

## 3D-Geometrie der Strukturen zwischen Karwendel-Synklinale und Thiersee-Synklinale

H. ORTNER und A. GRUBER

### I. Einleitung

In 3D-Modellen wird versucht die wahre Geometrie von Strukturen darzustellen. Da bei 3D-Modellen im 3D-Raum gearbeitet wird, entfallen theoretisch Verschnitteffekte, die bei der Projektion auf 2D-Bildebenen zur Verzerrung führen. Die Grundlage von 3D-Modellen ist allerdings immer noch die geologische Kartierung, sodass diesen Verzerrungseffekten nicht ganz ausgewichen werden kann. Die Erfassung von Strukturen im 3D-Raum erfolgt durch ihre Verschnittlinie mit dem Höhenmodell, aus der die 3D-Struktur berechnet werden kann. Damit hängt die Genauigkeit der 3D-Struktur stark von der Genauigkeit des Höhenmodells ab. Das hier angewendete Höhenmodell beruht auf verbesserten SRTM-Daten mit einer Auflösung von 1". Die Genauigkeit nach der Projektion im österreichischen Gauß-Krüger-Netz beträgt etwa 40 m und erlaubt deshalb nur eine ungefähre Konstruktion von Strukturen im Raum. 3D-Modelle haben einen großen Nachteil: sie sind in 2D-Abbildungen unübersichtlich. Deswegen wird hier im Wesentlichen mit Karten und Profildarstellungen gearbeitet.

In dieser Arbeit wird mit Hilfe genauer Kartierungsdaten und einer großen Anzahl von Orientierungsdaten versucht ein dreidimensionales geologisches Modell zu erstellen. Grundlage des 3D-Modells ist eine abgedeckte Karte, die aus den Manuskriptkarten von SAUSGRUBER (1994), SPIELER (1995), WISCHOUNIG (2006), GRUBER (2011) sowie den GeoFAST-Karten 88 Achenkirch und 119 Schwaz der Geologischen Bundesanstalt erstellt wurde. Wichtige Informationen wurden aus der Kartierung von einzelnen Bänken in den mächtigen, nicht weiter untergliederten Karbonatkomplexen des Wettersteinkalks und des Hauptdolomits gewonnen, die in den Laserscanning-Bildern des Landes Tirol ([www.tirol.gv.at/tiris](http://www.tirol.gv.at/tiris)) sichtbar sind. Wir reinterpretieren die auf dieser Grundlage gewonnene Geometrie der Achantaler Überschiebung und der damit verbundenen Falten.

Die **Achantaler Schubmasse** ist eine der enigmatischen Strukturen in der Lechtal-Decke der westlichen Nördlichen Kalkalpen. Sie liegt auf der **Achantaler Überschiebung**, die nach Westen in der Karwendel-Synklinale verschwindet und im Osten in die Thiersee-Synklinale hineinreicht (Abb. 1). In beiden Synklinalen nimmt die Überschiebungsweite schnell ab bzw. die Überschiebung ist nicht mehr nachweisbar. Die Achantaler Überschiebung fungiert deswegen als Transferzone zwischen zwei Synklinalen. Die Antiklinalen im Hangenden der Überschiebung ändern ihre Orientierung im Streichen von etwa E–W am Guffert (2194 m) im Osten (Guffert-Antiklinale) auf etwa N–S am Unnutz (2078 m, Unnutz-Antiklinale) und der Seekarspitze (2053 m) im Westen, bevor die Struktur an der Seebergspitze mit einer steilachsigen Synklinale wieder in die E-W-streichende Mondscheinspitze-Antiklinale umbiegt (Abb. 2).

Die komplexen Strukturen der Achantaler Schubmasse wurden wie folgt strukturell interpretiert:

- 1) Rotationale Bewegungen (AMPFERER, 1921, 1941; SPENGLER, 1953, 1956; AUER, 2001): Hier wurde angenommen, dass die Antiklinale im Hangendblock ursprünglich lateral kontinuierlich mit der Guffert-Antiklinale zusammenhing und die Unnutz-Antiklinale später durch Knickung in ihre heutige Position gekommen ist.
- 2) Schleppung: NAGEL (1975) nahm an, dass die Überschiebungsweite in der Thiersee-Synklinale größer als die Überschiebungsweite in der Karwendel-Synklinale war, und deswegen der Übergangsbereich in eine N-S-Orientierung geschleppt wurde.
- 3) Erzwungene Faltung: Nach EISBACHER & BRANDNER (1995, 1996) entwickelte sich die N-S-orientierte Unnutz-Antiklinale am Rand einer Wettersteinkalk-Plattform und/oder an einer invertierten jurassischen Abschiebung.
- 4) Polyphase Überschiebungstektonik wurde von verschiedenen Autoren vorgeschlagen (FUCHS, 1944; SPIELER & BRANDNER, 1989; CHANNELL et al., 1990, 1992; ORTNER, 2003): Eine ältere westgerichtete Überschiebung (Achantaler Überschiebung) wäre später nordgerichtet durch die Überschiebungen in der Thiersee- und Karwendel-Synklinale reaktiviert worden.

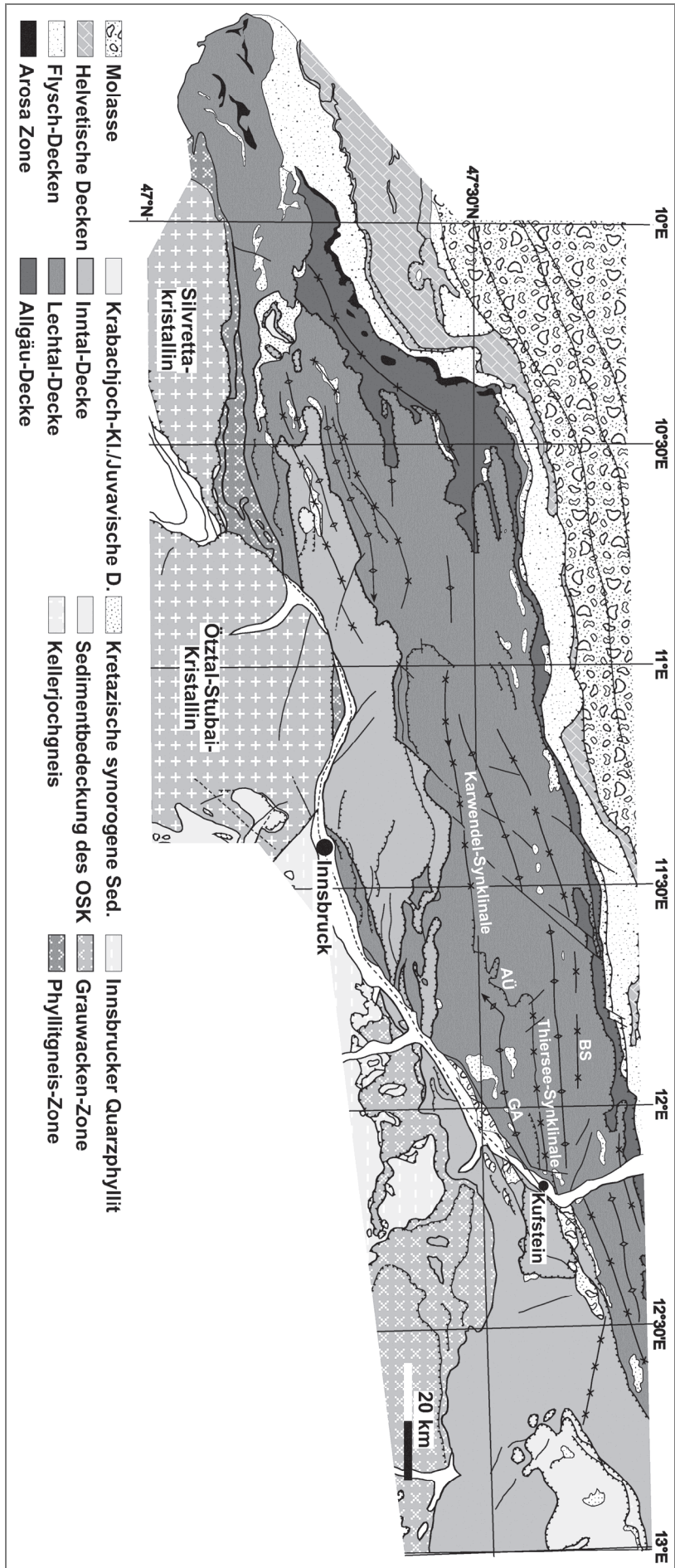


Abb. 1: Tektonische Skizze der westlichen Nördlichen Kalkalpen, verändert nach ORTNER (2003); kalkalpinen Deckenbau nach BRANDNER (1985).  
 AÜ = Achentaler Überschiebung, GA = Guffert-Antiklinale, BS = Bayerisches Synklinorium.

## 2. Großmaßstäbliche Geometrie der Achantaler Überschiebung

Die großen Überschiebungen und Großfalten der westlichen Nördlichen Kalkalpen, die z. B. in den Lechtaler Alpen gut aufgeschlossen sind, streichen im Wesentlichen ENE–WSW bis NE–SW. Die Thiersee- und Karwendel-Synklinale bilden hier eine Ausnahme, da diese beiden Synklinale fast genau in E-W-Richtung verlaufen. Nach EISBACHER & BRANDNER (1996) können in den nördlichen Kalkalpen drei Transportrichtungen unterschieden werden: Die kretazische Verkürzung war im Wesentlichen NW-gerichtet, während die paläogene Verkürzung N- bis NNE-gerichtet war. Im Neogen herrschte in den Kalkalpen aufgrund der „Fluchtschollentektonik“ im internen Teil der Alpen NNE- bis NE-orientierte Verkürzung vor (RATSCHBACHER et al., 1991), es kam aber in den Nördlichen Kalkalpen zu keinen wesentlichen Überschiebungen mehr (vgl. ORTNER, 2003; TÖCHTERLE, 2005) konnte zeigen, dass die Überschiebung in der Thiersee-Synklinale bereits in der Oberkreide aktiv gewesen sein muss, obwohl sie E-W-Orientierung hat. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die Überschiebungen in der Thiersee- und Karwendel-Synklinale nicht aufgrund der Orientierung der in der Oberkreide herrschenden Spannungen, sondern über präexistente Strukturen lokalisiert wurden. Sowohl der Nordrand der Karbonatplattform des Wettersteinkalks als auch fazielle Unterschiede im Jura in N-S-Richtung lassen eine alte, E-W-verlaufende Störung in der Thiersee-Synklinale vermuten (TÖCHTERLE, 2005), auch wenn die stärksten Faziesunterschiede in E-W-Richtung beobachtet werden (NAGEL et al., 1976; CHANNELL et al., 1992; Ortner & Kilian, dieser Band).

## 3. Beschreibung der strukturellen Elemente

### 3.1. Die Achantaler Überschiebung

An der Achantaler Überschiebung werden triassische Gesteine auf unterkretazische Gesteine überschoben. Im NE läuft die Achantaler Überschiebung in den Kern der Thiersee-Synklinale hinein. Bereits im Profil entlang des Ampelsbachs westlich der Natterwand ist die Überschiebung in der Schrambach-Formation nicht mehr eindeutig erkennbar. In den inkompetenten Partien der jurassisch-kretazischen Schichten ist aber an deformierten Ammoniten bedeutende homogene Verformung erkennbar, die Elliptizität  $R = 1,4–1,6$  (Abb. 3a, c). Die Richtung der stärksten Streckung X liegt im ENE in der Schichtung, die Richtung der stärksten Verkürzung Z wegen der starken Abflachung der meisten Ammoniten subnormal auf der Schichtung (Abb. 3d). Diese Orientierung des Verformungselipsoids könnte in Zusammenhang gebracht werden mit homogener Verformung bei der Faltung, wobei in den Faltenschenkeln die Schieferungsebene subparallel zur Schichtung liegt. Die Streckung liegt subparallel zur regionalen Faltenachse und könnte mit dem Faltungsprozess in Verbindung gebracht werden.

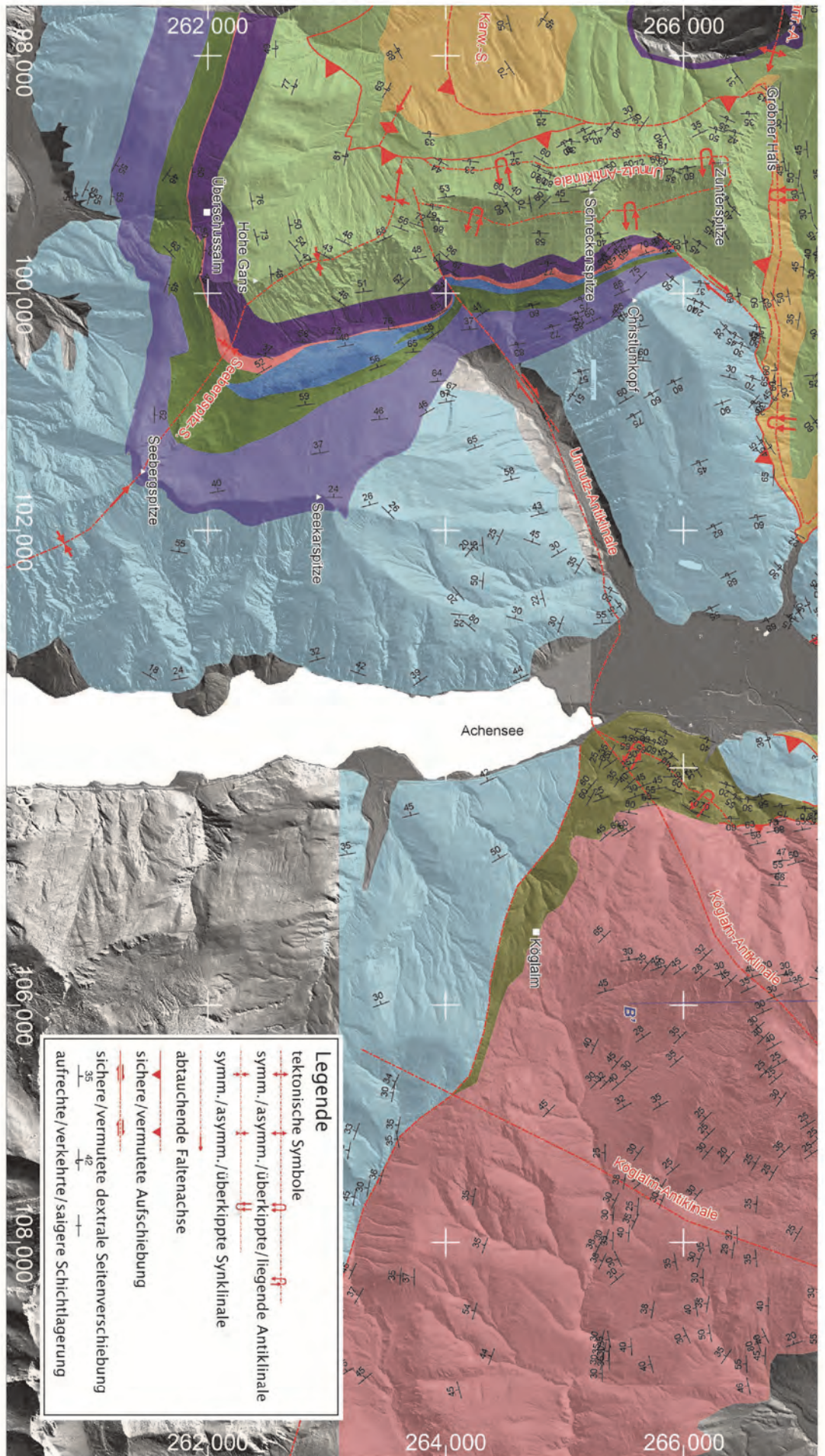
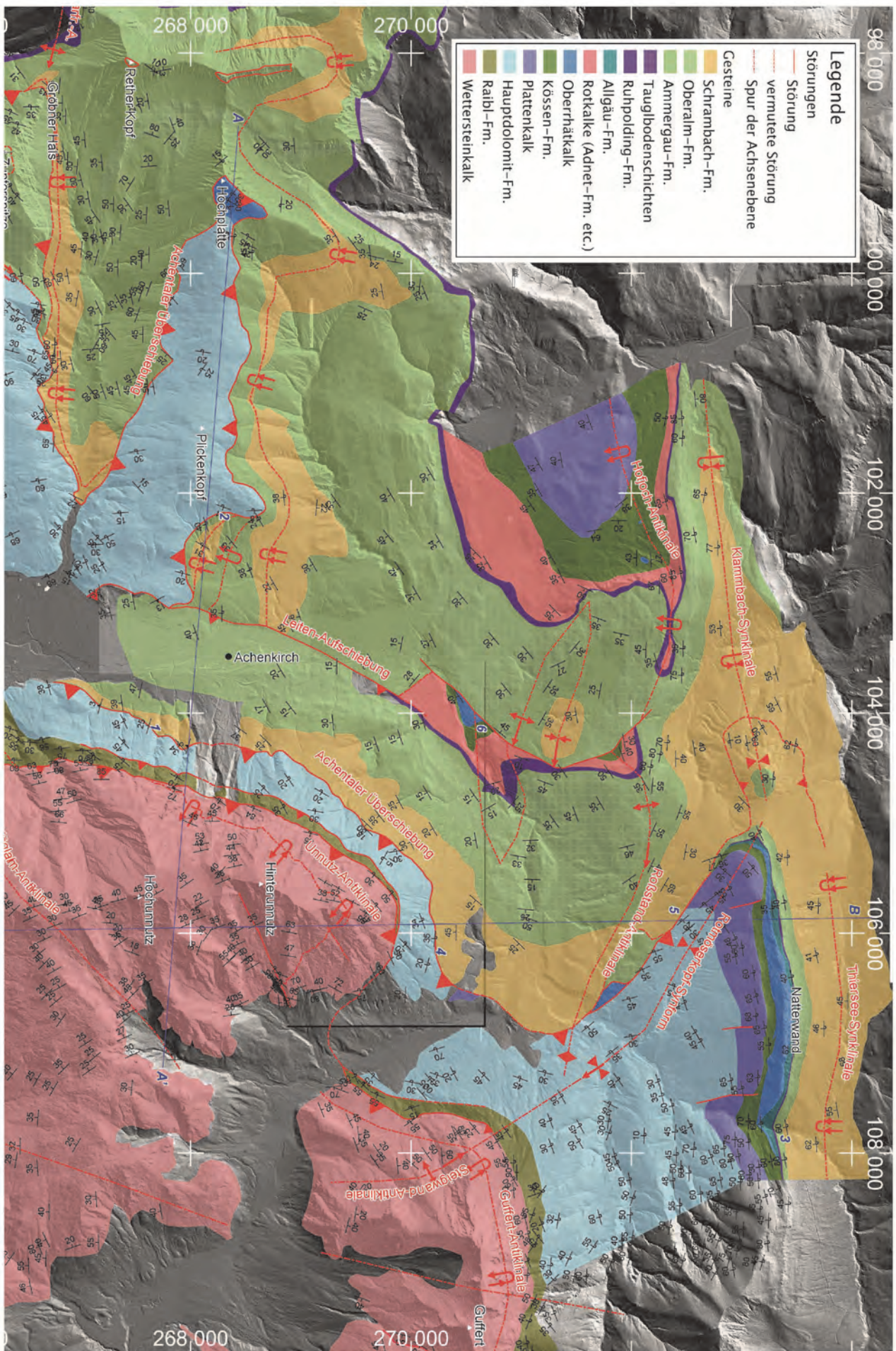
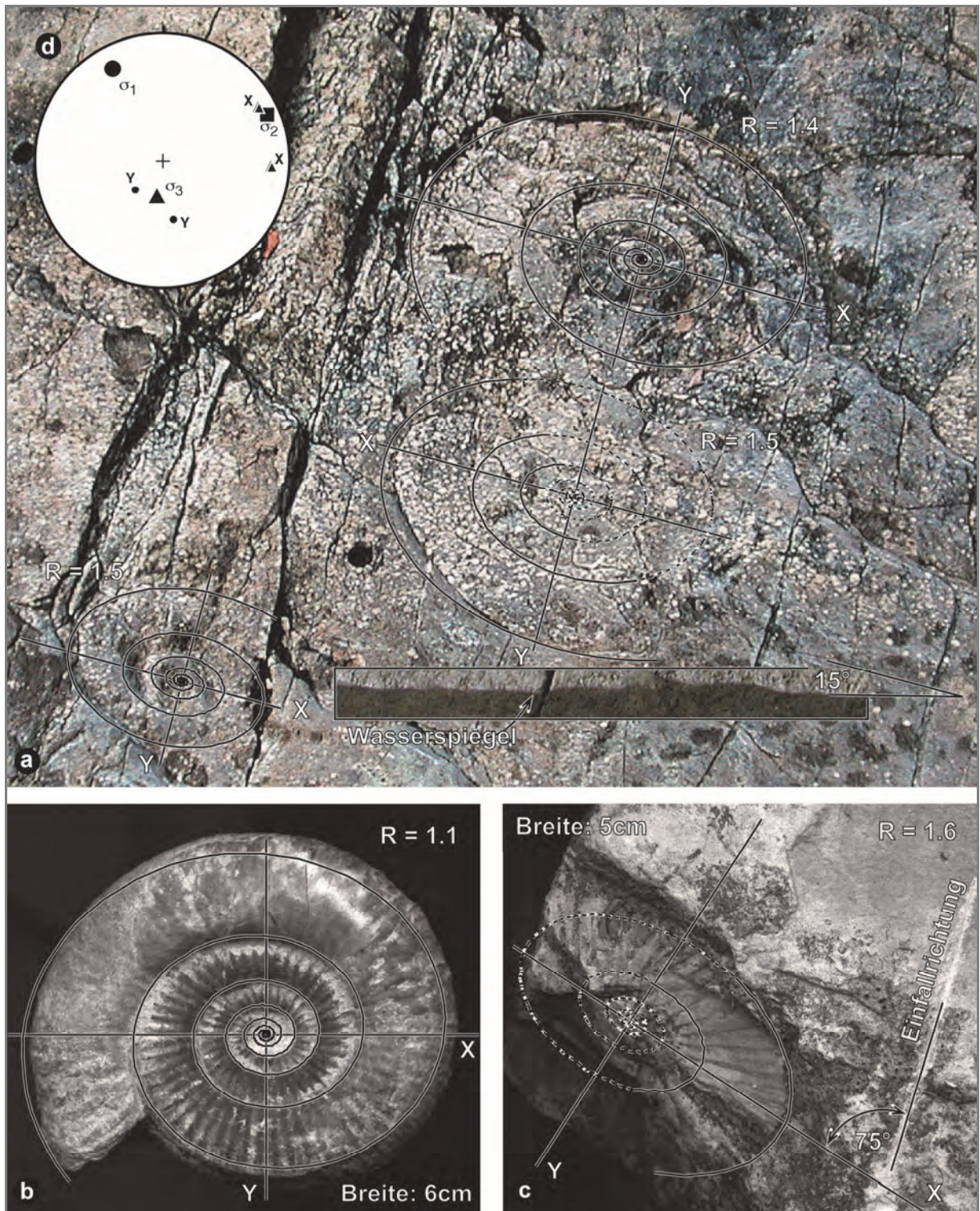


Abb. 2: Teilweise abgedeckte tektonische Karte des Übergangsbereichs von der Karwendel-Synklinale zur Thiersee-Synklinale mit den Namen der wesentlichen Strukturen. Untergeordnete Falten, die aus den Schichtorientierungen nicht klar ersichtlich sind, wurden aus den Manuskriptkarten von SAUSGRUBER (1994), SPIELER (1995), WISCHOUNIG (2006) und GRUBER (2011), aus den GeoFAST-Karten 088 Achenkirch und 119 Schwarz, sowie aus den tektonischen Skizzen von AUER (2001) kompiliert. Blaue Zahlen: Lokalitäten der Störungsmessungen. Die blauen Zahlen entsprechen den Nummern der Lokalitäten in Abb. 6. Koordinatensystem: MG/Austria GK West.







- Abb. 3: Fünf Beispiele deformierter Ammoniten aus dem Ampelsbachprofil SE der Natterwand. Die Elliptizität wurde durch Überlagerung der vorausmodellierten Spirale auf ein Foto des Ammoniten bestimmt, ähnlich der Methode von ROCHA & DIAS (2005). Es konnte die Elliptizität  $R$  an acht Ammoniten bestimmt werden. Dabei waren Ammoniten aus kalkreichen Gesteinen undeformiert (b), während die Elliptizität von Ammoniten aus mergeligen Gesteinen zwischen  $R = 1,4$  und  $R = 1,6$  schwankt (a, c). Die Orientierung der Verformungsellipse konnte an den in (a) und (c) gezeigten Ammoniten bestimmt werden. Die Richtung der größten Streckung  $x$  liegt im ENE. Da alle deformierten Ammoniten stark abgeflacht sind, und die Spiralebene der Ammoniten in der Schichtung liegt, ist anzunehmen, dass die Schichtung parallel zur Schieferungsebene bzw.  $x$ - $y$ -Ebene des Verformungsellipsoids orientiert ist. Da die stärkste Streckung nicht parallel zur Richtung des tektonischen Transports orientiert ist ( $\sigma_1$  in d;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots$  Hauptspannungsachsen eines zum kretazischen Transport gehörigen Datensatzes), wird angenommen, dass die Verformung der Ammoniten ein Effekt der Faltung in der Thiersee-Synklinale ist.
- Ammoniten auf einer Schichtfläche in mergeligen Kalken der oberen Allgäu-Fm. Die Bohrlöcher haben 2,5 cm Durchmesser.
  - Ammonit aus der Scheibelberg-Fm. (Fallstück, 6 cm breit).
  - Ammonit aus mergeligen Kalken der untersten Schrambach-Fm.
  - Orientierung des Verformungsellipsoids der Ammoniten aus a) und c).

Der Abschnitt der Achantaler Überschiebung zwischen Natterwand (1618 m) im NE und Christlumpkopf (1758 m) im SW trennt überkippten Hauptdolomit des Liegendschenkels der Unnutz-Antiklinale von Schrambach-Fm. Nördlich der Zunterspitze (1926 m) verlässt die Achantaler Überschiebung diesen Kontakt und verläuft im Hangenden der Schrambach-Fm. an der Basis der überkippten Oberalm-Fm. Knapp südlich des Gröbner Halses überschiebt die Oberalm-Fm. der Achantaler Schubmasse die Ammergau-Fm. im Liegenden, und der Kontakt bleibt Richtung SW an dieser Grenze. Hier könnte der Kontakt auch stratigraphisch sein, der Geländeverschnitt der Grenze zwischen Oberalm-Fm. und Ammergau-Fm. zeigt jedoch, dass die Grenze flach südfallend ist, während die Schichtung subvertikal steht (Abb. 2). Am Ostende der Karwendel-Synklinale muss in deren Kern eine weitere Überschiebung postuliert werden, damit der Knick zwischen Achantaler Schubmasse und Südschenkel der Karwendel-Synklinale (Synklinale und antiformale Synklinale der Seebergspitze; Abb. 2) im Hangenden einer Überschiebung liegt.

Der Verschnitt der Achantaler Überschiebung mit dem Gelände zeigt, dass die Überschiebung beinahe planar ist. Nur im Hangenden der Hofjoch- und Roßstand-Antiklinalen und der Klambach-Synklinale im Norden ist die Überschiebung mitgefaltet.

## 3.2. Der Hangendblock der Achantaler Überschiebung

### 3.2.1. Die Falten des Guffert

Die Guffert-Antiklinale liegt am Ostende der Achantaler Querstruktur im Hangenden der Achantaler Überschiebung. Die Achsenebene ist südfallend, sodass der Großteil des Wettersteinkalkes südlich des Gufferts im Hangendschenkel der Guffert-Antiklinale liegt (Abb. 4, Profil B–B'). Das Scharnier liegt in der Nordwand des Guffert knapp oberhalb der Raibl-Gr. Die Faltenachse der Guffert-Antiklinale ist am Guffert subhorizontal ESE-streichend und dreht sich gegen W ohne scharfen Knick immer weiter in Richtung NE (Abb. 5b, Diagramme Guffert E, Guffert W, Guffert SW). Der schärfste Knick befindet sich nahe des talwärtigen Endes des Westgrats des Guffert, wo die Achsenebene der Steigwand-Antiklinale gezeichnet wurde, die sich in der Rotmöserkopf-Synform nach NW fortsetzt. Da der verkehrt liegende Teil des Wettersteinkalks an der Guffert-Westseite zu geringmächtig ist, muss der Kontakt zwischen Wettersteinkalk und Raibl-Gruppe tektonisch sein.

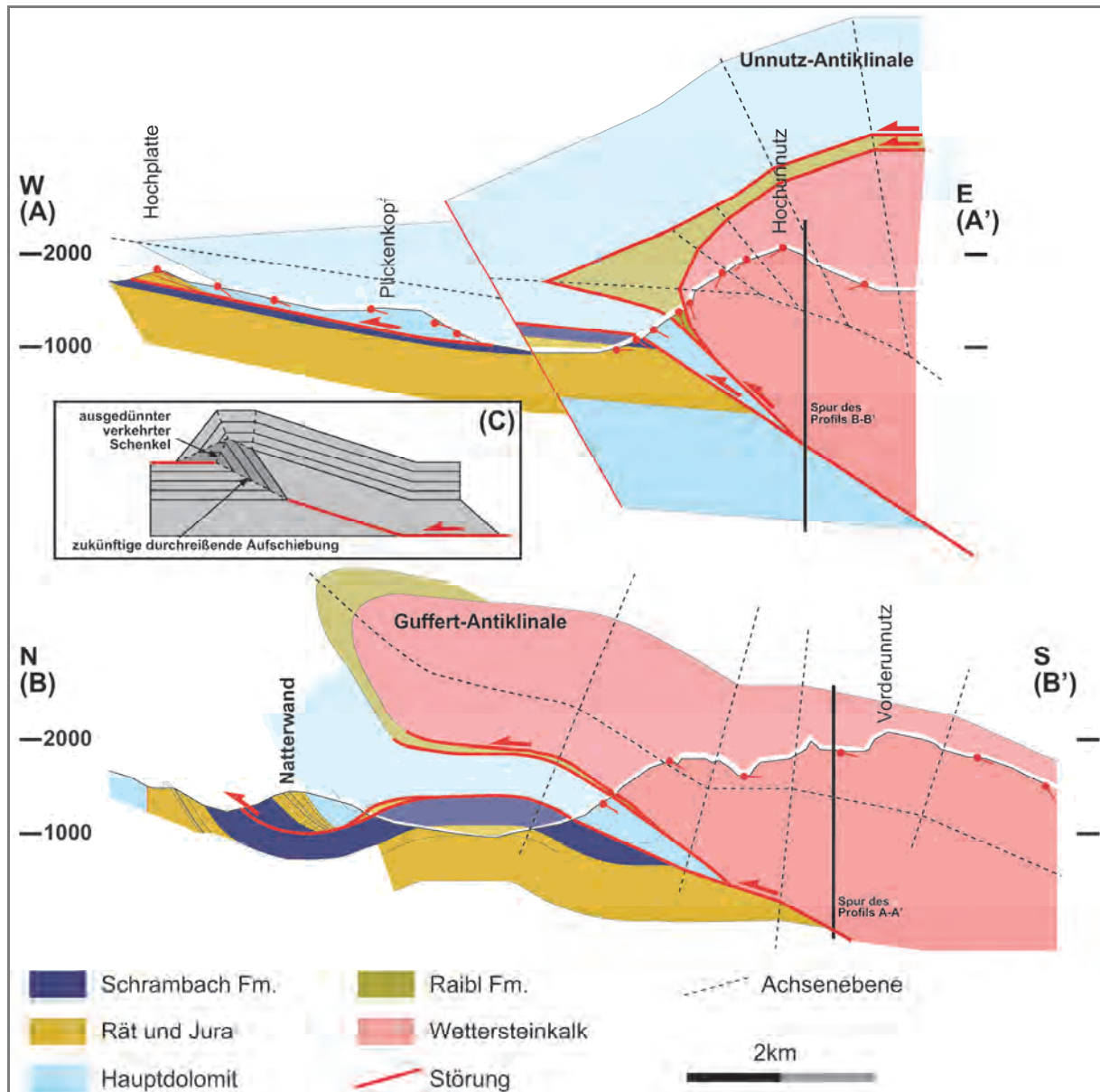


Abb. 4: Profile durch die Achenkircher Schubmasse, verändert nach ORTNER (2003).  
 A–A': W-E-Profil von der Hochplatte bis zum Hochunnutz.  
 B–B': N-S-Profil durch die Natterwand und den Vorderunnutz. Da das Profil subparallel zur Faltenachse der Unnutz-Antiklinale verläuft, erscheint die Achsenebene der Guffert-Antiklinale im Profil sehr langgestreckt.  
 C: Schema einer *progressive rollover fault-propagation fold* nach STORTI & SALVINI (1996).  
 Lage der Profilsuren in Abb. 2.



### 3.2.2. Die Falte des Unnutz

Die Unnutz-Antiklinale baut den gesamten Unnutz (Hinter-, Hoch- und Vorderunnutz) auf. Von Norden ist die Unnutz-Antiklinale deutlich als liegende Falte mit scheinbar E-fallender Achsenebene zu sehen. Die Auswertung der Orientierungsdaten ergibt eine SE-fallende Achsenebene mit einer nach S immer stärker nach SSW abtauchenden Faltenachse (Abb. 5b, Diagramme Hinterunnutz, Vorderunnutz, FW Köglalm). Im verkehrten Liegendschenkel der Unnutz-Antiklinale wird die Raibl-Gr. sowohl gegen den Hauptdolomit als auch gegen den Wettersteinkalk tektonisch begrenzt und in ihrer Mächtigkeit reduziert, was im Tal nach Steinberg zum Ausfall der Raibl-Gr. führt. Die Achsenebene der Unnutz-Antiklinale wird am Kontakt zur Raibl-Gr. abgeschnitten und taucht ca. 1 km weiter südlich am Nordende des Achensees innerhalb der Raibl-Gr. wieder auf, wo ein enges Scharnier ausgebildet ist. Die Achsenebene erreicht am Nordende des Achensees den Talboden und verschwindet, wobei der verkehrte Schenkel der Unnutz-Antiklinale unter die Talsohle verschwindet. Westlich des Achentals ist die Achsenebene durch eine Störung entlang des Oberautals versetzt, sodass nördlich des Tals der verkehrte, südlich des Tals der aufrechte Schenkel der Unnutz-Antiklinale erschlossen ist. Erst unterhalb des Kamms von der Zunterspitze zur Schreckenspitze (2022 m) verschneidet die Achsenebene in der Oberalm-Fm. wieder mit dem Gelände.

Der im Profil Hochplatte–Hochunnutz 5,5 km lange überkippte Schenkel der Unnutz-Antiklinale hat viele bisherige Bearbeiter verwundert. Zusätzlich liegt der verkehrte Hauptdolomit in diesem Profil fast parallel zur Überschiebungsfläche. ORTNER (2003) hat einen möglichen Mechanismus vorgeschlagen, der solche Falten erzeugt: Zunächst ist es notwendig, eine *fault-propagation fold* mit zusätzlicher starker lagenparalleler Scherung zu erzeugen (*progressive rollover-fault-propagation fold* nach STORTI & SALVINI, 1996; Abb. 4c). Die lagenparallele Scherung kann zur Ablösung von dicken kompetenten Lagen vom Faltenkern führen, da dort bei Biegegleitfaltung verstärkte Scherung auftritt (*hinge collapse*, vgl. RAMSAY & HUBER, 1987, S. 424), was zur Ausbildung von isoklinalen Falten führt. Bei der Unnutz-Antiklinale wurde der relativ kompetente Hauptdolomit an der inkompetenten Raibl-Gr. vom Faltenkern aus Wettersteinkalk abgelöst.

Die meisten bisherigen Autoren gingen davon aus, dass die Unnutz-Antiklinale genetisch mit der Achentaler Überschiebung zusammenhängt, z. B. QUENSTÄDT, 1933, zitiert von SAUSGRUBER, 1994: „Diese Beobachtungen zeigen, dass die Schubfläche hervorgeht aus einer liegenden Falte, mindestens in peripheren Teilen der Schubmasse und N' von der Moosenalm“. Dieser Auffassung muss widersprochen werden, da die Unnutz-Antiklinale von der Achentaler Überschiebung in verschiedenen strukturellen Niveaus geschnitten wird, und ihre Achsenebene nicht parallel zur Achentaler Überschiebung streicht. Dagegen streichen die Achsenebenen der engen bis isoklinalen Falten unter der Achentaler Überschiebung N der Zunterspitze und N und NE des Plickenkopfs (1429 m) parallel zur Achentaler Überschiebung (Abb. 2) und sind genetisch mit dieser zu verbinden.

Am Unnutz ist die Unnutz-Antiklinale mehr oder weniger zylindrisch (sub-zylindrisch nach RAMSAY & HUBER, 1987) ausgebildet, mehr als 90 % aller Flächenpole streuen um den  $\pi$ -Kreis der Falte und liegen nicht weiter als 20° vom  $\pi$ -Kreis entfernt (z. B. Diagramme FW Köglalm und Hinterunnutz in Abb. 5b). Im äußeren Teil der Unnutz-Antiklinale westlich des Achentals ändert sich dieses Bild. Die Flächenpole liegen weiter vom  $\pi$ -Kreis entfernt (z. B. Diagramm Christlum in Abb. 5a) und die Orientierung der Faltenachsen ändert sich stärker (vgl. Diagramme Seekarspitze und Christlum in Abb. 5a). Vermutlich hat der erodierte Teil der Unnutz-Antiklinale im Hangenden der Raibl-Gr. eine nicht-zylindrische Geometrie mit stark gebogenen Faltenachsen. Das ist auch in Übereinstimmung mit dem stratigraphischen Sprung an der Achentaler Überschiebung, der am Unnutz und am Plickenkopf am größten ist und von dort in beide Richtungen abnimmt, bis sowohl in der Karwendel-Synklinale im Westen als auch in der Thiersee-Synklinale im Osten die Überschiebung innerhalb der Schrambach-Fm. verläuft und verschwindet.

### 3.2.3. Die Seebergspitz-Synklinale

Die Achentaler Querstruktur endet abrupt mit dem scharfen Knick der Seebergspitz-Synklinale. An ihr wird die westfallende Schichtung wieder in N- bis NNE-fallende Orientierung gebracht. Von diesem Knick sind nicht nur der aufrechte Schenkel der Unnutz-Antiklinale und der westlich anschließenden Mondscheinspitze-Antiklinale betroffen, sondern auch deren überkippte Liegendschenkel (Abb. 2).

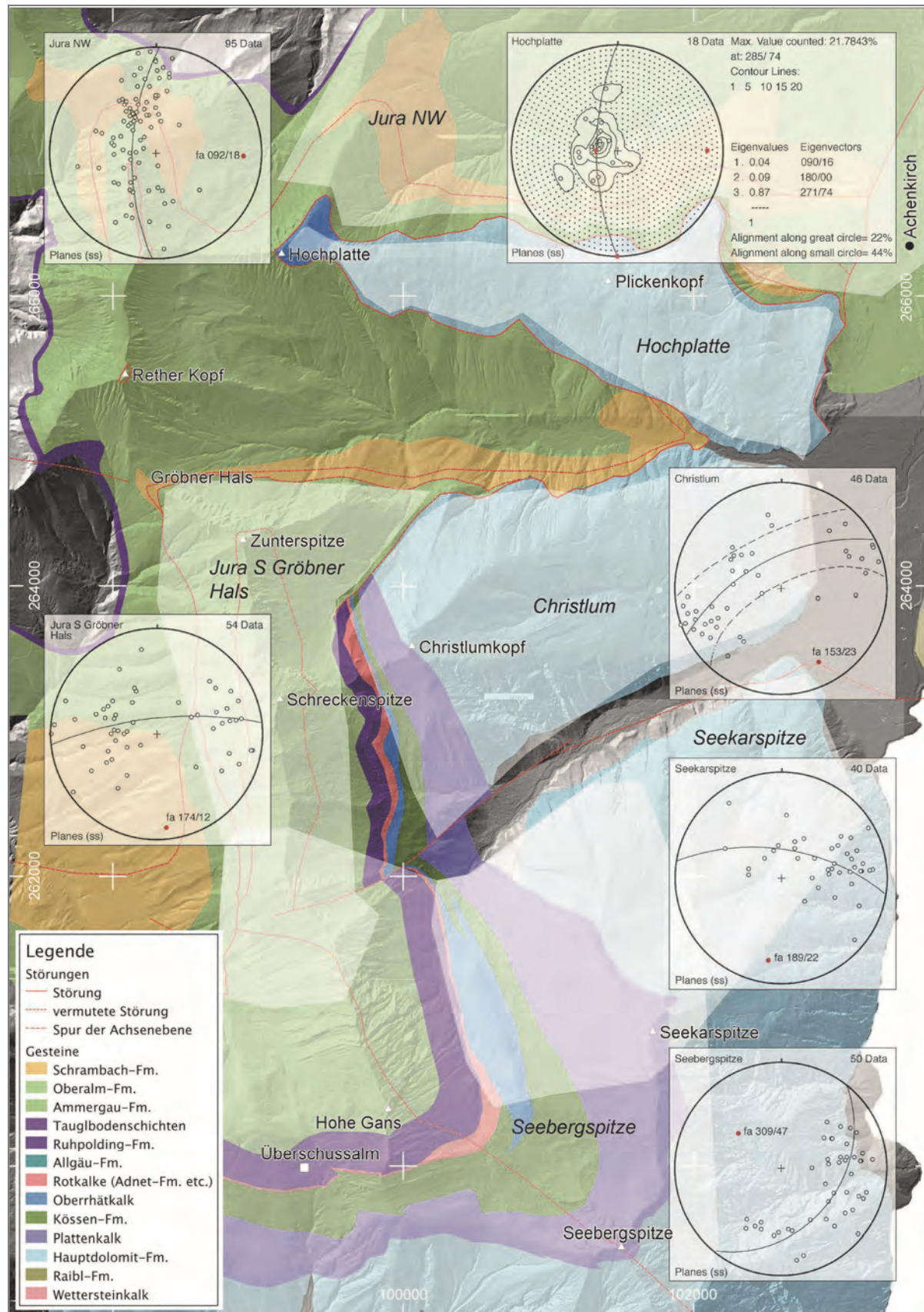


Abb. 5a: Orientierungsanalyse der Schichtung im Bereich der Achenentaler Schubmasse. Die Messbereiche sind gleich wie die Diagramme (kursiv) benannt und in der Karte hell hinterlegt.  
 Diagramme westlich des Achenentals. Erläuterungen im Text.

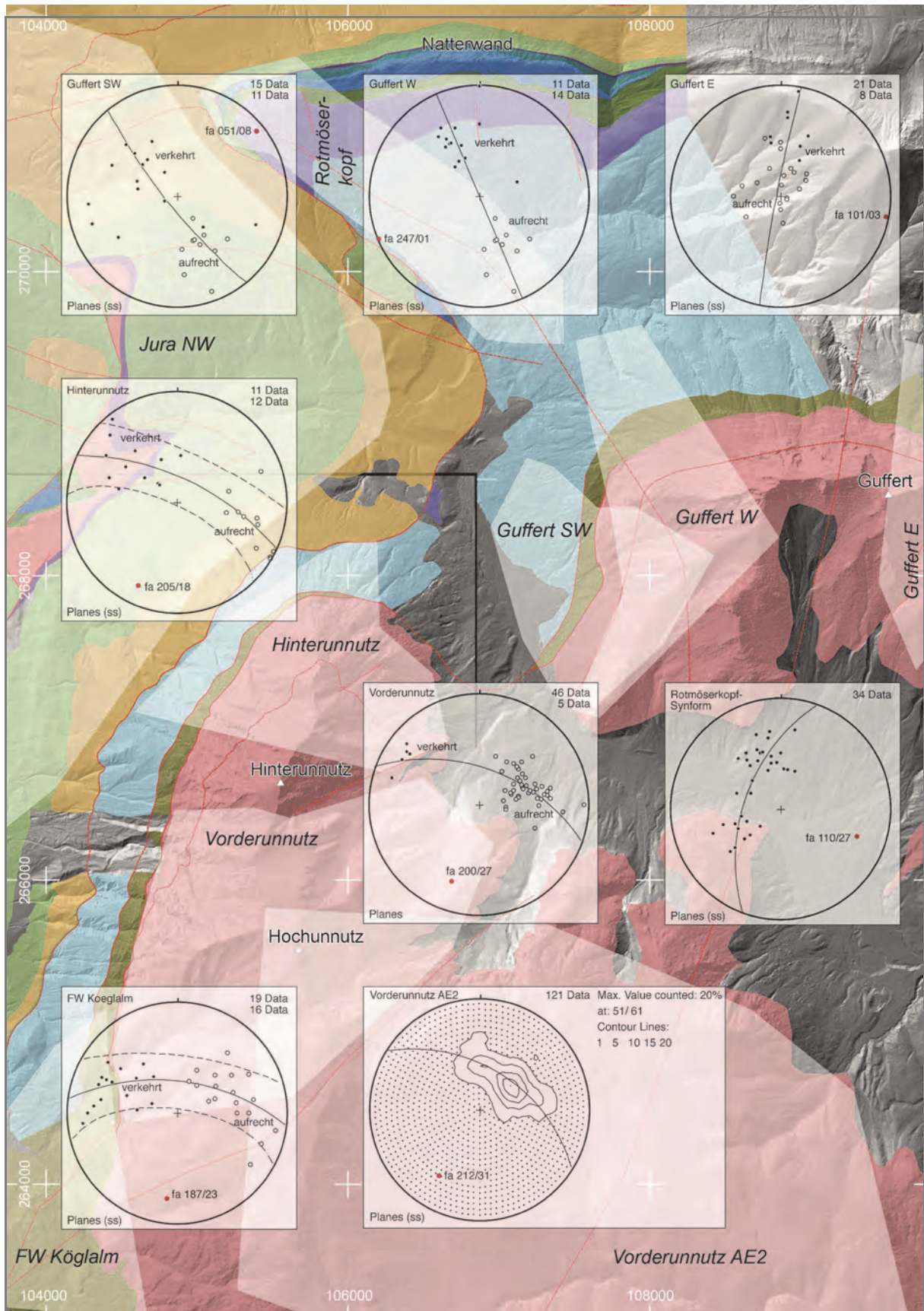


Abb. 5b: Orientierungsanalyse der Schichtung im Bereich der Achenkircher Schubmasse. Die Messbereiche sind gleich wie die Diagramme (kursiv) benannt und in der Karte hell hinterlegt. Diagramme östlich des Achentals. Erläuterungen im Text.

### 3.3. Der Liegendblock der Achantaler Überschiebung

An der Achantaler Überschiebung ist der Hangendblock auf Ammergau-Fm. oder Schrambach-Fm. überschoben. Diese Einheiten sind in enge bis isoklinale Falten gelegt, deren Achsenebenen etwas steiler als die Überschiebungsfläche nach Süden einfallen. Innerhalb der Ammergau- und Schrambach-Fm., die vorwiegend plastisch deformiert werden, bildet sich unter dem kompetenten Hauptdolomit eine Scherzone aus, innerhalb derer es zu Faltung kommt. Der Radiolarit ist von dieser Faltung nicht mehr betroffen.

Die kompetenteren Schichtglieder im Liegendblock vom Hauptdolomit bis zum Radiolarit bilden nach Norden überkippte Antiklinalen und Synklinalen (Klammbach-Synklinale, Hofjoch- und Roßstand-Antiklinale nördlich Achenkirch, Mondscheinspitze-Antiklinale, Karwendel-Synklinale und Scharfreiter-Antiklinale westlich der Achantaler Schubmasse. Die im Untersuchungsgebiet liegenden Falten N Achenkirch und die Falten direkt unter der Achantaler Überschiebung haben eine einheitliche ostfallende Faltenachse (Diagramm Jura NW, Abb. 5a, für die ersten drei Genannten) und südfallende Achsenebenen. Zum Rand der Achantaler Schubmasse hin tauchen die Faltenachsen stärker nach SE ab.

Die NNE-streichende Leiten-Aufschiebung verläuft etwa parallel zur Achantaler Überschiebung, hat aber viel weniger Versatz. Sie trennt die Hofjoch- von der Roßstand-Antiklinale und ist mit dieser verfaultet.

## 4. Altersabfolge der Strukturen

Die Wiederverfaltung von älteren Strukturen kann Hinweise auf das relative Alter geben. Dies gilt nur, wenn bei Faltenüberprägungen die Achsenebene oder ein verkehrter Faltschenkel verfaultet wird. Oder auch wenn Störungen verfaultet sind, da diese planar sein müssen, um bewegt werden zu können. Die Unnutz-Antiklinale ist an mehreren Stellen wiederverfaultet. Meist ist die Wiederverfaltung nur im verkehrten Schenkel zu erkennen. Der Hauptdolomit der Hochplatte (1813 m) zeigt ziemlich einheitliches flaches ESE-Fallen. Die Verteilung der Flächenpole zeigt eine Clusterverteilung, die beiden ersten Eigenwerte sind nahe 0. Die Asymmetrie der Datenverteilung wird von einzelnen Werten hervorgerufen, die auf kleinmaßstäbliche Faltung zurückgehen (Diagramm Hochplatte, Abb. 5a). Deutlicher ist die Wiederverfaltung in den Oberalmer Schichten südlich des Gröbner Halses zu sehen. Die Datenverteilung zeigt eine undeutliche Verteilung entlang des  $\pi$ -Kreises, die beiden zu den Faltschenkeln gehörenden Maxima sind nach N und S ausgelängt (Diagramm Jura S Gröbner Hals, Abb. 5a). Die Ursache sind untergeordnete Falten mit etwa E-W-verlaufenden Achsen. Ähnliche Falten sind auch in der Seekarspitze und deren Ostflanke entlang des Westufers des Achensees erschlossen (vgl. AUER, 2001).

Der Hangendschenkel der Unnutz-Antiklinale ist SW des Vorderunnutz (2078 m) verfaultet, wo der westfallende Wettersteinkalk in der sehr offenen Köglalm-Antiklinale langsam nach SE in südfallenden Wettersteinkalk übergeht. Es können zwei subvertikale NE-streichende Achsenebenen gezeichnet werden; die Faltenachsen tauchen steil nach SW ab (Diagramm Vorderunnutz AE2 in Abb. 5b).

Die Unnutz-Antiklinale hängt seitlich sowohl mit der Guffert-Antiklinale im E als auch mit der Mondscheinspitze-Antiklinale im Westen zusammen. In den Knickbereichen, der Steigwand-Antiklinale im E und der Seebergspitz-Synklinale im W treten keine Faltenüberprägungen auf, die zu fordern wären, wenn es sich um eine Wiederverfaltung einer älteren durch eine jüngere, anders orientierte Falte handeln würde. Eine Altersangabe für die Faltung ist nur für die Guffert-Antiklinale im Bereich der Brandenberger Gosau möglich. Dort überlagern Brekzien der Gosau-Gruppe mit einer Winkeldiskordanz von  $30^\circ$  den Wettersteinkalk im Nordschenkel der Guffert-Antiklinale, die Gosau ist wiederum um  $30^\circ$  verkippt. Im Südschenkel lagert die Gosau-Gruppe ca.  $10^\circ$  flacher als der darunterliegende Wettersteinkalk und fällt mit ca.  $25^\circ$  nach Süden. Daraus ist ersichtlich, dass die Guffert-Antiklinale bereits vor Ablagerung der Gosau-Gruppe angelegt wurde. Nachdem die Unnutz- und Mondscheinspitze-Antiklinalen mit der Guffert-Antiklinale zusammenhängen, wird auch für diese eine Anlage in der Unter-Kreide angenommen. Die oben angeführte Wiederverfaltung der Unnutz-Antiklinale zeigt, dass bei einem jüngeren Ereignis die kretazisch angelegte Falte neuerlich gefaltet wurde.

Die deutlichsten Wiederverfaltungen sind die von Störungen. So wird die Achentaler Überschiebung um die Roßstand-Antiklinale gefaltet und mit ihr der überkippte Hauptdolomit. Eine Wiederverfaltung der Rotmöserkopf-Synform lässt sich aufgrund der Schichtorientierungen nicht nachweisen. Die Achentaler Überschiebung schneidet aber auch die Scharfreuter-Antiklinale nördlich der Karwendel-Synklinale ab. Nimmt man an, dass Falten gleicher Orientierung zum selben Verformungsereignis gehören, dann zeigt sich hier das Fortschreiten N-gerichteter Scherung: zuerst Faltung im Gebiet der Karwendel-Synklinale, dann Überschiebung an der Achentaler Überschiebung und zuletzt Faltung im Bereich der Thiersee-Synklinale. Entscheidend ist, dass die Achentaler Überschiebung zwischen die Faltung der Scharfreuter-Antiklinale und der Roßstand-Antiklinale fällt und damit die heutige Überschiebungsfläche bei N-gerichteter Scherung entstanden sein muss. Auch die Leiten-Aufschiebung wird um die Roßstand-Antiklinale gefaltet. So ist der nach Norden gekrümmte Verlauf der Störung zu erklären.

Aus dem bisher Gesagten ergibt sich: Die im Achenseegebiet beobachteten Strukturen sind mindestens zwei Deformationsereignissen zuzuordnen:

- 1) Das Faltenystem der Guffert-Antiklinale, Unnutz-Antiklinale und Mondscheinspitze-Antiklinale ist kretazisch (vor Bildung der Brandenberger Gosau) angelegt. Ob zu diesem Zeitpunkt schon ein Vorläufer der Achentaler Überschiebung vorhanden war, kann nicht bewiesen werden. Die Steigwand-Antiklinale, Rotmöserkopf-Synform und Seebergspitz-Synklinale müssen als Teil des primär geknickten Faltenverlaufs ebenfalls kretazisch sein.
- 2) Bei einem jüngeren Ereignis wurden neue, E-W-streichende Falten angelegt und die kretazischen Falten amplifiziert. Die Aktivität der heute aufgeschlossenen Achentaler Überschiebung fällt ebenfalls in dieses Ereignis. Auch wenn keine direkten Datierungsmöglichkeiten vorhanden sind, wird vermutet, dass diese Strukturen im Paläogen entstanden sind.

## **5. Wie kommt es zur Bildung des geknickten Faltungsverlaufs im Hangendblock der Achentaler Überschiebung?**

Die Genese des geknickten Faltungsverlaufs ist eine der wesentlichen Fragen, die bis hierher nicht besprochen wurden. Die Orientierung von Falten in Überschiebungsgürteln hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- 1) Bei undefor miertem Schichtstapel und geringer Gesamtverformung sind die Hauptachsen der Spannung und der Verformung parallel, neugebildete Rampen und Faltenachsen stehen im rechten Winkel zur Transportrichtung.
- 2) Bei undefor miertem Schichtstapel und großer Gesamtverformung beginnen die Faltenachsen in die Transportrichtung zu rotieren, neugebildete Rampen stehen im rechten Winkel zur Transportrichtung.
- 3) Bei prädeformiertem Schichtstapel bilden sich Rampen und Faltenachsen parallel zu ererbten Strukturen.

Das Modell 3 ist sehr beliebt, um stark gebogene Faltenachsen in Überschiebungsgürteln zu erklären (z. B. PFIFFNER, 1993, für die Falten der helvetischen Decken der Schweiz). Da der Westrand der Achentaler Schubmasse zusammenfällt mit besonders großer Mächtigkeit der jurassischen Sedimente (Unterjura: Zunahme von 15 m im Rofan auf 200 m am Ostende der Karwendel-Synklinale; CHANNELL et al., 1992; Oberjura: 200 m im Rofan, 800 m am Ostende der Karwendel-Synklinale; NAGEL et al., 1976), wurde von EISBACHER & BRANDNER (1995, 1996) erzwungene Faltung am Rande eines jurassischen Beckens angenommen. Wir folgen diesem Modell für die initiale Bildung der gebogenen Falten. Die exakte Orientierung der jurassischen Strukturen ist nicht bekannt. Es muss angenommen werden, dass die Störungen im Untergrund parallel zu den Falten an der Oberfläche verlaufen. Es sind also sowohl etwa E-W-verlaufende Störungen in der Karwendel- und Thiersee-Synklinale und mindestens eine etwa N-S-verlaufende Störung im Bereich der Unnutze notwendig. Möglicherweise liegt der Liegendabbriss der Achentaler Schubmasse im Bereich unter den Scharnieren der Köglalm-Antiklinale im Liegendblock der Achentaler Überschiebung.

Die Sprunghöhe der ererbten Strukturen war vermutlich nicht besonders groß. Wenn sie in der Größenordnung der Mächtigkeitsunterschiede in jurassischen Sedimenten liegt, ist sie verglichen mit der Dicke der transportierten Einheit gering. Entscheidend ist vermutlich, dass Abscherhorizonte versetzt werden und damit mechanisch unwirksam werden; PFIFFNER (1993) hat für Kalk-Mergel-Wechselfolgen gezeigt, dass ein Verhältnis  $>0,5$  der Dicke einer inkompetenten zu einer überlagernden kompetenten Lage Abscherung in der inkompetenten Lage begünstigt, während die Lagen bei geringeren Werten gemeinsam verfaultet werden. Ein solches System kann durch steile Abschiebungen leicht gestört werden.

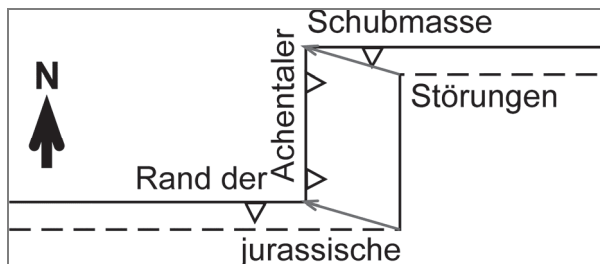


Abb. 6: Schematische Darstellung des Zusammenhanges zwischen der Orientierung von invertierten ererbten Störungen und der Überschiebungsrichtung. Nachdem die paläogenen, nordgerichteten Bewegungen in einem solchen System zu keiner großen Transportweite der Achentaler Schubmasse im Verhältnis führen können, ist ein älterer, kretazischer Transport notwendig. Der Betrag des kretazischen Transports wird umso größer (graue Pfeile), je näher die Transportrichtung bei der E-W-Richtung liegt.

Eine entscheidende Rolle bei diesen Überlegungen spielt die kretazische Überschiebungsrichtung. Damit bei der Inversion der ererbten Störungen der Versatz an der Achentaler Überschiebung größer sein kann als in der Thiersee- und Karwendel-Synklinale, muss die kretazische Überschiebungsrichtung in der Kartenansicht einen Winkel von weniger als  $45^\circ$  zu den Störungen in der Karwendel- und Thiersee-Synklinale aufweisen (Abb. 6). Die von SAUSGRUBER (1994) gemessenen Störungsdatensätze an der Achentaler Überschiebung unterstützen diese These nur teilweise. Die meisten der als kretazisch interpretierten Daten zeigen ziemlich genau nach NW ( $45^\circ$ ) (Abb. 7). Dies stimmt mit den Beobachtungen von BEER (2003) im Bereich der Achentaler Schubmasse überein. Wenn die beobachtete Transportrichtung nach NW tatsächlich der kretazischen Transportrichtung entspricht, müsste der Überschiebungsbetrag in der Karwendel- und Thiersee-Synklinale ähnlich groß wie an der Achentaler Überschiebung sein. Existierende Profile durch die Thiersee-Synklinale nahe des Guffert zeigen 4,5 km Versatz (BRANDNER & SAUSGRUBER, 2001). 15 km östlich von Brandenburg beträgt der Versatz 3,5 km (AUER, 2001; AUER & EISBACHER, 2003) bzw. 5,5 km (TÖCHTERLE, 2005). Das letztgenannte Profil zeigt starke Scherung im überkippten N-Schenkel der Guffert-Antiklinale, was zum Verschwinden der Überschiebungsfläche beitragen könnte (siehe Abschnitt 3.2.2, letzter Absatz). Alle Profile beruhen auf Interpretationen der TRANSALP Seismik, da die Überschiebung in der Thiersee-Synklinale an der Oberfläche nicht mehr aufgeschlossen ist.

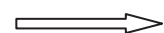
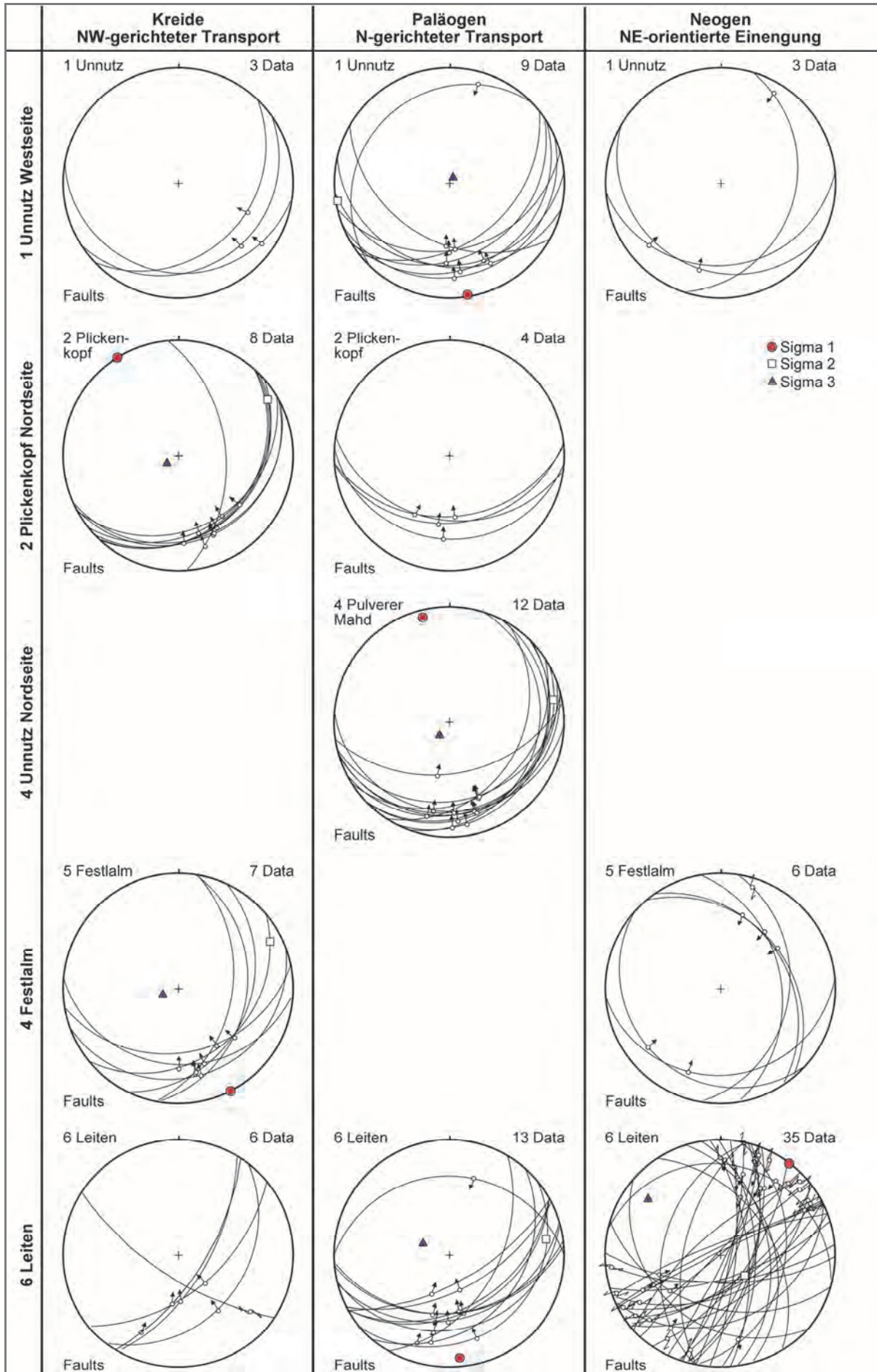


Abb. 7: Störungsanalyse an der Achentaler Überschiebung (Daten aus SAUSGRUBER, 1994). In allen untersuchten Lokalitäten ist der paläogene N-gerichtete Transport dominant. Untergeordnet konnte NW-gerichteter Transport beobachtet werden, der als kretazisch interpretiert wird. Die Nummern der Lokalitäten entsprechen den blauen Zahlen in Abb. 2.



## 6. Zusammenfassung

Das detaillierte Studium der Faltungsgeometrien im Bereich der Achentaler Schubmasse hat einige Neuergebnisse gebracht:

- 1) Die Achentaler Überschiebung und die Thiersee-Überschiebung können kinematisch nicht unterschieden werden, wie es frühere Bearbeiter getan haben (z. B. ORTNER, 2003; EISBACHER & BRANDNER, 1996). Die Bewegung an den Überschiebungen muss gleichzeitig erfolgt sein.
- 2) Die Bewegungen an den Überschiebungen waren mehrphasig. Die gegenwärtig beobachtete Geometrie des Hangend- und Liegendblocks der Achentaler Überschiebung kann nicht während eines einzigen Ereignisses entstanden sein, da die Faltung im Hangendblock vor allem die kretazische Verkürzung widerspiegelt, während die Faltung im Liegendblock nur den paläogenen Transport zeigt. Nur in den spröden Störungsflächen an der Achentaler Überschiebung sind beide Ereignisse erhalten.
- 3) Der gebogene Faltenzug des Guffert zum Unnutz und weiter nach Westen zur Mondscheinspitze muss durch erzwungene Faltung zustande gekommen sein, da Faltenüberprägungen im Bereich der Knickzonen fehlen. Es ist anzunehmen, dass der Knick auf die Inversion eines jurassischen Beckens zurückgeht (vgl. EISBACHER & BRANDNER, 1995, 1996).

## Dank

H. Ortner bedankt sich bei Midland Valley, die die 3D-Modellierungssoftware Move dem Institut für Geologie und Paläontologie in Innsbruck unentgeltlich zur Verfügung gestellt haben.

## Literatur

- AMPFERER, O. (1921): Über NW-Beanspruchungen in den Nordalpen. – Jb. Geol. B.-A., 71, 198–202, Wien.
- AMPFERER, O. (1941): Tektonische Nachbarschaft Karwendel-Sonnwendgebirge. – Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, math.-naturwiss. Kl., Abt. I, 150, 181–199, Wien.
- AUER, M. (2001): Struktur und Kinematik der nördlichen Kalkalpen im TRANSALP-Profil (Südbayern, Nordtirol). – Diss. Univ. Karlsruhe, 132 S., Karlsruhe.
- BRANDNER, R. (1985): Geologie und Tektonik – Geologische und tektonische Übersichtskarte von Tirol, mit drei Abbildungen als Beilage. – Tirol Atlas, IX, 1–12, Innsbruck.
- BRANDNER, R. & SAUSGRUBER, T. (2001): Field Trip E2: The southern margin of the Northern Calcareous Alps along the TRANSALP traverse (Rofan Mountains). – In: ORTNER, H. (Hrsg.): Field trip guide book, 5th Workshop of Alpine Geological Studies, 21–38, Innsbruck.
- CHANNELL, J.E.T., BRANDNER, R., SPIELER, A. & STONER, J.S. (1992): Paleomagnetism and paleogeography of the Northern Calcareous Alps (Austria). – Tectonics, 11, 792–810, Washington.
- CHANNELL, J.E.T., BRANDNER, R., SPIELER, A. & SMATHERS, N.P. (1990): Mesozoic paleogeography of the Northern Calcareous Alps – evidence from paleomagnetism and facies analysis. – Geology, 18, 828–831, 5 Figs., Boulder.
- EISBACHER, G. & BRANDNER, R. (1995): Role of high-angle faults during heteroaxial contraction, Inntal thrust sheet, Northern Calcareous Alps, western Austria. – GPM Innsbruck, 20, 389–406, 7 Figs., Innsbruck.
- EISBACHER, G.H. & BRANDNER, R. (1996): Superposed fold thrust structures and high angle faults, northwestern Calcareous Alps, Austria. – Ecl. Geol. Helv., 89, 553–571, 4 Figs., 2 Taf., Basel.
- FUCHS, A. (1944): Untersuchungen am Gefüge der Tiroler Alpen II (Kalkalpen, Achensee – Kaisergebirge). – N. Jb. Geol. Paläont., Abh., 88, 337–373, Stuttgart.



- GRUBER, A. (2011): Geologische Manuskriptkarte 1:25.000, ÖK 88 Achenkirch. – Unveröff. Manuskriptkarte – österreichischer Anteil, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- NAGEL, K.H. (1975): Der Bau der Thiersee- und Karwendelmulde (Tirol). – Geotektonische Forschungen, 48, 136 S., Stuttgart.
- NAGEL, K.H., SCHÜTZ, K.I., SCHÜTZ, S., WILMERS, W. & ZEIL, W. (1976): Die geodynamische Entwicklung der Thiersee- und Karwendelmulde (Nördliche Kalkalpen). – Geologische Rundschau, 65, 536–557, Stuttgart.
- ORTNER, H. (2003): Cretaceous thrusting in the western part of the Northern Calcareous Alps (Austria) – evidences from synorogenic sedimentation and structural data. – Mitt. Österr. Geol. Ges., 94, 63–77, Wien.
- ORTNER, H. & KILIAN, S. (2008): Slump structures and paleoslope: Case study in pelagic limestones of the Ammergau Formation, Ampelsbach gorge, Northern Calcareous Alps, Tyrol, Austria. – In: WAGREICH, M. (Hrsg.): Abstracts PANGEO 2008, Journal of Alpine Geology, 49, 75–76, Wien.
- PIFFNER, O.A. (1993): The structure of the Helvetic nappes and its relation to mechanical stratigraphy. – Journal of Structural Geology, 15, 511–521, Oxford.
- QUENSTEDT, W. (1933): Studien in der Überschiebungszone von Achenkirch. – Zeitschr. Deutsch. Geol. Ges., 85, 459–461, Hannover.
- RAMSAY, J.G. & HUBER, M.I. (1987): The Techniques of Modern Structural Geology, Volume 2: Folds and Fractures. – 700 S., London (Academic Press).
- RATSCHBACHER, L., FRISCH, W., LINZER, G. & MERLE, O. (1991): Lateral extrusion in the Eastern Alps, Part 2: Structural analysis. – Tectonics, 10, 257–271, 8 Figs., 1 Tab., Washington.
- ROCHA, R. & DIAS, R. (2005): Finite strain analysis using ammonoids: an interactive approach. – Journal of Structural Geology, 27, 475–479, Oxford.
- SAUSGRUBER, Th. (1994): Jurabeckenentwicklung nördlich vom Achensee und deren Folgen bei der alpidischen Kompressionstektonik. – Unveröff. Dipl.-Arb. Univ. Innsbruck, 133 S., 53 Abb., Innsbruck.
- SPENGLER, E. (1953): Versuch einer Rekonstruktion des Ablagerungsraumes der nördlichen Kalkalpen (1. Teil, Westabschnitt). – Jb. Geol. B.-A., 96, 1–64, Wien.
- SPENGLER, E. (1956): Versuch einer Rekonstruktion des Ablagerungsraumes der nördlichen Kalkalpen (2. Teil, Mittelabschnitt). – Jb. Geol. B.-A., 99, 1–74, Wien.
- SPIELER, A. & BRANDNER, R. (1989): Vom jurassischen pull-apart Becken zur Westüberschiebung der Achantaler Schubmasse (Tirol, Österreich). – Abstracts zur SEDIMENT '89, GPM Innsbruck, 16, 191–194, Innsbruck.
- STORTI, F. & SALVINI, F. (1996): Progressive rollover fault-propagation folding: A possible kinematic mechanism to generate regional-scale recumbent folds in shallow foreland belts. – AAPG Bulletin, 80, 174–193, Tulsa.
- TÖCHTERLE, A. (2005): Tektonische Entwicklungsgeschichte des Südtiles der Nördlichen Kalkalpen entlang der TRANSALP-Tiefenseismik anhand bilanzierter Profile. – Unveröff. Dipl.-Arb. Univ. Innsbruck, 91 S., Innsbruck.
- WISCHOUNIG, L. (2006): Das Quartär bei Steinberg am Rofan (Tirol): Stratigraphie, Sedimentologie und Aspekte der Landschaftsentwicklung. – Unveröff. Diss. Univ. Innsbruck, 105 S., 118 Figs., 12 Taf., Innsbruck.