Evolution der ostalpinen Lithosphäre bis zum heutigen Tag erscheint daher verschieden für den Bereich des Tauernfensters und die östlicheren Teile. Im Tauernfenster herrscht neben verdickter Kruste auch jetzt verdickte Mantellithosphäre vor, wogegen in den östlicheren Bereichen normale Mächtigkeiten beider Teile der Lithosphäre vorherrschen (ARIC et al., 1989). Unter Annahme der obigen Interpretationen muß daher gefolgert werden, daß im Bereich des Tauernfensters Verdickung der Lithosphäre bald nach dem plötzlichen Delaminieren wieder eingesetzt haben muß, wogegen in den östlicheren Bereichen die während der Lateralextrusion auf normale Mächtigkeit verdünnte Lithosphäre dünn geblieben ist. Dieses zwingende Ergebnis unterstützt allerdings das hier vorgeschlagene Modell, nachdem zu erwarten ist, daß plötzliche Delaminierung der unteren verdickten Lithosphäre einen instabilen Zustand darstellt (HOUSEMAN et al., 1981) und daß rapide erneute Verdickung derselben daher nicht ungewöhnlich ist.

4. Schlußfolgerungen und offene Fragen

In Zusammenfassung der obigen Diskussion können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden: Es ist wahrscheinlich, daß die altalpidische Kompression eine homogene Verdickung der Gesamtlithosphäre war. Gleichzeitige lokale Beckenbildungen und der Aufstieg metamorpher Dome in der Oberkreide haben das isostatische Profil der Gesamtlithosphäre nicht wesentlich beeinflusst, aber unterstützen die Interpretation von homogener Deformation der Lithosphäre bis zu diesem Zeitpunkt. Massive Krustenverkürzung erst während der Abkühlphase der Gesteine bildet, im Gegensatz zu vielen früheren Modellen, keinen Widerspruch, wenn man solch eine homogene Deformation der Gesamtlithosphäre annimmt. Rapide Verdünnung der Mantellithosphäre unter dem Tauernfenster im Eozän hätte einen plötzlichen Anstieg der Topographie und horizontalen Extensionskräfte zur Folge und mag daher eine Erklärung für den Ansatz der rapiden Molassesedimentation und der Lateralextrusion des Ostalpins bilden. Die lateral eng zusammenliegenden metamorphen Isograde der Tauernmetamorphose an den Grenzen der penninischen Fenster sind ebenfalls durch solch einen Prozeß besser erklärbar, als durch die für die bisher angenommenen Modelle notwendigen drastischen Mächtigkeitsunterschiede der Kruste innerhalb und außerhalb des Fensters. Es ist wahrscheinlich, daß die Mantellithosphäre unter dem Tauernfenster bald nach der interpretierten Delaminierung wieder zum heutigen, mächtigen Zustand verdickt wurde, wogegen die Mantellithosphäre der östlichen Teile wahrscheinlich seit dem Beginn der Lateralextrusion eine langsame Verdünnung erfahren hat.

Das hier präsentierte Modell vermag nicht die kretazische Metamorphose der östlichen Teile der Ostalpen zu erklären und weitere Spekulationen über Prozesse im Bereich der anderen penninischen Teile der Ostalpen sollen hier auch nicht angestellt werden, bevor nicht detaillierte quantitative Überlegungen zur Durchführbarkeit des vorgeschlagenen Prozesses vorliegen. Abschließend soll daher nur nochmals darauf hingewiesen werden, daß diese Arbeit nur einige erste Ideen eines beginnenden Projektes zusammenfaßt und eher dazu gedacht, ist zur Diskussion einzuladen, als letzte Antworten zu präsentieren.

Sowohl quantitative Abschätzungen der Möglichkeit der diskutierten Prozesse, als auch weitere regionalgeologische Untersuchungen sind in Arbeit.

Dank

Dieser Artikel ist das erste Ergebnis eines durch den Australian Research Council (ARC) finanzierten, dreijährigen Projektes zum Studium des Einflusses der Mantellithosphäre auf die thermische Geschichte der Ostalpen.

I thank ARC for financial support and M. SANDIFORD for sharing many of his ideas that are applied here to the Eastern Alps.

Ich danke den vielen österreichischen Kollegen, die mich während meines Geländeaufenthaltes in Österreich unterstützt haben. Insbesondere danke ich W. FRANK und seinen Mitarbeitern für die unschätzbare wertvollen Diskussionen im Gelände und am Wiener Geologischen Institut, sowie für die zur Verfügungstellung ihrer Räumlichkeiten und wissenschaftlichen Hilfsmittel. K. EHLERS sei für kritische Diskussionen und Durchsicht des Manuskriptes gedankt. Natürlich bleiben allfällige Fehler und Mißinterpretationen des Artikels rein die Schuld des Autors.

Literaturverzeichnis

- ARIC, K., GUTDEUTSCH, R., LEICHTER, B., LENHARDT W., PLOMEROVA, J., BABUSKA, V., PAJDUSAK, P. & NIXDORF, U.: Structure of the lithosphere in the Eastern Alps derived from Presidual analysis. — Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, **37**, Publ. 317, 1989.
- BRACE, W. F. & KOHLSTEDT, D. L.: Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments. — *J. Geophys. Res.*, **85**, 6248-6252, 1985.
- BYERLEE, J. D.: Brittle ductile Transition in rocks. — *J. Geophys. Res.*, **73**, 4741-4750, 1968.
- CLIFF, R. A., DROOP, G. T. R. & REX, D. C.: Alpine metamorphism in the south-east Tauern window, Austria: 2. Rates of heating, cooling and uplift. — *J. metam. Geol.*, **3**, 403-415, 1985.
- DROOP, G. T. R.: Alpine metamorphism in the south-east Tauern window, Austria: P-T variations in space and time. — *J. metam. Geol.*, **3**, 371-402, 1985.
- ENGLAND, P.: Metamorphic pressure estimates and sediment volumes for the Alpine orogeny: an independent control on geobarometers? — *Earth and Planetary Sci. Letters*, **56**, 387, 397, 1981.
- ENGLAND, P. C. & RICHARDSON, S. W.: The influence of erosion upon the mineral facies of rocks from different metamorphic environments. — *J. geol. Soc. London*, **134**, 201-213, 1977.
- FRANK, W.: Argumente für ein neues Entwicklungsmodell der Ostalpen. — *Jber. 1982. Hochschulschwerpunkt S 15*, **4**, 249-262, 1983.
- FRANK, W.: Evolution of the Austroalpine Elements in the Cretaceous. — [In:] H. W. FLÜGEL & P. FAUPL (Hrsg.): *Geodynamics of the Eastern Alps*, 379-406, 1987.
- FRANK, W., HÖCK, V. & MILLER, C.: Metamorphic and tectonic history of the Central Tauern window. — [In:] H. W. FLÜGEL & P. FAUPL (Hrsg.): *Geodynamics of the Eastern Alps*, 34-54, 1987.
- FRISCH, W.: The plate tectonic evolution of the Alps. — *Tectonophysics*, **60**, 121-134, 1979.
- FRISCH, W., GOMMERINGER, K., KELM, U. & POPP, F., 1987. The upper Bündener Schiefer of the Tauern window — A key to understanding Eoalpine orogenic processes in the Eastern Alps. — [In:] H. W. FLÜGEL & P. FAUPL (Hrsg.): *Geodynamics of the Eastern Alps*, 55-70, 1987.
- GENSER, J. & NEUBAUER, F.: Low angle normal faults at the eastern margin of the Tauern window (Eastern Alps). — *Mitt. österr. geol. Ges.*, **81**, 233-243, 1989.
- HOLLAND, T. J. B. & RICHARDSON, S. W.: Amphibole zonation in metabasites as a guide to the evolution of metamorphic conditions. — *Contr. Miner. Petrogr.*, **70**, 143-148, 1979.
- HOUSEMAN, G., Mc KENZIE, D. & MOLNAR, P.: Convective instability of a thickened boundary layer and its relevance for the thermal evolution of continental convergence belts. — *J. Geophys. Res.*, **86**, 61 15-6132, 1981.
- MILLER, C.: Petrology of the type locality eclogites from the Koralpe and Saualpe (Eastern Alps), Austria. — *Schweiz. miner. und petrogr. Mitt.*, **70**, 283-300, 1990.

- MILLER, C. & FRANK W.: Das Alter der Metamorphose von Metabasiten und Eklogiten in Kor- und Saualpe. — Jber. Hochschulschwerpunkt S 15, 4, 229-236, 1983.
- MILLER, C., SATIR, M. & FRANK W.: High pressure metamorphism in the Tauern window. — Mitt. österr. geol. Ges., 71/72, 89-97, 1980.
- NEUBAUER, F.: Supercyclicity and Architecture of Phanerozoic orogenic terranes: the example of the Alps. — Abstr. 28th Int. geol. Congr., Washington D. C., S. 2-205, 1989.
- NEUBAUER, F. & GENSER, J.: Architektur und Kinematik der östlichen Zentralalpen — eine Übersicht. — Mitt. natwiss. Ver. Stmk., 120, 274-283, 1990.
- OXBURGH, E. R. & TURCOTTE, D. L.: Thermal gradients and regional metamorphism in overthrust terrains, with special reference to the eastern Alps. — Schweiz. miner. petrogr. Mitt., 54, 641-662, 1974.
- RAITH, M., MEHRENS, C. & THÖHLE, W.: Gliederung, tektonischer Bau und metamorphe Entwicklung der penninischen Serien im Südlichen Venediger Gebiet, Osttirol. — Jb. geol. Bundesanst., 123, 1-37, 1980.
- RATSCHBACHER, L. & NEUBAUER, F.: West-directed decollement of Austro-Alpine cover nappes in the Eastern Alps: geometrical and rheological considerations. — [In:] M. P. COWARD, D. DIETRICH & R. G. PARK (Hrsg.), Alpine Tectonics; Geol. Soc. Spec. Publ., 45, 243-262, 1989.
- RATSCHBACHER, L., FRISCH, W., LINZER, H. G. & MERLE, O.: Lateral extrusion in the eastern Alps 2: Structural analysis. — Tectonics, 10, 257-271, 1991.
- SACHSENHOFER, R. F.: Geological setting and coalification of intermontane basins of the eastern Alps (Tertiary, Austria). — Bull. Soc. géol. France, 162, 371-374, 1991.
- SANDIFORD, M. & POWELL, R.: Some isostatic and thermal consequences of the vertical strain geometry in convergent orogens. — Earth and Planetary Sci. Letters, 98, 154-165, 1990.
- SANDIFORD, M. & POWELL, R.: Some remarks on high temperature — low pressure metamorphism in convergent orogens. — J. metam. Geol., 9, 333-340, 1991.
- SANDIFORD, M., MARTIN, N., FRASER, G. & ZHOU, Z.: On the origin of anticlockwise PT paths. — Earth and Planetary Sci. Letters, in press.
- SCHIMANA, R.: Neue Ergebnisse zur Entwicklungsgeschichte des Kristallins um Radenthein (Kärnten, Österreich). — Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr., 33, 221-232, 1986.
- SONDER, L. J. & ENGLAND, P.: Vertical averages of rheology of the continental lithosphere: relation to the sheet parameters. — Earth and Planetary Sci. Letters, 77, 81-90, 1986.
- TOLLMANN, A.: Großtektonische Ergebnisse aus den Ostalpen im Sinne der Plattentektonik. — Mitt. österr. geol. Ges., 71/72, 37-44, 1980.
- TOLLMANN, A.: The alpidic evolution of the Eastern Alps. — [In:] H. W. FLÜGEL & P. FAUPL (Hrsg.): Geodynamics of the Eastern Alps, 361-378, 1987.
- ZIMMERMANN, R. & FRANZ R.: Die Eklogite der unteren Schieferhülle; Frosnitzal/Südvenediger, Tauern, Österreich. — Mitt. österr. geol. Ges., 81, 167-188, 1989.