



UNIGIS

Master Thesis

im Studiengang

Geographical Information Science and Systems

(UNIGIS MSc)

am Zentrum für GeoInformatik (Z-GIS)

der Paris Lodron-Universität Salzburg

GIS - gestützte Interpretation strukturgeologischer Geländedaten

vorgelegt von Dipl. Geologe Rudolf Fritzenwenger

U1248, UNIGIS MSc 2005

Gutachter: Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobel

Juni, 2007

Master Thesis

im Studiengang
Geographical Information Science and Systems
(UNIGIS MSc)
am Zentrum für GeoInformatik (Z-GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

GIS - gestützte Interpretation strukturgeologischer Geländedaten

vorgelegt von Dipl. Geologe Rudolf Fritzenwenger
U1248, UNIGIS MSc 2005

Gutachter: Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobel

Juni, 2007

Vorwort

Während meiner Tätigkeit als Strukturgeologe schrieb ich immer wieder kleine Applikationen, die mir eine große Hilfe bei der Bewältigung der Flut hochkomplexer Geländedaten waren.

Die meisten dieser Anwendungen stellen nicht-räumlich verortete Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Datentupeln her, die Rückschlüsse auf die generelle Kinematik der geologischen Situation erlauben.

Immer wieder versuchte ich mich jedoch auch an der programmatischen Umsetzung bildgebender Verfahren zur Visualisierung vorgefundener und vermessener Faltengebilde. Diesen Bemühungen entsprang das Programm GeoMatrix, welches ich für diese Arbeit nutzen konnte, um die Modelldaten zu synthetisieren.

Die strukturgeologische Interpretation von Geländebefunden ist oft sehr schwierig, da der menschliche Geist die komplexen räumlichen Zusammenhänge bei Unterschreiten einer bestimmten Datendichte nicht mehr überschauen kann. Deshalb sind solche bildgebenden Verfahren schon während der Geländetätigkeit eine große Hilfe bei der Aufstellung der Arbeitshypothesen. Je näher diese der bestehenden Realität kommen, umso sicherer kann der Geologe die weitere Feldbegehung planen, um ein Maximum an Qualität bei der nachfolgenden Bearbeitung der Daten zu erhalten.

Nicht zuletzt, weil mir solche Werkzeuge bei den Geländebegehungen immer schmerzlich fehlten, drängte es mich hierüber meine Master-Arbeit zu schreiben.

Aufbauend auf ein gängiges GI-System möchte ich den Feldgeologen Werkzeuge an die Hand geben, die es ihm ermöglichen, die Geologie besser zu verstehen und die, zumeist spärlich bemessene, Zeit optimal zu nutzen.

Mein Dank gilt all jenen, die es mir ermöglichten, dass dieser Wunsch Wirklichkeit werden konnte.

Erklärung

Hiermit erkläre ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der aufgeführten Quellen verfasst zu haben. Alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Rudolf Fritzenwenger

Hausham, Juni 2007

Abstract

Field data in structural geology describe planes and linears in space. Both can be represented as vectors in Cartesian coordinate systems. Therefore the root of the vector (the origin of the sample point) and its direction are needed. In geology the latter is indicated by two angles, one for the direction of maximum gradient on the measured plane or the direction of plunge of a linear (dip-direction) and one for the plunge itself. The data record is completed by the reference of the described structural element to a geological unit and with it into the time frame of sedimentation.

This six-dimensional data can be approximately represented in two-dimensional maps with a single sign. The geometry of single values or small groups of directly neighbouring sample points is intuitively well understandable. With more complex geometry or larger data distance however the powers of imagination very fast reach their limit.

Due to the high personal expense and the seclusion of most of the sites the survey is often very expensive (journey, locomotion, lodging and catering) and thus temporally most scarcely calculated. In this time span most expressive data must be compiled. A very close sampling would correspond to the optimum, but often is not realizable for reasons just mentioned. Therefore the ongoing construction of working hypothesis and its evaluation in regard of specific sampling is crucial.

Since right at the beginning and with more complex geology the 'devised' models turn out inaccurate to wrong, the support in the interpretation of field data with applications that visualize and determine structures can help to optimize the planning of a specific sampling. This work gives several supporting tools to a structural geologist.

In a first application the field data (limited to the orientation of layer surfaces) is processed and interpolated in expanse. This occurs by three dimensional interpolation of fold geometries of neighbouring data determined in profile sections according to the

busk-method. Thereof derived position of the inflexion- and crestlines (centerline of a saddle or a through) substantially determines the further planning of the survey.

In a second application an arbitrary surface boundary is modelled under additional use of not yet implemented data of layer affiliation. This too gives information concerning the real fold geometry of the examined area. For a better understanding the surface can be represented three dimensionally.

The projection back to the face of the ground in a third application does not bring any additional quality improvement of the calculations.

By the example of three synthetic models the presented tools are tested and their results evaluated. With a fourth model a real site situation is simulated. It can be proved that the use of the presented tools lead to optimized sampling.

The last chapter is a critical synopsis and indicates possible extensions to the tools.

Zusammenfassung

Strukturgeologische Geländedaten beschreiben Flächen und Lineare im Raum. Beide lassen sich als Vektoren im kartesischen Koordinatensystem darstellen. Benötigt werden hierzu die Koordinaten des Ursprungs des Vektors (Verortung des Messpunktes) und seine Richtung. In der Geologie wird diese mit zwei Winkeln angegeben, einem für die Richtung des größten Gradienten auf einer Fläche oder die Abtauchrichtung eines Linears (Fallrichtung, dip) und einem für den Abtauchwinkel (Schichtfallen, plunge) selbst. Vervollständigt wird der Datensatz durch die Zuordnung des beschriebenen Strukturelements zu einer geologischen Einheit und damit in den zeitlichen Rahmen der Sedimentation.

Diese sechsdimensionalen Datentupel lassen sich im zweidimensionalen Raum einer Karte durch ein Zeichen näherungsweise darstellen. Die Geometrie einzelner Werte oder kleiner Gruppen unmittelbar benachbarter Stützpunkte ist dabei intuitiv noch gut verständlich. Bei komplexerer Geometrie oder größerem Datenabstand stößt die Vorstellungskraft jedoch schnell an ihre Grenzen.

Wegen des hohen Personaleinsatzes und der Abgeschiedenheit der meisten Arbeitsgebiete sind Geländeaufenthalte oft sehr teuer (Anreise, Fortbewegung, Unterkunft und Verpflegung) und damit zeitlich meist knapp kalkuliert. In dieser Zeitspanne müssen nun möglichst aussagekräftige Daten gewonnen werden. Eine flächig sehr dichte Probenahme entspräche dem Optimum, ist aber oft aus oben genannten Gründen nicht realisierbar. Die fortlaufende Erstellung von Arbeitshypothesen und deren Auswertung in Hinblick auf gezielte Datenaquise ist deshalb zwingend notwendig.

Da gerade anfänglich und bei komplexerer Geologie ‚erdachte‘ Modelle sehr ungenau bis falsch ausfallen, kann die Unterstützung bei der Interpretation der Geländedaten durch bildgebende und strukturberechnende Verfahren die Planung der gezielten Proben-

nahme optimieren. Diese Arbeit gibt dem Geländegeologen mehrere Interpretationshilfen an die Hand.

In einer ersten Anwendung werden die Geländedaten (beschränkt auf die Raumorientierung von Schichtflächen) aufbereitet und flächig interpoliert. Dies erfolgt durch Interpolation bestimmter Faltengeometrien benachbarter Datentupel, zunächst in Profilschnitten, nach der Busk-Methode. Im Wesentlichen bestimmt die hiervon abgeleitete Raumlage der Inflexions- und Sattel- oder Troglinien die fortgeführte Planung der weiteren Probennahme.

In einer zweiten Anwendung wird unter zusätzlicher Verwendung der, noch nicht genutzten, Schichtzugehörigkeiten eine beliebige Grenzfläche modelliert. Auch diese gibt Hinweise auf die reelle Faltengeometrie des untersuchten Gebietes. Zur besseren Interpretation kann sie dreidimensional dargestellt werden.

Die Rückprojektion der modellierten Schicht auf die Geländeoberfläche in einer dritten Anwendung bringt keine zusätzliche Qualitätssteigerung der Berechnungen.

Am Beispiel von drei synthetischen Modellen werden die vorgestellten Werkzeuge geprüft und deren Ergebnisse evaluiert. Mit einem vierten Modell wird eine reale Geländesituation simuliert. Hier kann gezeigt werden, dass der Einsatz der vorgestellten Werkzeuge zu einer optimierten Probennahme führt.

Das letzte Kapitel ist eine kritische Zusammenschau und zeigt mögliche Erweiterungen auf.

Inhaltsverzeichnis

Titel		i
Vorwort		ii
Erklärung		iii
Abstract		iv
Zusammenfassung		vi
Inhaltsverzeichnis		viii
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis		ix
Abkürzungs-, Symbol- und Stichwortverzeichnis		xi
Kapitel 1	Einführung	1
1.1	Grundlagen	3
1.1.1	geologische Kartierung	3
1.1.2	Falten und Störungen	5
1.1.3	Auswerteverfahren	7
1.2	Zielsetzung und Abgrenzungen	10
1.3	Literaturüberblick und Lösungsansatz	13
1.4	Aufbau der Arbeit	17
Kapitel 2	Lösungsansatz	18
2.1	Interpolation der Geländedaten	18
2.2	Modellierung der Geometrie – Tiefenextrapolation	21
Kapitel 3	Durchführung	23
3.1	Interpolation der Raumlage	24
3.2	Idealfäche	32
3.3	Anpassung der Idealfäche	38
3.4	Hilfswerkzeuge	41
Kapitel 4	Modellierung	45
4.1	Modell I	48
4.2	Modell II	62
4.3	Modell III	68
4.4	Modell IV	73
Kapitel 5	Diskussion der Ergebnisse	84
5.1	Bewertung	88
5.2	Ausblick	92
Literatur- und Quellenverzeichnis		xiii
Anhang	Ablaufdiagramme der Werkzeuge	xv

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1.1	Die Faltelemente eines Antiklinal-Synklinalpaares	6
Abbildung 1.2	Polyphase Faltungsereignisse und die entstehenden Faltenstrukturen	6
Abbildung 1.3	Extrapolation der Faltengeometrien nach der Busk-Methode	7
Abbildung 1.4	Methode der Extrapolation der Tiefenstruktur für Knickfalten	8
Abbildung 1.5	Faltenformen der verschiedenen Klassen und zugehörige Dip-Isogone	9
Abbildung 2.1	Interpolation flächig vorliegender Stützpunkte	19
Abbildung 2.2	Bestimmung eines Differenzrasters zur Modellierung der Schichtgleichen	22
Abbildung 2.3	Projektion der modellierten Schichtgleichen auf eine beliebige Oberfläche	22
UML - Schema	Interpolation der Raumlage	24
Abbildung 3.1	Interpolation der Höhendifferenz Δ	29
Abbildung 3.2	Bestimmung der Falten-domäne	30
Abbildung 3.3	Fehlerhafte Geländekorrektur	31
UML - Schema	Idealfäche	32
Abbildung 3.4	Ideale Summationsvorschrift	35
UML - Schema	Anpassung der Idealfäche	38
Abbildung 3.5	Bestimmung der Korrekturstützpunkte	39
UML - Schema	Projektionswerkzeug	41
Titel Kapitel 4.1	Aufbau Modell I (+II)	48
Abbildung 4.1	TIN – Korrektur	50
Abbildung 4.2	Faltenachsen Modell I	51
Abbildung 4.3	Ergebnisraster der ersten Anwendung	52
Abbildung 4.4	Orthogonalität von Streichen und Fallen	53
Abbildung 4.5	Interpolation der Ergebnisse	53
Abbildung 4.6	Winkelabweichung der Berechnung	55
Abbildung 4.7	Schichtgleichenkorrektur	58
Abbildung 4.8	Idealfäche	58
Abbildung 4.9	3D – Darstellung der Idealfächen	60
Abbildung 4.10	Winkelabweichung nach Projektion	61
Titel Kapitel 4.2	3D – Darstellung der Idealfäche des Modell II	62
Abbildung 4.11	Anwendung I	64
Abbildung 4.12	Orthogonalität von Streichen und Fallen (Modell II)	65
Abbildung 4.13	Validierung der Berechnung	66

Abbildung 4.14	Schichtgleichenkorrektur (Modell II)	67
Abbildung 4.15	Idealfäche (Modell II)	67
Titel Kapitel 4.3	Aufbau Modell III (+IV)	68
Abbildung 4.16	Faltenachsen Modell III	69
Abbildung 4.17	β – Raster	70
Abbildung 4.18	α – Raster	70
Abbildung 4.19	Interpretation der Ergebnisse	71
Abbildung 4.20	Validierung der Berechnung	71
Abbildung 4.21	Idealfäche	72
Titel Kapitel 4.4	Verschneidung Gelände – Modellfläche	73
Abbildung 4.22	Route 1	74
Abbildung 4.23	α, β Raster der Route 1	75
Abbildung 4.24	Winkelfehler, Route 1	75
Abbildung 4.25	Idealfäche, Route 1	76
Abbildung 4.26	Route 2	77
Abbildung 4.27	α, β Raster, Route 2	78
Abbildung 4.28	Winkelfehler, Route 2	78
Abbildung 4.29	Idealfäche, Route 2	78
Abbildung 4.30	Interpretation, Route 2	79
Abbildung 4.31	α, β Raster, Route 2, zweiter Tag	80
Abbildung 4.32	Winkelfehler, Route2, zweiter Tag	80
Abbildung 4.33	Route und Datenbasis, Tag2	81
Abbildung 4.34	α, β Raster, Route 2, zweiter Tag (real)	82
Abbildung 4.35	Winkelfehler, Route 2, zweiter Tag (real)	82
Abbildung 4.36	Idealfäche, Route2, zweiter Tag (real)	82
Abbildung 4.37	Beschnittmaske und Statistiken	83
Abbildung 4.38	3D-Darstellung der Idealfäche	83
Abbildung 5.1	Abhängigkeit von Rechenzeit und Gebietsgröße	85
Abbildung 5.2	Sekundäre Stützpunkte durch Berücksichtigung der Korrelationslänge	93
Abbildung 5.3	Glättung der Idealfäche	94
Tabelle 1	Summationsvorschrift	34
Tabelle 2	Anzahl darstellbarer Falten in Abhängigkeit von Geländegröße, Rechenzeit	85
Tabelle 3	Ablauf der Interpretation	86f

Abkürzungs-, Symbol- und Stichwortverzeichnis

- α** Winkelbezeichnung der Fallrichtung einer Schichtfläche oder eines Linears in Grad von Nord.
- β** Winkelbezeichnung des Fallens einer Schichtfläche oder eines Linears in Grad von der Horizontalen.
- Ω** Winkelbezeichnung der Abweichung der berechneten Schichtfläche von der Modellrealität. Er stellt den absoluten Fehler dar.
- m** Meter
- km** Kilometer
- GHz** Giga-Hertz ($1\text{GHz} = 10^9\text{ Hz}$), Frequenz; In diesem Fall Taktfrequenz eines Computers: Anzahl der Arbeitsschritte, die der Computer pro Sekunde schafft.
- MB RAM** Megabyte Random Access Memory ($1\text{MB} = 10^6\text{ Byte} = 8 \cdot 10^6\text{ bit}$), Festspeicher eines Computers: 1 bit entspricht der Speicherung eines binären Zustands.
- Antiklinale** Sattelförmiger Bereich einer Falte (im engeren Sinne nur bei Verjüngung der Gesteine vom Faltenkern weg, sonst Antiform)
- Ausbiss** Stellen, an der ein bestimmter Leithorizont die Geländeoberfläche schneidet. Hier ‚beißt‘ entsprechender Marker in die Luft aus.
- Busk – Methode** Methode, nach der aus einzelnen Beobachtungen der Lage der Gesteine eine oberflächennahe Rekonstruktion der Zusammenhänge im Untergrund ableitbar ist.
- Crestline** (engl.: Kammlinie), bestimmter geometrischer Teil einer Falte: Linie entlang der Flächen geringsten Einfallens einer Falte. Entspricht im deutschen den Trog- und Sattellinien.
- Fallen** (auch Einfallen) Neigung einer Schichtfläche oder eines Linears gegenüber der Horizontalen.
- Fallrichtung** Richtung der (größten) Neigung eines Linears oder einer Schichtfläche.
- Faltenachse** bestimmter geometrischer Teil einer Falte: Linie entlang der Fläche mit der stärksten Krümmung in der Falte. Ist dieser Teil der Falte aufgeschlossen, so kann die Faltenachse direkt gemessen werden.
- Feature Dataset** proprietäres Dateiformat von ArcGIS
- Idealfläche** Vom Autor eingeführter Begriff für die synthetisch bestimmte Form und Raumlage eines bestimmten Leithorizontes (Anwendung II dieser Arbeit).

Inflexionslinie Bestimmter geometrischer Teil einer Falte: Linie entlang der Fläche geringster Krümmung in einer Falte. An dieser Stelle kann die Krümmungsrichtung wechseln.

Leithorizont Bestimmte, leicht erkennbare und weit zu verfolgende Schichtfuge oder Bank. In der Regel zeigen sie überregionale Wechsel in den Ablagerungsbedingungen an. Sie dienen der stratigraphischen Einstufung der Gesteine.

Scheinbares Einfallen Fallen einer Gesteinsschicht im Anschnitt eines Profils. Streicht das Profil in Fallrichtung, so entspricht das scheinbare Einfallen dem tatsächlichen Schichtfallen, sonst fällt es kleiner aus!

Schichtgleiche Vom Autor eingeführter Begriff zur Bezeichnung der Zugehörigkeit verschiedener Punkte zu einer bestimmten Schichtfuge. Sie entstammen der gleichen Schicht.

Schulterlinie (= Sattellinie) siehe crestline

Shapefile natives Dateiformat von ArcGIS

Simple shear Mögliche Gesteinsbewegung in tieferen Krustenbereichen (oder Plutonen): Es handelt sich um paralleles Gesteinsfließen, ähnlich dem Verschieben eines Kartenstapels. Es führt zu paralleler Faltung der betroffenen Gesteine.

Streichen Richtung der geringsten Neigung (= Horizontale) einer Fläche. Das Streichen steht senkrecht zur Fallrichtung!

Synklinale Muldenförmiger Bereich einer Falte (i.e.S. nur bei Verjüngung der Gesteine zum Faltenkern, sonst Synform)

Synthetische Faltenachse Zwei, nicht-parallele Flächen schneiden sich in einem Linear, das als Drehachse eine Fläche in die andere überführen kann. Kann eine Faltenachse im Gelände nicht direkt gemessen werden, so ist sie leicht aus den Lageparametern zweier eingemessener Schichtflächen synthetisch zu rekonstruieren.



Kapitel 1 Einführung

Für die Lösung vieler geologischer Fragestellungen ist die direkte Datennahme im Gelände ein unverzichtbarer Bestandteil. Diese Datengrundlage wird oft erweitert durch direkte Beobachtungen an Bohrlöchern, geophysikalische Messungen und indirekte Daten der Fernerkundung. Besonders in der Strukturgeologie, vor allem im lokalen bis regionalen Maßstab, ist eine möglichst flächendeckende Beprobung im Gelände essentiell. Je großmaschiger die Daten erhoben werden, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit eine wichtige Struktur zu übersehen und umso größer ist die Gefahr, dass die vorhandenen Daten durch ein falsches Gedankenmodell erklärt werden [Kelk 1992].

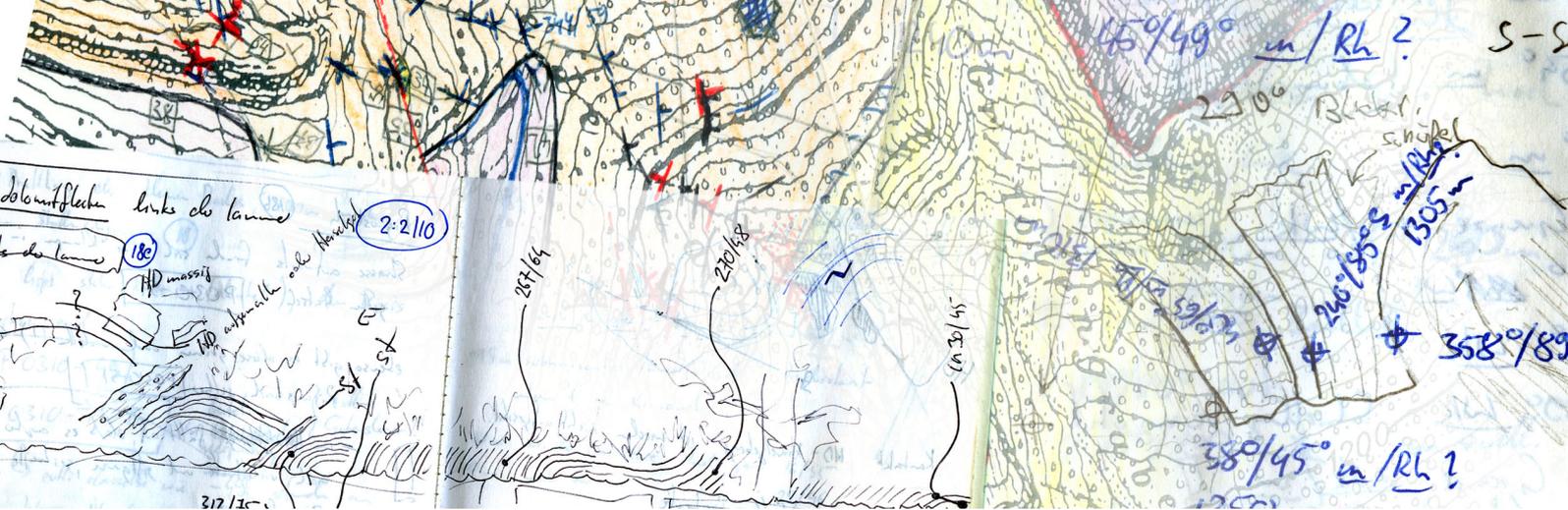
Doch die Datenaufnahme im Gelände ist zeitaufwändig und die Feldkampagnen, nicht zuletzt aus Geldgründen, zeitlich meist sehr knapp kalkuliert. Eine flächendeckende Beprobung fällt aus diesen Gründen zumeist aus. In solchen Fällen ist es unabdingbar durch begleitende Interpretation der gewonnenen Daten bereits während der Feldarbeit Arbeitshypothesen zu erstellen, die es den Strukturgeologen ermöglichen, die Planung der weiteren Probennahme zu optimieren. Hierbei gilt es Unkonformitäten wie Störungen oder sedimentologische Unregelmäßigkeiten zu entdecken und in den verbliebenen, zusammenhängenden Datenbereichen die Geometrie der Strukturen möglichst exakt zu erfassen. Nur dann ist eine reduzierte Probennahme sinnvoll zu planen.

Bei einfacher Lage der sedimentologischen Grenzflächen kann zumeist schon während der Geländearbeit abgeschätzt werden, wie der geologische Aufbau aussieht. Ein erfahrener Strukturgeologe mag darüber hinaus auch mit komplexeren Geometrien zurechtkommen. Doch bleiben diese ‚erdachten‘ Modelle immer überaus einfach und ermöglichen kaum eine genaue Deutung der aufgefundenen Daten. Zudem ist eine fälschliche Interpretation der Strukturen gefährlich, da sie zu einseitiger Datenauf-

nahme verführen kann, wenn versucht wird schon im Gelände das erdachte Modell zu verifizieren. Fatal kann sich dieses sogar auswirken, wenn sich erst bei der nachfolgenden Auswertung der Daten herausstellt, dass die Arbeitshypothesen nicht richtig waren und es keine Möglichkeiten mehr gibt, weitere Daten nach zu erheben! Eine Interpretation während der Feldarbeit ist auch notwendig zur Kontrolle der Qualität der Daten.

In den knapp kalkulierten Geländeaufenthalten bleibt oft zuwenig Zeit, mittels konstruierter Geländeschnitte und Kartenaktualisierungen die Interpretation der Daten zu einem Modell sauber herauszuarbeiten und im weiteren Verlauf der Kartierungen nachzuführen. Doch gerade dies ist immens wichtig für die fortgeführte Planung der Datenaufnahme. Verborgene Störungen, verfehlte Faltenachsen und falsch zugeordnete Gesteinsproben führen zu unwiederbringlichen Informationsverlust, der nur vor Ort ausgeglichen werden kann.

Eine interaktive und möglichst zeitnahe Unterstützung des Geologen durch bildgebende Verfahren der komplexen Inhalte ist deshalb wünschenswert und wichtig. Trotz vieler Ansätze und zum Teil auch kommerzieller Anwendungen, zum Beispiel für die Erdölindustrie, besteht weiterhin dringender Forschungsbedarf [Siehl 1993].



1.1 Grundlagen

1.1.1 Geologische Kartierung

Die geologische Kartierung dient der Sammlung geologisch relevanter Daten in einem zu untersuchenden Geländeabschnitt. Aufgabe ist es, die an der Erdoberfläche exponierte Geologie vor Ort zu erfassen und zu beschreiben. Hierzu wird versucht möglichst flächendeckend Daten zu erheben.

Ein vollständiger Datensatz besteht dabei mindestens aus der Aufnahme der sedimentären Strukturen (räumliche Orientierung der Schichtung der Gesteine, sedimentäre Schieferung, synsedimentäre Merkmale, etc.), der tektonischen Strukturen (Richtung von Faltenachsen, Schieferung infolge von Faltung, räumliche Orientierung von Störflächen, Richtung von Strömung auf Störungsflächen, etc.), von Daten zur Lithologie (Zusammensetzung der Sedimente, Gefüge- und Faziesmerkmale, etc.) oder Petrographie (mineralische Zusammensetzung der Gesteine, Metamorphosegrad, etc.) und zur Paläontologie (Fossilinhalt, Paläogeographie, etc.). All diese Daten beschreiben die Topologie der Gesteine! In die gängige Modellierung der geologischen Strukturen wird jedoch nur ein Bruchteil der möglichen Merkmale einbezogen. Während die Strukturen naturgemäß von hoher Bedeutung sind, interessiert von all den anderen Merkmalen in der Summe lediglich eine möglichst genaue Einschätzung der Zugehörigkeit der vorliegenden Gesteine zu bestimmten geologischen Einheiten. Wichtigste Aufgabe diesbezüglich ist die Aufnahme der sogenannten Ausbisslinie im Gelände, also der Orte, an denen ein Gesteinswechsel zu beobachten ist. Hierzu reicht die Lokalisierung dieser Orte mit Angabe der aneinander grenzenden Gesteinseinheiten. Die Erfassung der räumlichen Lage der Strukturen erfolgt mit dem Kompass.

Um die Orientierung einer Richtung im Raum eindeutig zu beschreiben, braucht es fünf Angaben, die Koordinaten des Messpunktes (x, y, z) und zwei orthogonale Winkel

(α , β), die einen Vektor aufspannen. Bei linearen Strukturen wie Faltenachsen oder Strömungen auf einer Fläche, bestimmt man α als Himmelsrichtung des Abtauchens des Lineaments in Grad von Nord und β als Tauchwinkel (von der Horizontalen positiv nach unten). Da die Flächennormale, die als Senkrechte auf einer Fläche diese eindeutig im Raum beschreibt, im Gelände nicht direkt zu messen ist, werden α und β als Streichen und Fallen aufgenommen. Fallen entspricht hierbei der Richtung auf der Fläche, die ein Wassertropfen hinunterrinnen würde. Das Streichen steht senkrecht dazu und ist die Richtung der Horizontalen auf dieser Fläche. Da man eine Horizontale in zwei Richtungen messen kann, muss noch angegeben werden, in welche Richtung das Gestein einfällt. Es braucht also eine zusätzliche Angabe.

So könnte zum Beispiel eine Fläche, die mit 30° nach Nordost einfällt, sowohl als 135/30 N, als auch als 315/30 N beschrieben werden.

Um Unsicherheiten bei der Messung vorzubeugen, und vor allem um eine Angabe zu sparen, wird heute meist die Fallrichtung angegeben. Diese ist bauartbedingt nicht mit jedem Kompass ohne Hilfsmittel einmessbar, wenn aber, so kann die Schichtfläche in einem Messvorgang bestimmt werden. Im vorigen Beispiel erhielte man als Datentupel: 45/30.

Die Geländearbeit gipfelt in der Erstellung einer geologischen Karte mit eingetragenen Messwerten, Ausbisslinien und weiterer Beobachtungen, vermerkt im zugehörigen Geländebuch. Diese Daten dienen als Grundlage weiterer Interpretationen, wie Interpolation der Messergebnisse und Rekonstruktion der oberflächennahen Geologie oder der Extrapolation dieser Strukturen in den Untergrund (und auch himmelwärts) und letztendlich der Rekonstruktion der Entstehung des bearbeitenden Gebietes. Geophysikalische Meßmethoden und Auswertung fernerkundlich erstellter Bilder ergänzen diese Datengrundlage.

1.1.2 Falten und Störungen

Gerät ein Gesteinsverband unter Druck, so kann der Stress durch verschiedene Mechanismen abgebaut werden. Je nach Tiefe, Temperatur und Kräfteverhältnis reagiert das Gestein eher spröde oder duktil. Dabei nimmt die Plastizität mit Auflastdruck und Temperatur zu, bis in größeren Tiefen ab etwa 15 Kilometer relative Bewegungen durch Gesteinsfließen stattfinden können.

Kann die Spannung des Gesteins nicht kontinuierlich durch Faltung abgebaut werden, so entsteht durch das plötzliche Auseinanderreißen eine Verwerfung, eine Fläche, an der ein Versatz im Gestein zu beobachten ist. Es passiert ein Erdbeben. Solche Störungen werden im Laufe der Zeit immer wieder aktiviert werden, so dass sich ein immenser Versatz akkumulieren kann. Während die Geometrie einer Störfläche, abgesehen von leichten Verbiegungen, schnell beschrieben ist, sind Falten weitaus komplizierter aufgebaut.

Die korrekte Messung und Interpretation von Schichtflächen aus verschiedenen Teilen einer Falte geben wertvolle Hinweise über deren Geometrie und Mechanik. Dabei sind Informationen zur räumliche Orientierung der Falte in ihrer Umgebung und Daten zum geometrischen Aufbau der Falte selbst zu unterscheiden. Letztere sind selten im Gelände aufzunehmen und werden daher oft aus rekonstruierten Falten bestimmt. Es handelt sich um Parameter wie Faltenbreite und Faltenhöhe, Wellenlänge und Amplitude von Falten, deren Öffnungswinkel, Fourieranalyse der Faltenform, Vergenz oder Falten Spiegel. Sie alle versuchen die enorme Vielfalt der auftretenden Formen zu beschreiben. Informationen zur räumlichen Orientierung einer Falte in ihrer Umgebung sind jedoch sehr wohl im Gelände einmessbar.

Die Scheitellinie in der Antiform (Sattel) und die Troglinie in der Synform (Mulde) einer Falte (im Englischen beides crest line) sind im Profil die Punkte, an der eine angelegte Tangente horizontal wird. Dagegen erreicht eine Tangente am Punkt der Wende- oder Inflexionslinie (inflexion line) die größte Steigung. Entlang dieser Linie wechselt die Falte ihre Biegerichtung. Die Linien größter Krümmung heißen Scharnierlinien oder Faltenachsen (hinge line). Im Querschnitt einer Falte spannen sie die sogenannte Achsenebene (fold axial plane) auf.

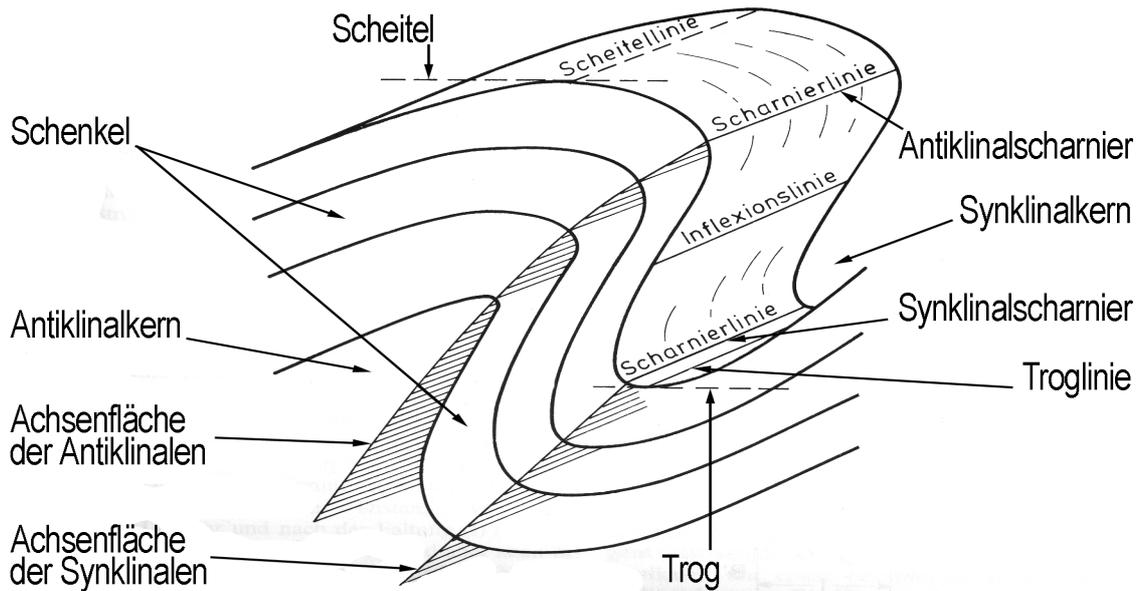


Abbildung 1.1 Die Faltenelemente eines Antiklinal-Synklinalpaares (nach Eisbacher 1996)

Jede einzelne Falte kann sehr unterschiedliche Formen annehmen. Sie kann ausladend rund, konzentrisch und zylindrisch sein oder sehr eng als sogenannten Knickfalte. Sie kann mehrere Kanten besitzen, kann aufrecht stehen oder mit einer Vergenz zur Seite geneigt sein, sogar liegend oder abtauchend. Dazu kommt, dass eine bestehende Faltung von einem zweiten Einengungsereignis (superposed folding) erfasst werden kann, und so komplizierte überprägte Falten entstehen.

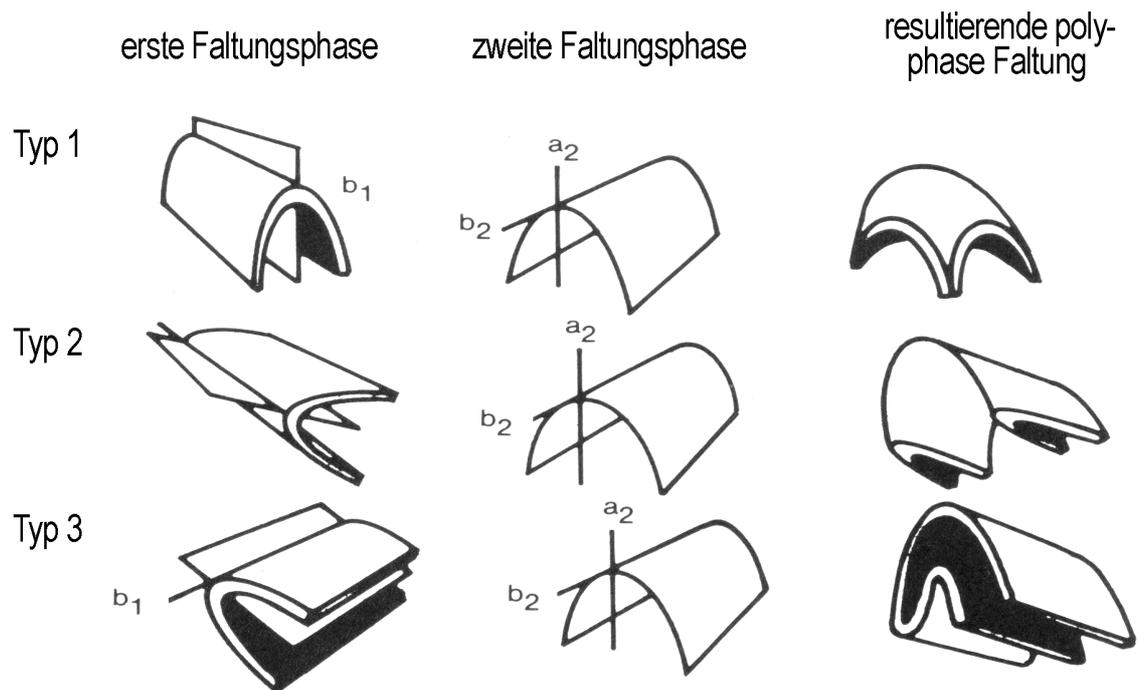


Abbildung 1.2 Polyphase Faltungsereignisse und die entstehenden Faltenstrukturen (nach McClay 1987)

1.1.3 Auswerteverfahren

Bei der Rekonstruktion von Faltengeometrien im 2D-Profil aus Geländedaten gibt es drei gängige Methoden. Für runde und möglichst konzentrische Falten kann die schnelle und einfache *Busk-Methode* (Kreisbogenmethode) genutzt werden. Hierzu wird ein Profilschnitt senkrecht zur Richtung der Scharnierlinien vorbereitet. Die projizierten Messwerte (scheinbares Einfallen) aus dem direkten Umfeld werden eingezeichnet und darauf Senkrechten errichtet. Der Schnittpunkt zweier benachbarter Senkrechten stellt den Durchstoßpunkt der Faltenachse der zugehörigen Schichtflächen dar. Die Geometrie der Falte innerhalb dieser Grenzen entspricht konzentrischen Kreisen um die bestimmte Faltenachse. Im Bereich dieser Zentren sind oft Störungen ausgeprägt. Diese Abscherhorizonte stellen wegen der einhergehenden Diskontinuität der Gesteinsschichten natürliche Grenzen der Extrapolation dar.

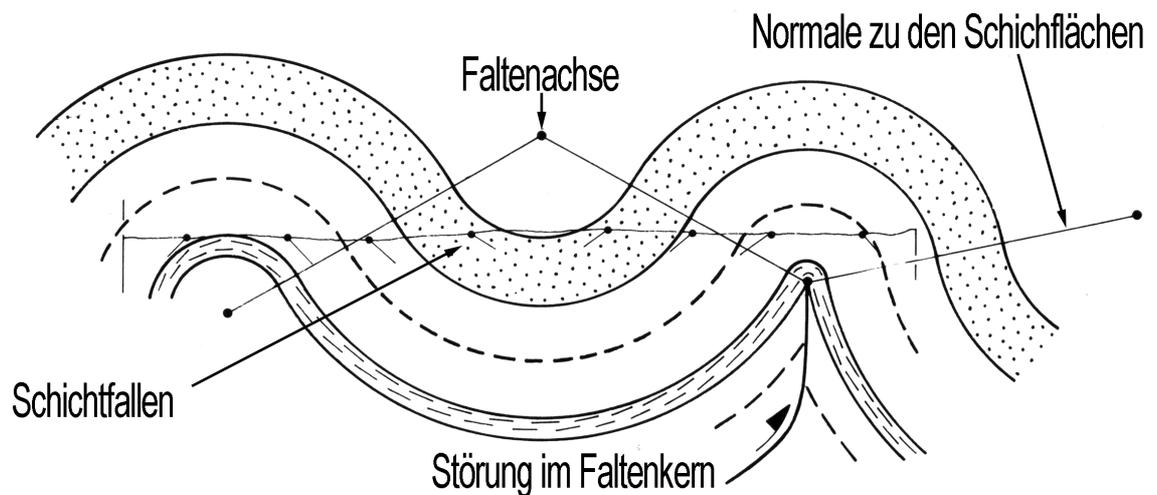


Abbildung 1.3 Extrapolation der Faltengeometrien nach der Busk-Methode (nach Eisbacher 1996)

Eine Methode mehr für Knickfalten ist die Konstruktion nach der *Regel von Faill-Suppe*. Hier wird im Profil etwa mittig zwischen benachbarten Messpunkten eine Senkrechte auf dem gemittelten Fallwert erstellt. Zwischen diesen Achsenflächen liegt das Gestein mit dem darin eingeschlossenen Fallwert des Messpunktes. Da der natürliche Verband der Schichten nur an diesen Knickzonen gestört ist, stellen diese potentielle Schwächezone dar. Entlang dieser Achsenflächen kann das Gestein leicht brechen und eine Extrapolation darüber hinaus ist nicht mehr zulässig.

Eine Verfeinerung dieser Technik ist die *Grenzstrahlenmethode*. Hier basiert die Senkrechte nicht auf dem Mittelwert benachbarter Fallwerte, sondern auf einen tabellarisch zu bestimmenden Wert, abhängig von deren Größe und Differenz.

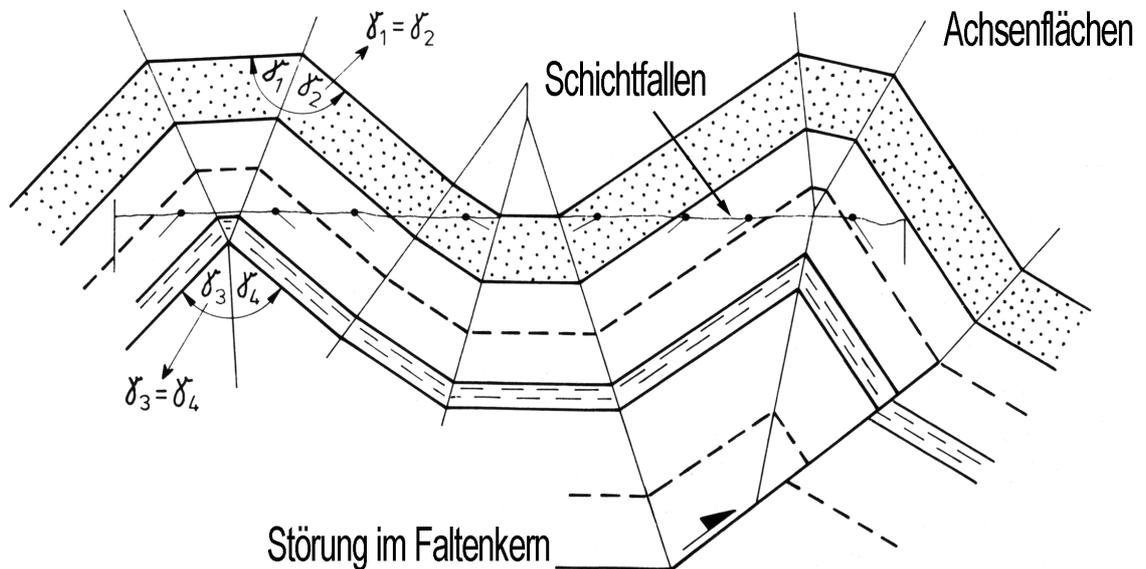


Abbildung 1.4 Methode der Extrapolation der Tiefenstruktur für Knickfalten (nach Eisbacher 1996)

Knickfalten sind in der Natur nur anzutreffen, wenn das verfaltete Gestein aus einer Wechsellagerung dicker und fester Schichten und sehr dünner, weicher Schichten besteht. Konzentrische Falten sind als Sonderfall von Falten in der Natur sogar unüblich. In beiden Fällen ist die Mächtigkeit senkrecht zur Schichtfläche durchgehend gleich groß.

Die Festigkeit wechsellagernder Schichten innerhalb eines Gesteinspakets hat einen großen Einfluss auf die Ausprägung der Falten. So fließen weniger kompetente Lagen während der Faltung in die Sattel- und Muldenkerne festerer Schichten und ermöglichen diesen damit eine größere Amplitude. Je nach Mächtigkeitskontrast wird die Faltengeometrie der kompetenten Schichtflächen eher konzentrisch bis eckig ausfallen. So ändert sich der Faltenstil von Schicht zu Schicht.

Sind in einem Multilayer sehr dicke, inkompetente Schichten eingeschaltet, dann kann es über diese sogar zu einer Entkoppelung der Faltengeometrien kommen. Sogenannte disharmonische Falten zeigen im Hangenden dieser Trennschicht eine andere Faltenbreite (Frequenz) als im Liegenden und eine Extrapolation über solche Horizonte ist nicht zulässig.

Um zumindest den harmonischen Teil von Faltenzügen besser in die Tiefe extrapolieren zu können, verwendet man die *Dip-Isogon Methode*. Sie setzt allerdings Kenntnis über die Festigkeiten der beteiligten Gesteinsschichten voraus. Diese Daten können nur im Labor erhoben werden. Oft genügt aber eine gute Abschätzung. Anhand der Werte kann den zu modellierenden Schichten jeweils ein Faltenzügen zugeordnet werden. Diese unterscheiden sich im Verhalten ihrer Isogone. Das sind Verbindungslinien zwischen Tangenten mit der gleichen Steigung, die an der Außen- und Innenseite einer gefalteten Schicht angedacht sind. Konvergente Isogone erzeugen eine Falte, deren innere Grenzfläche stärker gekrümmt ist als deren Äußere. Sie sind den kompetenteren Lagen zuzuschreiben. Bei divergenten Isogonen verhält es sich umgekehrt.

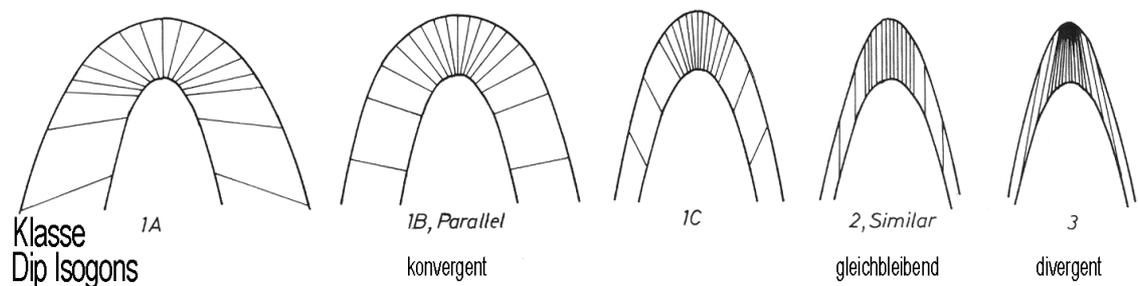


Abbildung 1.5 Faltenformen der verschiedenen Klassen und zugehörige Dip-Isogone (nach Ramsay & Huber 1987)

Ein direkter Vergleich der Busk-Methode und der Dip-Isogon Methode mit Extrapolation in die Tiefe zeigt deutliche Unterschiede. Bei guter Abschätzung der Gesteinsfestigkeiten kann die Dip-Isogon Methode sehr gute Resultate liefern.

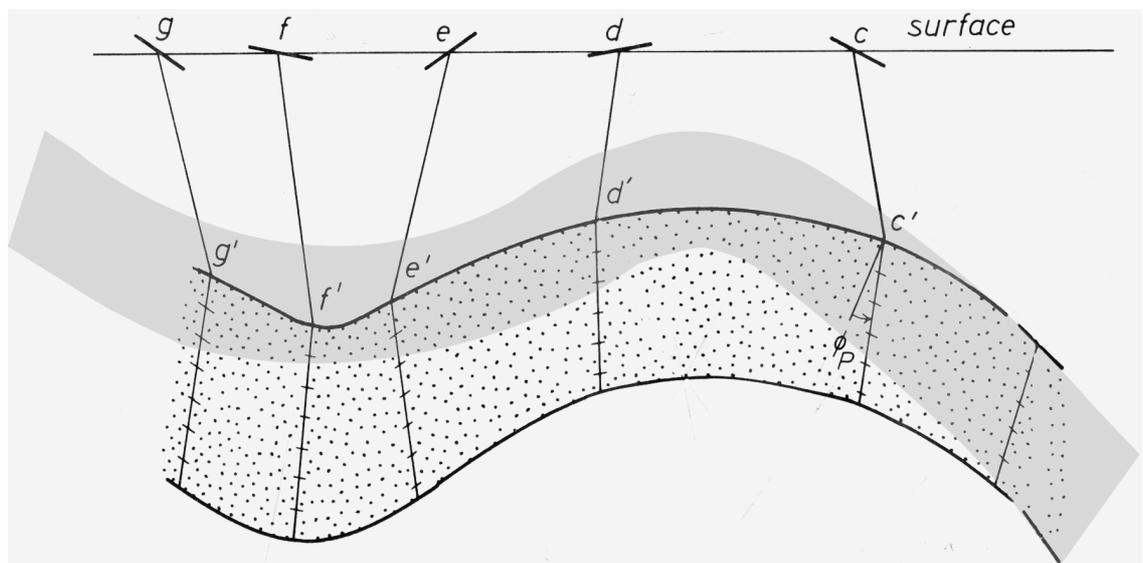


Abbildung 1.6 Tiefenextrapolation nach der Dip-Isogon Methode. Die gepunktete Bank hat eine höhere Gesteinsfestigkeit. Grau unterlegt zum Vergleich die Modellierung nach der Busk-Methode. (nach Ramsay & Huber 1987)



1.2 Zielsetzung und Abgrenzungen

Die vorliegende Arbeit soll dem Strukturgeologen mit verschiedenen Werkzeugen eine schnelle Hilfe bei Planung, Durchführung und Auswertung der Datenerhebung während der Kartierarbeit bieten.

Da größere Unternehmen, die strukturgeologische Daten benötigen (zumeist Erdöl- und Montanindustrie, sowie Tunnelbau und andere Großbauprojekte), normalerweise geschultes Personal an hochgradig ausgereiften Anwendungen beschäftigen, richtet sich diese Arbeit hauptsächlich an Mitarbeiter und Studenten des Fachbereichs der Geologie und anverwandter Fächer. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf einer schnellen Verfügbarkeit und einfachen Interpretation der Ergebnisse. Natürlich können die Anwendungen nicht mit kommerziellen Programmen, wie zum Beispiel GoCAD, Schritt halten und besitzen einen vergleichsweise einfachen Berechnungsalgorithmus, doch sind sie im Prinzip mit jedem besseren GI-System umzusetzen. Diese liegen im universitären Bereich in der Regel vor und sind entsprechend kostenneutral zu nutzen.

Das Aufsetzen der Anwendungen auf ein herkömmliches GIS (hier ArcGIS 9 von ESRI) hat zur Folge, dass Berechnung und Darstellung auf 2,5D beschränkt sind. Faltenstrukturen lassen sich also nur so lange sinnvoll interpretieren, so lange die Falten nicht überkippt sind. Um diesem Problem auszuweichen, können die überkippten Faltenchenkel, wenn also solche erkannt, im eigenen Datensatz bearbeitet werden und nur zur Zusammenschau, zum Beispiel in ArcScene, dargestellt werden.

Auch durch Störungen inkonsistenter Bereiche sollten in getrennten Datensätzen modelliert werden. Dies kann bei geringer Datendichte zu erheblichen, räumlichen Lücken führen, da die Werkzeuge nicht nach außen extrapolieren! Weiß man um die Störungen, so kann man jedoch über sie hinweg interpolieren und erhält mit synthetisch berechneten Faltenachsen und der Verteilung der Streich- und Fallwerte im gestörten Bereich

zusätzliche Informationen im Hinblick auf deren Kinematik. Speziell dieses Kapitel wurde jedoch in dieser Arbeit nicht behandelt. In ihr geht es nur um die Modellierung der geometrischen Strukturen zusammenhängend-verfalteter Gesteinsserien.

Da bei der struktureologischen Feldarbeit, die Falten betreffend, hauptsächlich Daten für das Streichen und Fallen sedimentärer Gesteinsoberflächen gesammelt werden, begnügt sich die Auswertung auf deren Einbeziehung. Im Gelände gemessene Faltenachsen können aber ohne weiteres als eigener Layer im GI-System dargestellt werden und helfen so bei der Interpretation der gefundenen Strukturen. Ebenso ein wichtiger Bestandteil struktureologischer Feldarbeit ist die Aufnahme von Schieferungen im Gestein. Obwohl sie sehr viel über die Geometrie der Falten verraten, fließen sie nicht direkt in die Berechnungen mit ein. Sie sind im Gelände ein wichtiger Anzeiger für die verschiedenen Faltendomänen, lassen sich aber nicht immer sicher bestimmen und erreichen damit selten die Datendichte derer von Sedimentoberflächen. Sollten allerdings ausreichend Daten vorliegen, so können die Werte der Schieferungen genauso wie die Werte für die Raumorientierung der Sedimentflächen im eigenen Datensatz modelliert werden. Da in dieser Arbeit mit künstlich erstellten Datensätzen gearbeitet wird, die keine Angaben über eventuelle Schieferungen beinhalten, kann die Aussagekraft interpolierter Schieferungswerte nicht überprüft und verifiziert werden. Dem anwendenden Geologen sollten allerdings die geometrischen Zusammenhänge von Schichtung und Schieferung geläufig sein. Die vorliegende Arbeit gibt ihm die notwendigen Interpretationshilfen zur Hand.

Ebenso wenig wird die Modellierung der relativen Lage verschiedener Gesteinsserien beleuchtet. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich nur mit der Interpretation direkt gemessener Streich- und Fallwerte von sedimentären Oberflächen und direkt bis indirekt bestimmten Ausbisslinien (Schnittlinien von Gesteinsschichtgrenzen und der Geländeoberfläche). Bei sogenannten Lesesteinkartierungen, bei welchen anstehendes Gestein nicht anzutreffen ist, können die erforderlichen Daten nicht oder nur unzureichend aufgenommen werden und die hier erarbeiteten Methoden greifen nicht. In solchen Fällen ist nur eine verschwommene Aussage über die relative Lage verschiedener Gesteinschichten zu machen. Hier wird auf die Ansätze in [Yamamoto, Nishiwaki 1993] und die Arbeit von [Atsushi et al. 2004] verwiesen.

Ziel dieser Arbeit ist es, in einem ersten Schritt, die im Gelände aufgenommenen Daten für die Raumorientierung von Sedimentoberflächen anstehender Gesteine flächig zu interpolieren, um eine genauere Vorstellung von der Geometrie der vorliegenden Falten zu erhalten. Mit Hilfe der Ergebnisraster soll es dem Geologen erleichtert werden, sensible Bereiche für die fortgeführte Planung der Geländearbeit auszuweisen.

In einem zweiten Schritt sollen die Ergebnisse der ersten Anwendung in eine bestmöglich angepasste Fläche überführt werden. Diese verläuft durch einen frei wählbaren Punkt und stellt die hierzu gehörende Grenzfläche im Gestein dar (*Schichtgleiche* oder *Idealfläche*). Zur Einbeziehung weiterer Kontrollpunkte der gleichen Grenzfläche soll es die Möglichkeit geben mit den Ausbissdaten eine Korrektur zu rechnen. Da die modellierte Fläche die Geometrie der Falte entsprechend der Datengrundlage beinhaltet, stellt sie eine weitere Interpretationshilfe dar, zumal sie in geeigneten Programmen auch dreidimensional dargestellt werden kann.

Mit einer dritten Anwendung sollen die gewonnenen Schichtgleichen wieder auf die Geländeoberfläche (oder einem beliebigen, anderen Geländeschnitt) projiziert werden. Durch die Korrektur in der zweiten Anwendung soll eine genauere Darstellung der Streich- und Fallwerte der Schichtflächen erreicht werden.

Die Korrekturmöglichkeit der zweiten Anwendung kann für eine spätere Auswertung der Daten auch genutzt werden, um, ausgehend von der berechneten Schichtgleichen, andere Grenzflächen darzustellen oder um die Mächtigkeit verschiedener Gesteinspakete, bestimmt aus mehreren, berechneten Schichtgleichen, auf Kontinuität zu prüfen.



1.3 Literaturüberblick und Lösungsansatz

Die Geologie war schon immer mit dem Problem konfrontiert, dass oft vieldimensionale Räume abgebildet werden müssen. Dies führte zu ausgeklügelten Formen zweidimensionaler Spezialkarten, in welchen die Informationen in komprimierter Form dargestellt werden können. Diese sind jedoch oft sehr schwer zu lesen und meist noch schwieriger zu interpretieren.

Mit Aufkommen der leistungsfähigen Rechenmaschinen wurde die Visualisierung der komplexen Zusammenhänge in mehrschichtigen, interaktiven und sogar dreidimensionalen Karten realisiert. Mit Standard GI-Systemen können heute schwierige Aussagen leicht in gut kommunizierbare Formate gebracht werden. Dies täuscht jedoch leicht darüber hinweg, dass die topologische Bearbeitung mehrdimensionaler Zusammenhänge noch in den Kinderschuhen steckt.

In der Strukturgeologie hat der Forschungsbedarf zu einer Reihe von Arbeiten geführt. Allen gleich ist der Versuch dreidimensionale Oberflächen oder Volumenkörper abhängig von Topologie-Faktoren aus meist eher bescheidenen Datengrundlagen zu bestimmen.

Die Grundlagen mündeten entweder in mathematische Beschreibungssprachen, wie mit *GRAPE* der Universität Bonn [GRAPE] oder der Geochron-Methode [Caumon, Mallet 2006] geschehen, oder gleich in verschiedene Programmansätze. Einen Überblick über die Anforderungen eines echten 3D- GIS für den Bereich der Geologie und verschiedene Softwareapplikationen werden in einer Veröffentlichung der BIS-Steuergruppe vorgestellt [Bombien et al. 2004]. Die dort aufgezählten Programme zur Modellierung von geologischen Problemen gliedern sich in drei Fraktionen. Während Applikationen wie GSI 3D oder OpenGEO die Darstellung von Lockersedimenten in den Vordergrund rücken und dafür ohne Einbeziehung tektonischer Elemente auskommen, sind die meisten Programme auf Probleme der

Kohlenwasserstoff- und Lagerstättenindustrie zugeschnitten. Dabei gilt es vor allem die Vielfalt an geophysikalischen Daten und Bohrlochmessungen in ein Modell zusammenzuführen. Ein Programm dieser Gruppe ist Geodes [Geodes]. Für die Fragestellung dieser Arbeit liegen solcherart Daten nicht vor. Einzig die Raumorientierung von Gesteinsschichten und deren oberflächennaher Verlauf können in die Berechnungen einfließen.

In der Aufzählung der oben genannten Veröffentlichung gibt es nur ein Programm, das eigens zur strukturgeologischen Modellierung entwickelt wurde: GoCAD [GoCAD]. Es kann verschiedenste Datenformate zusammenführen und besitzt eine Reihe spezieller mathematischer Ansätze, die es sehr leistungsfähig machen. Zudem wird es ständig um weitere Werkzeuge erweitert [deKemp et al. 2004]. Doch ist die Anwendung des Programms eher komplex (Beispiel für strukturgeologische Modellierung mit GoCAD: [Györosi 2001]). Ebenfalls eine stark strukturgeologisch orientierte Applikation ist LithoTect [LithoTect].

Yamamoto und Nishiaki zeigen in ihrer Arbeit [Yamamoto, Nishiaki 1993] den generellen Verlauf einer strukturgeologischen Analyse auf. Zunächst werden die Daten der Raumorientierung prozessiert und als Rasterkarte ausgegeben. Daraus kann dann über die Berechnung der Gradienten die Geometrie der geologischen Strukturen dargestellt werden.

Für den ersten Schritt propagieren sie eine Trendanalyse der Normalenvektoren der Schichtflächen. Damit werden lokale Strukturen jedoch verwischt. Ein weiterer Nachteil ist, dass nur Daten, die auf einer ebenen Fläche liegen, fehlerlos interpoliert werden können. Selbige Idee vertreten Fisher und Wales [Fisher, Wales 1992], weisen jedoch darauf hin, dass sich polynome Funktionen mit höherer Ordnung (und damit möglicher, besserer Anpassung) unberechenbar verhalten. Sie schlagen deshalb vor, die Untersuchungsfläche zu zerteilen und sie stückweise anzunähern. Die Probleme der Generalisierung bestehen jedoch weiterhin.

Einen anderen Ansatz direkter Interpolation zeigt de Kemp [deKemp 2000] auf. Durch einfache Zerlegung der Raumorientierung in drei Winkel, deren Interpolation und anschließende Rückgewinnung der Daten für die Raumorientierung, erhält man sehr schnell durchweg gute Näherungen. Jedoch gibt es wieder keine Möglichkeit die Raumlage der Stützpunkte in die Interpolation mit einfließen zu lassen, was zu fehlerhaften Ergebnissen führt.

Mallet schlägt in seinem Buch Geomodeling [Mallet 2002] vor, die Stützpunkte zunächst in Dreiecke zu vermaschen. Jedes Dreieck ist daraufhin so zu verbiegen, dass es in den Ecken den Werten der Stützpunkte entspricht (Geomodeling, S. 318 ff.) Nach und nach würde sich so eine komplexe Oberfläche ergeben.

Eine eher herkömmliche Herangehensweise, umgesetzt in die 3D-Welt zeigt Fernández et al. [Fernández et al. 2004]. Sie rekonstruieren den Verlauf der Geometrie mit der Dip-Domain Methode (Kapitel 1.1.3 Auswerteverfahren). Da die Falten solcherart in ebene Segmente zerlegt werden, können diese relativ leicht im 3D-Raum dargestellt werden. Im Prinzip erfolgt hier die dimensionale Verlängerung zweidimensionaler Geländeschnitte.

Der Ansatz des Autors für die Interpolation der Streich- und Fallwerte, der im Feld gemessenen Schichtflächen, folgt den Vorschlägen Fernández et al., Mallet, zum Teil Fisher und Wales und Yamamoto und Nishiaki. Durch eine Dreiecksvermaschung sollen die Stützpunkte durch Kriterien der nächsten Nachbarschaft zusammengeführt werden. Die entstehenden Dreiecke werden solitär behandelt. Hierzu werden die Eckpunkte einer jeden Dreieckskante in ihrem Profilschnitt im 2D-Raum interpoliert. Dies erfolgt aus Gründen der besten Passform mit der Busk-Methode (Kapitel 1.1.3 Auswerteverfahren). Das Ergebnis entspricht weitgehend der, von Mallet vorgeschlagenen, Bildung von kurvilinearen Dreiecken nach der Unit-Tangent-Vectors Methode (Geomodeling, S. 318 ff.).

Im Gegensatz zu einer mathematischen Lösung, die das gesamte Dreieck nach Kriterien der Tangenten der Randpunkte verbiegt, können bei der kantenweise Bestimmung allerdings Störungen der Kontinuität innerhalb der Flächen entstehen. Dafür muss bei dieser Methode die Zugehörigkeit aller Stützpunkte zu einer bestimmten Grenzfläche nicht gegeben sein. Berechnet wird so auch nicht deren Flächenverlauf, sondern die tatsächlich an der Geländeoberfläche aufzufindenden Werte *verschiedener* Schichtzugehörigkeiten. Dies hat den enormen Vorteil, dass entsprechend der Geländeform korrigiert werden kann (Kapitel 2.1).

Ein weiterer Ansatz Mallets [Mallet 1992] verbindet die Stützpunkte mittels dreidimensionaler Bézier-Kurven. Dies ist ein sehr vielversprechender Ansatz, sowohl die Raumlage der Stützpunkte, als auch die Werte der durch sie getragenen Daten würden in einem Schritt interpoliert. In ArcGIS entspricht dies dem Werkzeug Spline. Komplikationen treten hier jedoch bei überkippten Falten auf, da ArcGIS nicht wirklich

dreidimensionale Daten verarbeiten kann. Zudem müssten alle Stützpunkte zuerst verschoben werden, bis sie auf derselben Grenzfläche zu liegen kommen. Ebenso fehlt eine transparente Kontrolle über die Formgebung.

Für die Bestimmung der Formfläche der untersuchten Falten folgt der Autor in seiner zweiten Anwendung deshalb den Vorstellungen von Yamamoto und Nishiaki. Da Fehler der Kontinuität innerhalb der Einzelflächen (Dreiecke der Vermaschung) der vorstehenden Interpretation sich hier fortpflanzen, erhält man sehr unruhige Oberflächen, die zu Interpretations- und vor allem Kommunikationszwecken noch geglättet werden müssen. Aus diesem Grund ist die Rückprojektion der modellierten Flächen der Faltengeometrie auf die Geländeoberfläche zwecks Verbesserung der Interpolationsergebnisse des ersten Schrittes (Anwendung III) auch nicht gewinnbringend. Die Werkzeuge, die zu dieser Funktion bereitgestellt werden, dienen aber einer Zerlegung des Faltenkörpers in subhorizontale Werteflächen, die weitere Aussagen über die Faltengeometrien, wie zum Beispiel der Schiefe der Falte, zulassen.



1.4 Aufbau der Arbeit

Im nächsten Kapitel legt der Autor seinen Lösungsansatz für die verschiedenen Probleme dar. Diese münden in einer Anzahl von Werkzeugen, die im Kapitel drei vorgestellt und beschrieben werden. Dort sind sie bereits in drei Anwendungen gebündelt, die dem Anwender verschiedene Möglichkeiten bieten. Die Werkzeuge werden im vierten Kapitel an vier Modellen getestet. Diese bestehen aus zwei verschiedenen Faltgeometrien, die jeweils mit zwei verschiedenen Geländeoberflächen kombiniert sind. Dabei werden verschiedene Interpretationsansätze besprochen und mit den Ergebnissen der Werkzeuge bewertet. Es kristallisiert sich ein einfacher und schnell zu erstellender Interpretationsverlauf heraus, der im Modell IV an ‚Realbedingungen‘ getestet wird. Alle Modelle sind synthetisch erstellt, allerdings existiert die Geländeoberfläche des Modell IV tatsächlich in der Nähe des Wohnortes des Autors (Wallberg im Tegernseer Tal, Oberbayern). Die von den Ergebnissen abgeleitete Planung der möglichen Tagestour an diesem Berg entspricht daher weitgehend einer realen Situation. Im letzten Kapitel werden dann die Ergebnisse bewertet und Verbesserungsmöglichkeiten, sowie Erweiterungen und Alternativen aufgezeigt.



Kapitel 2 Lösungsansatz

2.1 Interpolation der Geländedaten

Aus den vereinzelt im Gelände aufgenommenen Daten über Ort des Messpunktes und Raumlage der sedimentären Schichtflächen, der zugehörigen Einordnung der Gesteine in ihren stratigraphischen Rahmen und Bestimmung struktureller Parameter wie räumliche Orientierung von Störflächen und Faltenachsen und die Spur auffälliger Leit-horizonte des Gesteinsverbands in der Landschaft, der sogenannte Ausbisslinie, soll eine flächendeckende Interpolation zunächst Grundlage einer Auswertung und Interpretation der strukturellen Situation sein.

Obwohl die Dip-Isogon Methode (Erläuterungen in Kapitel 1.1.3 Auswerteverfahren) bei weitem die besten Modellierungsergebnisse liefert, soll aus Gründen der Handlichkeit die Busk-Methode zur Anwendung kommen. Sie bietet einen geometrisch einfachen und robusten Lösungsansatz. Die Dip-Isogon Methode basiert im Prinzip auf dieser. Lediglich ein, vom Schichtfallen abhängiger, Brechungswinkel und variable Schichtmächtigkeiten führen zu den optimierten Ergebnissen. Die hierzu zusätzlich benötigten Daten sind jedoch im Gelände nur an vollständig aufgeschlossenen Falten bestimmbar und daher selten nutzbar. Dem Nachteil schlechterer Interpolationsergebnisse kann man aber begegnen mit einer erhöhten Dichte an Messpunkten.

In der Busk-Methode, auch Kreisbogenmethode genannt, wird der Abschnitt einer Falte zwischen zwei benachbarten Messpunkten als zylindrisch angesehen. Die Normalen auf den beschriebenen Flächen schneiden somit die Zylinderachse. In einem 2D-Profil senkrecht zu dieser Achse verkommt diese zu einem Punkt und stellt die sogenannte Faltenachse der beteiligten Messpunkte dar. An jedem beliebigen Punkt innerhalb der Grenznormalen ist die Raumlage der sedimentären Schichten im Profil einfach als Senkrechte der Verbindung Messpunkt-Faltenachse definiert (Abbildung 2.1.b). Im Dreidimensionalen liegen all diese Punkte auf einer verwundenen Fläche, aufgespannt

durch die Grenznormalen und der Spur der synthetischen Faltenachse. Durch die Busk-Methode wird also zunächst die Lage der Schichtflächen zwischen zwei benachbarten Messpunkten bestimmt. Zur Vorbereitung der Interpolation werden alle im Feld aufgenommenen Datenpunkte vermascht, und für jede Kante des Netzes der definierte Bereich bestimmt. Hierzu reicht die Berechnung der zu den Kanten (Randpunktpaare) gehörigen synthetischen Faltenachsen. Innerhalb eines Dreiecks benachbarter Messpunkte entstehen so sechs Datensätze mit jeweils den Koordinaten für die Ecken und den Koordinaten des zugehörigen Faltenachsenpunktes. Als Ergebnis erhält man ein Netz kurvilinearier Bänder (Abbildung 2.1.e), deren Oberkante dem Netz der Dreiecksvermaschung entspricht und deren lokale Steigung die Raumlage der Schichtflächen darstellt. Die Koordinatensätze der Ober- und Unterkante dieser verwundenen Bänder können leicht mittels verschiedener Berechnungsmethoden interpoliert werden, so dass flächendeckend Geraden aufgestellt werden, die als Flächennormalen die Raumorientierung dort befindlicher Schichtflächen anzeigen (Abbildung 2.1.f).

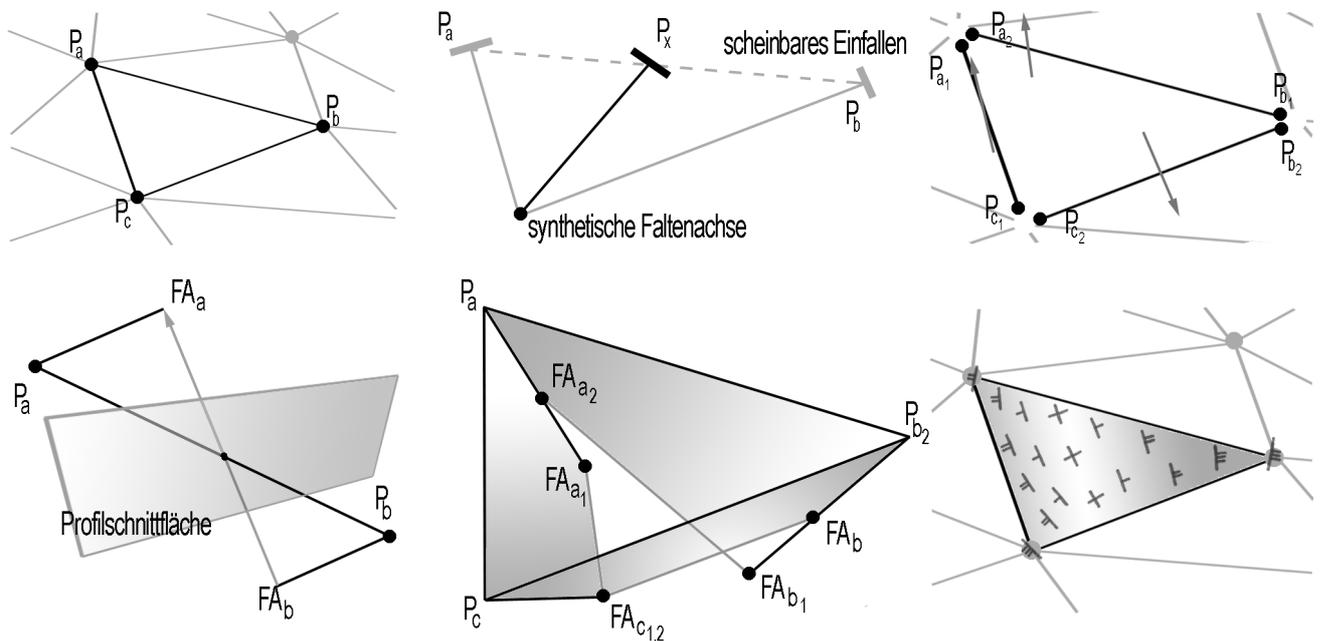


Abbildung 2.1 Interpolation flächig vorliegender Stützpunkte: **a)** Dreiecksvermaschung der Datenbasis. **b)** Die Schichtwerte der Vertices einer jeden Kante definieren im Profilschnitt eine synthetische Faltenachse. Zwischen P_a und P_b sind die Schichtwerte nach der Busk-Methode bestimmt. **c)** Jedes Dreieck erhält sechs Datentupel. Sie halten ihre Koordinaten und die der synthetischen Faltenachse. **d)** Da im Profilschnitt die Punkte in Richtung der Faltenachse projiziert sind, fehlt eine Angabe über die Tiefe des synthetisch berechneten Faltenachsenpunktes. Diese wird als der Abstand des zugehörigen Messpunktes von der Profilschnittfläche bestimmt. **e)** Die Raumlage der Schichtflächen ist nun entlang der Dreieckskanten durch ihre Normalen definiert. **f)** Durch Interpolation sowohl der Oberkante als auch der Unterkante dieser begrenzenden kurvilinearen Bänder ergibt sich die flächige Bestimmung der Raumlage der verfalteten Gesteinspakete.

Die bestimmten Wertepaare liegen allerdings nicht auf der tatsächlichen Geländeoberfläche, da zwischen den Messpunkten eben interpoliert wird. Die Ergebnisraster für die Raumorientierung der Schichtflächen stellen also eine Situation jeweils über oder unter der realen Geländekante dar. Bei hinreichend geringem Abstand zwischen den Messwerten, flachem Untersuchungsbereich oder bei sehr geringer Krümmung der Falten sind die Abweichungen klein. Im Bereich von Faltenkernen (Nähe der Zylinderachse) und in stark gebirgigem Umfeld mit tiefen Schluchten und steilen Kämmen ist eine Korrektur allerdings unerlässlich.

Störflächen stellen Diskontinuitäten im Gestein dar. An ihnen wird der Gesteinsverband versetzt und seine Geometrie gestört. Oftmals ist die Richtung des Versatzes direkt im Gelände bestimmbar, durch fehlende Information über Sprungweite und exakter geometrischer Form der Störfläche geht jedoch die Topologie der Daten über die Störung hinweg verloren. Zur Aufbereitung der Messwerte ist der Datensatz also an Störungen zu teilen. Jede Subgruppe muss für sich selbst interpoliert werden. Ist das Alter der Störung höher als das des Faltenereignisses, so kann die Faltengeometrie beiderseits durchaus zusammenpassen. In diesem Fall kann über die Störung hinweg interpoliert werden. Die Bestimmung des relativen Alters im Gelände ist jedoch oft schwierig und uneindeutig. Bei der Interpretation der Ergebnisdaten ist dies zu berücksichtigen.



2.2 Modellierung der Geometrie – Tiefenextrapolation

Von den sechs Parametern, die an jedem Messpunkt im Gelände aufgenommen wurden, sind bereits fünf modelliert. Das sind die Raumkoordinaten des Datenpunktes, das Schichtfallen und die Fallrichtung (oder Schichtstreichen). Das Ergebnis ist eine flächendeckende Karte mit Werten für Streichen und Fallen der Gesteine an der Geländeoberfläche. Diese kann zur weiteren Planung der Probennahme herangezogen werden, um eine optimale Datenbasis zu erhalten.

Mit den Ergebnistrastern kann nun auch die Geometrie der Falten modelliert werden und eine Tiefen- und Höhenextrapolation erfolgen. Eine raumgreifende Darstellung der Gesteinsstrukturen soll das Endergebnis sein, anhand derer die vorläufige Interpretation der Strukturen, aber auch der Qualität der Datenbasis überprüft werden kann. Ebenso können zur Kommunikation schnell beliebige Geländeschnitte angefertigt werden.

Die Interpolationsergebnisse aus [2.1 Interpolation der Geländedaten] sind aus finiten Elementen aufgebaut, das heißt sie haben eine begrenzte Anzahl an Elementen, die nicht unendlich dicht gepackt sind. Jedes dieser Elemente mit einer gewissen Ausdehnung trägt neben seinen Raumkoordinaten Werte für Streichen und Fallen. Für die weitere Berechnung werden sie wieder wie Punkte im Raum behandelt.

Informationen über die Zusammengehörigkeit verschiedener Gesteinsbereiche spielen bei der Modellierung die Schlüsselrolle. Hierzu wurden die vermessenen Gesteinsschichten im Gelände, soweit möglich, stratigraphisch eingeordnet und die Spur des Ausbisses von Leithorizonten aufgenommen.

Der Abstand benachbarter Punkte von der gemeinsamen Faltenachse wird in der Regel nicht gleich groß sein, sie gehören also nicht derselben Gesteinsschicht an. Aus raumgreifend berechneten Differenzbeträgen dieses Abstandes kann nun die geometrische Form der Schichtflächen bestimmt werden. Hierzu werden, ausgehend von einem im

Gelände möglichst häufig anzutreffenden und mittig liegenden Messpunkt eines Leithorizonts, die berechneten Differenzen aufsummiert und die Raumkoordinaten der finiten Elemente angepasst. Solchermaßen entsteht eine Fläche, die diese gefaltete Grenzschicht möglichst trefflich darstellen sollte. Mit weiteren Stützpunkten desselben Leithorizonts lassen sich weitere Korrekturen berechnen und die Fläche anpassen. Das so entstandene Modell der Spur eines Leithorizonts im Raum hat durch die Korrektur mit anderen Stützpunkten derselben Grenzfläche eine höhere Genauigkeit erreicht und kann nun ebenfalls zur Interpretation der untersuchten Geometrie herangezogen werden.

Verschneidet man eine beliebige Fläche, zum Beispiel die Geländeoberfläche, mit den Normalen der finiten Elemente der modellierten Fläche, so erhält man wiederum eine Karte mit Werten für Streichen und Fallen. Diese gelten für die Gesteine der Projektionsfläche. Auf diese Art und Weise kann man verschiedene Geländeschnitte anfertigen, die zum Beispiel Aufschluss geben über das Verhalten der Faltenachsebene, der Schiefe der Falte.

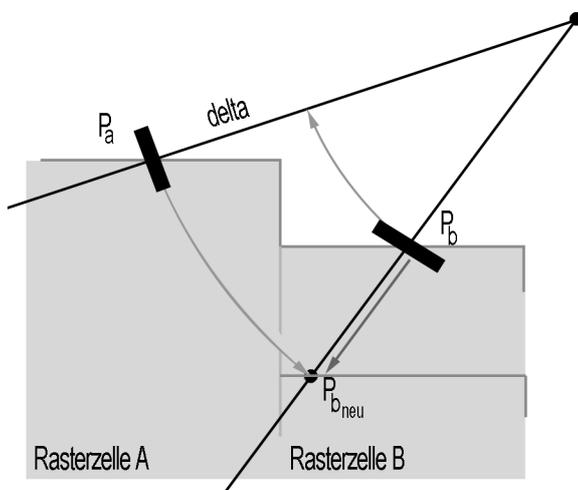


Abbildung 2.2 Bestimmung eines Differenzrasters zur Modellierung der Schichtgleichen: Die Ergebnisraster der Interpolation tragen die Geländehöhe und die Werte für die Raumlage der Schichtflächen (kurze, dicke Balken). Gehörten sie derselben Grenzfläche an, so sollten sie gleichweit von der synthetischen Faltenachse entfernt sein. Ausgehend vom Punkt P_a muss der Punkt P_b um die Differenz δ verschoben werden, um derselben Schichtfläche anzugehören. Dieser Wert wird in einem separaten Raster der Rasterzelle B zugeordnet.

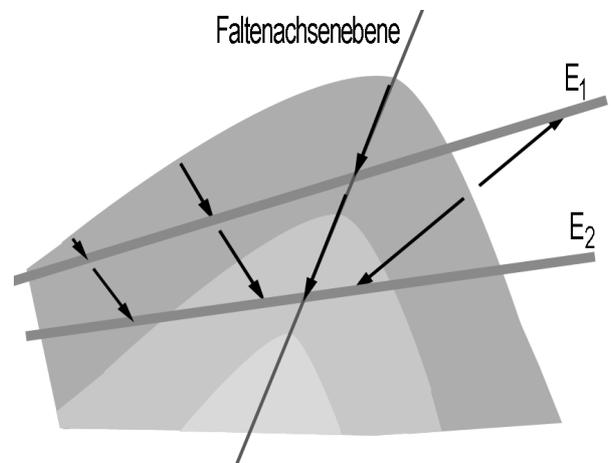


Abbildung 2.3 Projektion der modellierten Schichtgleichen auf eine beliebige Oberfläche: Die Projektion der Werte für die Raumlage der Schichtflächen entspricht einer Verschiebung der modellierten Oberfläche entlang ihrer Flächen-Normalen. Auf der gewählten Projektionsfläche (E_1 , E_2) entsteht so Abbild der geometrischen Strukturen der Falte. Der Bereich der stärksten Krümmung (Faltenachsebene) etwa wird von E_1 nach E_2 nach links verschoben, die Falte besitzt eine Vergenz nach rechts, sie ist schief.



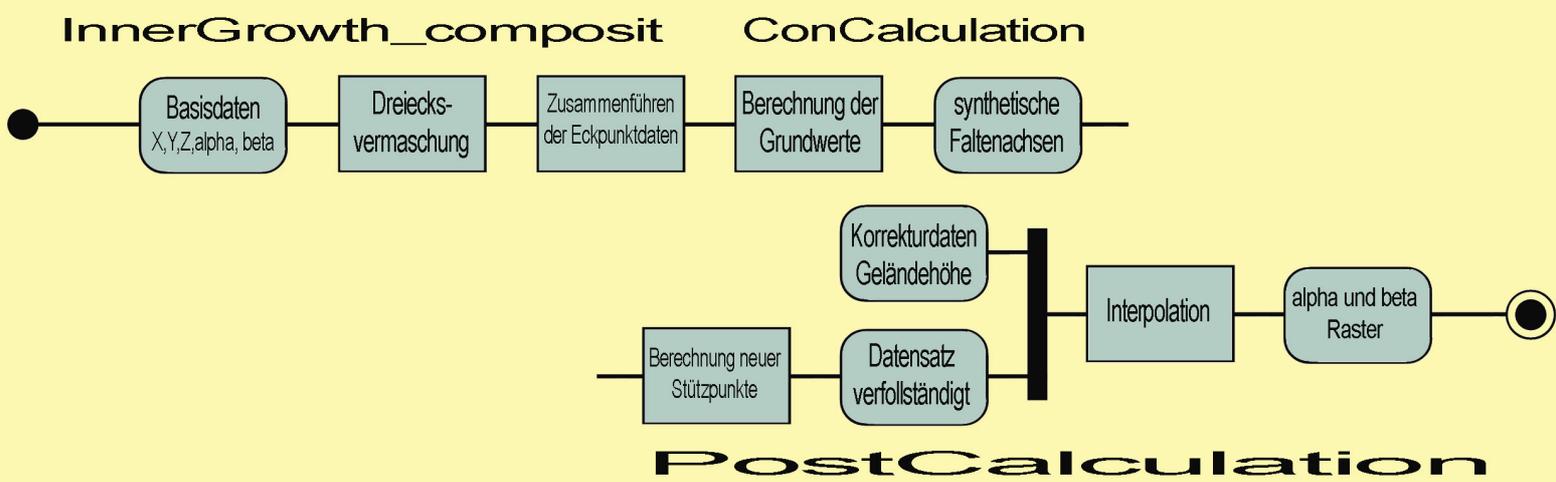
Kapitel 3 Durchführung

Die Durchführung der Arbeit wurde in einer 2,5D-GIS Umgebung verwirklicht. Bewusst wurde nicht mit einem Programm gearbeitet, das speziell für strukturgeologische Fragestellungen konzipiert wurde, wie etwa Earth Vision, LithoTect, GoCAD, Petrel, oder anderen CAD-Programmen. Während gängige GI-Systeme mittlerweile weit verbreitet sind, müssen solche Spezialprogramme meist erst teuer zugekauft werden, bedürfen zusätzlicher Einarbeitungszeit, sind ob ihrer Komplexität oft nicht einfach zu bedienen und besitzen meist Einschränkungen in GIS-Funktionalitäten, wie Kartenerstellung oder Mischprojektionen.

Als Standard GIS Software kommt in dieser Arbeit ArcGIS 9 von ESRI zur Anwendung. Die fehlende Fähigkeit Daten in 3D zu verarbeiten stellt zwar eine Einschränkung dar und verkompliziert viele Berechnungen, doch findet sich ein akzeptabler Lösungsweg, der schnell und unkompliziert Ergebnisse liefert.

Überkippte Falten können in 2,5D als Ganzheit nicht bearbeitet werden. Hierfür ist der Datensatz zu trennen und die Teile extra zu modellieren. In der Auswertung können die modellierten Teile dann wieder zusammengeführt werden. Es ist allerdings mit Qualitätseinbußen im Bereich der Schnittstellen zu rechnen. Dasselbe gilt für den Bereich um Störungen, die ebenfalls eine Teilung des Datenmaterials verlangen. Bei sehr stark gestörter Geologie und in Bereichen sehr komplexer, überprägter Faltung ist es jedoch unerlässlich ein Spezialprogramm zu benutzen.

Benötigt werden die Erweiterungen Spatial_Analyst und 3D_Analyst. Die Berechnungsabläufe wurden als Werkzeug mit dem in ArcGIS integriertem Model Builder erstellt. Dieses graphische Interface ermöglicht ein schnelles und übersichtliches Programmieren von Abläufen. Auch die Fehlersuche und Änderungen sind leicht handhabbar. Zu jedem Werkzeug befindet sich im Anhang ein Ablaufdiagramm.



3.1 Interpolation der Raumlage

In diesem ersten Abschnitt werden die rohen Geländedaten – die Raumkoordinaten der Messpunkte x , y , z und die dort gemessene Raumlage der Schichtung des Gesteins α (Fallrichtung) und β (Schichtfallen) – zu einer raumgreifenden Karte der Lage der oberflächlich anstehenden Gesteine interpoliert.

Mit dem Werkzeug *InnerGrowth_composit* werden die Messpunkte zunächst vermascht und die Datentupel der, an jeder Kante beteiligten, Vertices zusammengeführt. So entsteht ein Datensatz nachbarlicher Paarungen von Messpunkten, der als Grundlage der weiteren Berechnungen dient (Ablauf-Diagramm aller Werkzeuge im Anhang). Im Programmablauf wird hierzu der Rohdatensatz mit x und y als Event Layer dargestellt. Dann wird ein leeres TIN kreiert und mit den Punkten des Event Layer gefüllt. Mit dem Werkzeug *TIN_Edge* werden alle Kanten des TIN extrahiert und diese schließlich mit dem Event Layer verschnitten, so dass die Daten beider Eckpunkte einer jeden Kante zusammengeführt werden können.

Die Vermaschung der Messpunkte läuft automatisch mittels der Delauney Triangulation, die durch Maximierung des kleinsten Innenwinkels möglichst gleichseitige Dreiecke schafft. Für die Strukturgeologie wäre es allerdings besser, wenn die Kanten möglichst parallel der Richtung der synthetisch berechneten Faltenachsen verliefen, da in dieser Richtung die größte Korrelationslänge der Messwerte zu erwarten ist. Für eine höhere Genauigkeit der Interpolation ist eine Nacharbeitung des entstehenden TINs von Hand zu empfehlen. Hierzu ist anstatt des Werkzeugs *InnerGrowth_composit* zunächst das Werkzeug *InnerGrowth* zu benutzen. Dies berechnet das TIN und extrahiert deren Kanten. Die Daten der Eckpunkte der ungünstig liegenden Kanten können in der Tabelle geändert werden, so dass die neuen Eckpunkte eine bessere Kante ergeben. Abschließend

wird mit dem Werkzeug *InnerGrowth_II* die Anwendung komplettiert. Die ausgegebenen Daten entsprechen dem des Werkzeugs *InnerGrowth_composit*.

Eine Automation dieses Prozesses, etwa durch Stauchung des Koordinatenraumes in Richtung des Streichens der Faltenachsen und damit Verkürzung der Strecken, die verbunden werden sollen (zwingt die Delauney Triangulation vorwiegend diese Strecken zu verknüpfen), ist nur in Gegenden einfacher Faltung und somit vorherrschender Richtung der Faltenachsen möglich.

Noch sind im Datensatz pro Dreieckskante zwei Einträge vorhanden, jeweils mit einem der beiden Eckpunkte. Deshalb wird in einem nächsten Schritt der Datensatz verdoppelt und mit dem Werkzeug *PreCalculation* (inkludiert in *InnerGrowth_composit*) mittels eines Joins über die ID der TIN-Kanten und nachfolgender Selektion über eine SQL-Abfrage (ID der Punkte des Datensatzes 1 \leftrightarrow ID der Punkte des Datensatzes 2) bearbeitet. Durch den Join werden alle Paarungen mit identischen Kanten gebildet und durch die SQL-Abfrage die Auswahl auf nicht identische Punkte reduziert. In der Folge erhält man einen Datensatz, der jede Dreieckskante samt zugehörigen Eckpunkten enthält.

Nun können mit dem Werkzeug *ConCalculation* die grundlegenden Werte für eine Berechnung von zusätzlichen Datenpunkten nach der Busk-Methode bestimmt werden. Aus der Raumlage der, pro Dreieckskante beteiligten, Schichtflächen wird zunächst die Raumlage der zugehörigen Faltenachse bestimmt. Diese berechnet sich als Normale zu der Fläche, welche von den Normalen der beteiligten Schichtflächen aufgespannt wird.

Raumlage der beteiligten Punkte P_1, P_2 : $x_1, y_1, z_1, \alpha_1, \beta_1$ $x_2, y_2, z_2, \alpha_2, \beta_2$

Koordinaten des Normalenvektors zur Schichtfläche1, 2:

$$x_1 = \sin(\alpha_1) * \sin(\beta_1)$$

$$x_2 = \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_2)$$

$$y_1 = \cos(\alpha_1) * \sin(\beta_1)$$

$$y_2 = \cos(\alpha_2) * \sin(\beta_2)$$

$$z_1 = -\cos(\beta_1)$$

$$z_2 = -\cos(\beta_2)$$

Koordinaten der Normalen zu beiden Vektoren:

α, β der Faltenachse :

$$c_1 = y_1 * z_2 - z_1 * y_2$$

$$\alpha_{FA} = \text{atan}(c_1 / c_2)$$

$$c_2 = z_1 * x_2 - x_1 * z_2$$

$$d = c_1 / \sin(\alpha_{FA})$$

$$c_3 = x_1 * y_2 - y_1 * x_2$$

$$\beta_{FA} = \text{atan}(c_3 / d)$$

Bei einer Koordinatensystemtransformation mit P1 (x_1, y_1, z_1) als neuen Ursprung und Drehung der Z-Achse um α_{FA} und der X-Achse um β_{FA} , jeweils gegen den Uhrzeigersinn, entspricht die neue X-Z-Ebene einem Profilschnitt.

Koordinaten der beteiligten Punkte P₁, P₂: $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$
 Raumlage der Faltenachse FA: α_{FA}, β_{FA}

Koordinaten des Punktes P₂ nach der Transformation:

$$\begin{aligned} x &= x_2 - x_1 & \mathbf{x}_{P2} &= \cos(\alpha_{FA}) * x - \sin(\alpha_{FA}) * y \\ y &= y_2 - y_1 & t &= \sin(\alpha_{FA}) * x + \cos(\alpha_{FA}) * y \\ z &= z_2 - z_1 & \mathbf{y}_{P2} &= \cos(\beta_{FA}) * t - \sin(\beta_{FA}) * z \\ & & \mathbf{z}_{P2} &= \sin(\beta_{FA}) * t + \cos(\beta_{FA}) * z \end{aligned}$$

In diesem Profilschnitt sind beide Messpunkte abgebildet, einer als Koordinatenursprung, der zweite mit $y = 0$ als Projektion. Für die weiteren Berechnungen muss das scheinbare Einfallen der Raumlage beider Schichtflächen, die Steigung der Schnittlinie der Schichtflächen mit dem Profilschnitt, bestimmt werden.

Raumlage der beteiligten Punkte P₁, P₂: $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$
 Raumlage der Faltenachse FA: α_{FA}, β_{FA}

Scheinbares Einfallen der Schichtflächen für die Punkte P₁, P₂ im Profil:

$$\begin{aligned} \alpha_{1\text{neu}} &= \alpha_1 - \alpha_{FA} & \alpha_{2\text{neu}} &= \alpha_2 - \alpha_{FA} \\ x_1 &= \sin(\alpha_{1\text{neu}}) * \sin(\beta_1) & x_2 &= \sin(\alpha_{2\text{neu}}) * \sin(\beta_2) \\ y_1 &= \cos(\alpha_{1\text{neu}}) * \sin(\beta_1) & y_2 &= \cos(\alpha_{2\text{neu}}) * \sin(\beta_2) \\ z_1 &= -\cos(\beta_1) & z_2 &= -\cos(\beta_2) \\ z_1 &= z_1 * \cos(\beta_{FA}) - y_1 * \sin(\beta_{FA}) & z_2 &= z_2 * \cos(\beta_{FA}) - y_2 * \sin(\beta_{FA}) \\ \beta_{1\text{SE}} &= \text{atan}(z/x_1) & \leftarrow \text{pi-Pol (Normale)} \rightarrow & \beta_{2\text{SE}} = \text{atan}(z/x_2) \end{aligned}$$

Der Schnittpunkt beider Normalen ergibt den Ort der Faltenachse im Profil. Dieser Faltenachsenpunkt gilt für die gesamte Fläche innerhalb der umrandenden Grenznormalen. Die Faltenachse ist die Normale zu der Profilschnittfläche.

Koordinaten des Punkt P1 im Profil: x_2, z_2

Scheinbares Einfallen der Schichtflächen an P₁, P₂: $\beta_{1\text{ SE}}, \beta_{2\text{ SE}}$

Geradengleichung für P₁:

$$f(P_1): z = x * (-\tan \beta_{1\text{ SE}})$$

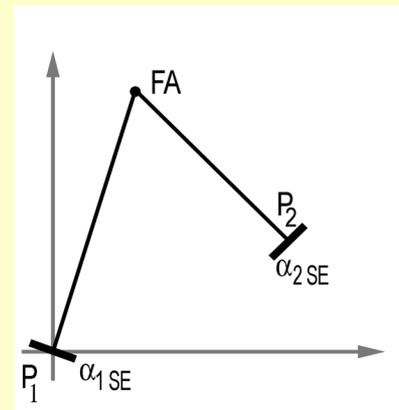
Geradengleichung für P₂:

$$f(P_2): z = (x - x_2) * (-\tan(\beta_{2\text{ SE}})) + z_2$$

$$x_{\text{FA}} = (x_2 * \tan(\beta_{2\text{ SE}}) + z_2) / (\tan(\beta_{2\text{ SE}}) - \tan(\beta_{1\text{ SE}}))$$

$$y_{\text{FA}} = y_2 / 2 \quad (\text{für den Mittelpunkt zwischen } P_1 \text{ und } P_2)$$

$$z_{\text{FA}} = x_{\text{FA}} * (-\tan(\beta_{1\text{ SE}}))$$



Zuletzt wird das Koordinatensystem wieder in das Ursprüngliche übergeführt.

Als Ergebnis erhält man zu jedem Kantenmittelpunkt der Dreiecksvermaschung den zugehörigen Faltenachsenpunkt.

Raumlage der Faltenachse FA im Profil: $x_{\text{FA}}, y_{\text{FA}}, z_{\text{FA}}, \alpha_{\text{FA}}, \beta_{\text{FA}}$

Koordinaten der beteiligten Punkte P₁, P₂: $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$

$$y_{1\text{FA}} = \cos(\beta_{\text{FA}}) * y_{\text{FA}} + \sin(\beta_{\text{FA}}) * z_{\text{FA}}$$

$$z_{\text{FA}} = \cos(\beta_{\text{FA}}) * z_{\text{FA}} - \sin(\beta_{\text{FA}}) * y_{\text{FA}} + (z_2 - z_1)$$

$$y_{\text{FA}} = \cos(\alpha_{\text{FA}}) * y_{1\text{FA}} - \sin(\alpha_{\text{FA}}) * x_{\text{FA}} + (y_2 - y_1)$$

$$x_{\text{FA}} = \cos(\alpha_{\text{FA}}) * x_{\text{FA}} + \sin(\alpha_{\text{FA}}) * y_{1\text{FA}} + (x_2 - x_1)$$

Weitere Stützpunkte, deren Faltenachsenpunkt berechnet werden soll, sind die beiden Randpunkte der Dreieckskanten. Entsprechend wird y_{FA} in der Busk-Berechnung auf y_2 (Punkt 2) oder 0 (Punkt 1) gesetzt und die Koordinatensystemrückführung erneut durchgeführt.

Da die folgende Interpolation der Daten im Raster mit finiten Elementen geschieht und eine Rasterzelle nur einen Wert halten kann, die Eckpunkte aber zu mehreren Kanten gehören, ergäbe sich bei der Überführung der Stützpunkte in ein Raster für die Koordinaten des Faltenachsenpunktes ein Mischwert. Soll dies nicht geschehen, so muss gewährleistet sein, dass jeder Eckpunkt aneinandergrenzender Kanten auf eine andere Rasterzelle fällt. Diesbezüglich wird in einer weiteren Berechnung der Abstand bestimmt, den der Eckpunkt auf der Kante nach innen rutschen muss. Hier spielt erstmals

die Auflösung der Raster eine Rolle. Diese wird in die Attributspalte *intersect2* der Eingangstabelle eingesetzt. Da die Attributspalte nur Integerzahlen akzeptiert, muss die Zellgröße mit zehn multipliziert werden. Im Werkzeug *ConCalculation* fließt diese Zahl in die Berechnungen mit ein.

Abstand $P_1 - P_2$:

$$\Delta = \text{sqr} ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2)$$

Mindestlänge des Abstands Δ , um Teilung zu rechtfertigen:

$$L_{\min} = (\Delta * \text{Zellgröße} * \text{sqr} (2) * 2) / y_1$$

Selektion: für alle Datensätze mit $L_{\min} > 4$ gilt:

$$y_{FA} = y_2 / L_{\min} \quad \leftarrow \text{ Faltenachsenpunkt zum verschobenen Messpunkt1}$$

$$y_{FA} = y_2 * (L_{\min} - 1) / L_{\min} \quad \leftarrow \text{ Faltenachsenpunkt für Messpunkt2}$$

Die Datenwerte für alle drei neuen Stützpunkte liegen nun in einer Zeile der Attribut-Tabelle. Deswegen wird der Datensatz verdreifacht, zweimal in der Selektion für die Randdaten und einmal komplett. Die relevanten Daten werden in einheitliche Attributspalten kopiert und diese letztendlich zusammengeführt. Als Ergebnis liegen nun zu jeder Kante der Vermaschung der ursprünglichen Geländedaten drei neu berechnete Stützpunkte vor. Aus diesen kann nun eine raumgreifende Interpolation der Raumlage der Gesteinschichten erfolgen.

Der Abschluss der ersten Anwendung erfolgt mit dem Werkzeug *PostCalculation*. Zunächst werden aus den Werten der neuen Stützpunkte diejenigen Parameter berechnet, die interpoliert werden sollen. Das sind die Abstände zwischen den Stützpunkten und den zugehörigen Faltenachsenpunkten Δx , Δy , Δz (Koordinaten der Faltenachsenpunkte minus Koordinaten der Stützpunkte).

Der Parameter Δz hat eine besondere Funktion, da dessen Vorzeichen angibt, ob der Faltenachsenpunkt über oder unter dem Stützpunkt liegt, ob die Falte also synklinal oder antyklinal geformt ist. Dieses Vorzeichen wechselt durch Krümmungsumkehr an der Inflexionslinie. Da die Krümmung der Falte in der Regel zur dieser hin abnimmt, die Normalen zu den Schichtflächen fast parallel werden, ist dort der berechnete Abstand vom Stützpunkt zum zugehörigen Faltenachsenpunkt am größten. Eine einfache Interpolation führte wegen des Vorzeichenwechsels an der Inflexionslinie jedoch zu

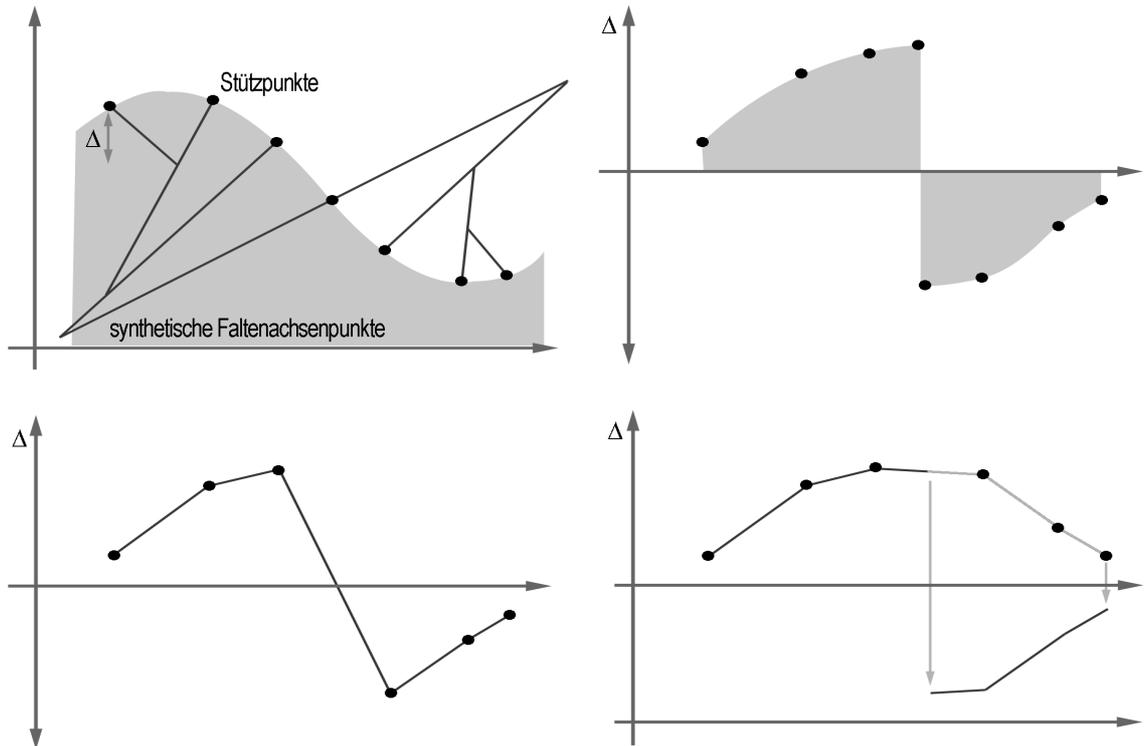


Abbildung 3.1 Interpolation der Höhendifferenz Δ : **a)** Falte mit Stützpunkten, zugehörig bestimmten Faltenachsenpunkten und resultierenden Abständen Δ . **b)** Diagramm des tatsächlichen Verlaufs von Δ . **c)** Verlauf von Δ bei Interpolation der Rohdaten. **d)** Angepasster Interpolationsverlauf bei vorheriger Multiplikation mit dem Vorzeichen.

einem Nulldurchgang für diesen Abstand. Bestimmt wird also nur der Betrag von Δz , die Werte für Δx und Δy werden entsprechend mit dem Vorzeichen von Δz multipliziert. Interpoliert wird mit der Methode `Natural_Neighbour` aus dem Modul `3D_Analyst`. Dies mag nicht für alle Datensätze die optimale Lösung sein, doch funktioniert sie schnell und robust und wird auch vom Tool `TIN_to_Raster` angeboten, das erlaubt Breaklines mit einzubinden. Zur Einbeziehung von Störfächen in die Berechnung und folgend dem Vergleich mit regulär erstellten Interpolationen kann dies hilfreich sein. Aus den erstellten Datensätzen können die Werte für die Fallrichtung und das Schichtfallen leicht trigonometrisch berechnet werden.

Koordinaten der beteiligten Punkte P_1, FA_1 : $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$

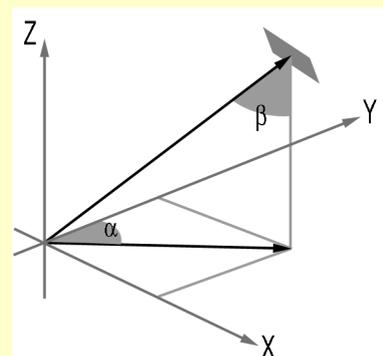
$$\Delta x = x_2 - x_1$$

$$\alpha = \text{atan}(\Delta x / \Delta y)$$

$$\Delta y = y_2 - y_1$$

$$\beta = \text{atan}(\text{sqr}(\Delta x^2 + \Delta y^2) / \Delta z)$$

$$\Delta z = z_2 - z_1$$



Die erhaltenen Werte liegen auf der Modelloberfläche, die sich aus den beteiligten Stützpunkten ergibt. Da die tatsächliche Geländehöhe davon aber abweichen kann und dadurch die Wertebereiche verschoben dargestellt werden, ist zur genaueren Darstellung eine Korrektur ratsam. Dies gilt vor allem für Flächen geringer Datendichte oder auffälligem Geländebau, wie Steilwänden, steilen Kuppen und tiefe Schluchten oder Senken. Insbesondere ist diese Höhenkorrektur an Orten aufgenommener Ausbisslinien notwendig, die bislang nicht zu den Stützpunkten zählen, später aber für weitere Berechnungen notwendig werden.

Hierzu ist die Differenz von Geländehöhe zur Modellhöhe dem Wert Δz zuzuschlagen. Im Werkzeug *PostCalculation* berechnet sich Δz als Differenz der Höhe des Faltenachsenpunktes und der Höhe des Stützpunktes. Eine antiklinale Struktur, eine sattelförmige Falte, besitzt also ein negatives Δz . Liegt die reale Geländekante über der Modellhöhe, so muss die Differenz aus Modellhöhe und Geländehöhe addiert werden, Δz wird negativer. Da im weiteren Verlauf des Werkzeugs jedoch nur mehr mit dem Betrag von Δz gerechnet wird, muss der Korrekturwert abhängig von der vorherrschenden Faltenform Δz zugeschlagen oder abgezogen werden.

Anhand der Ergebnisraster des Werkzeugs *PostCalculation* sind also zunächst die Faltenomänen zu bestimmen. Diese erhält man, wenn von der Steigung im β -Raster (aspect β) der Wert für die Fallrichtung α abgezogen wird. Im Falle einer Synklinale zeigen beide Werte in dieselbe Richtung (zum Zentrum hin), der Zwischenwinkel liegt um Null, während im Falle einer Antiklinalen die Werte für das Schichtfallen vom Zentrum wegzeigen, die Winkeldifferenz um 180° liegt. Durch Reklassifikation des Rasters für die Zwischenwinkel erhält man eine Vorzeichenmaske, die synklinale Strukturen positiv ausweist und umgekehrt (Abbildung 3.2). Den gewünschten Korrekturwert erhält man durch Multiplikation mit der Vorzeichenmaske.

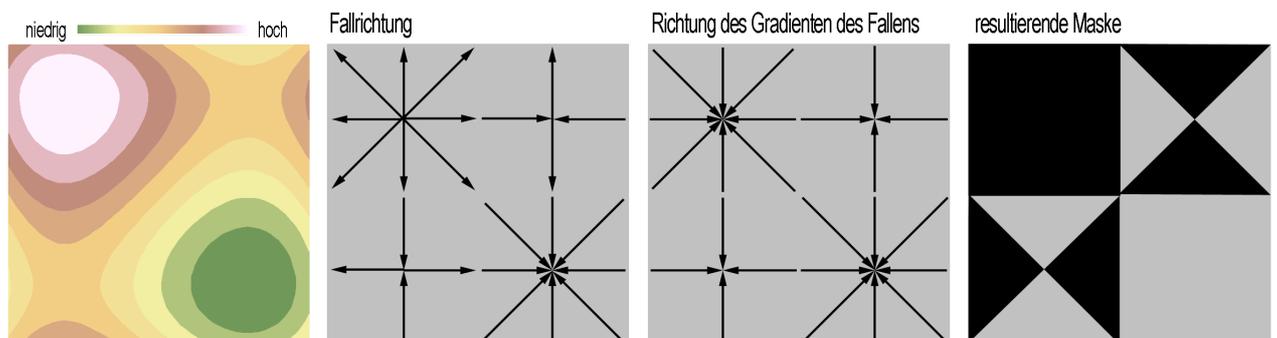


Abbildung 3.2 Bestimmung der Faltenomäne: **a)** Darstellung einer gefalteten Fläche als höhenkodierte Karte. **b)** Darstellung der Fallrichtung α . **c)** Darstellung der Richtung des Gradienten des Fallens (aspect β). **d)** Reklassifikation der Differenz beider Werte: schwarz = Sattel (Antiklinale), weiß = Mulde (Synklinale)

Durch die Addition des Korrekturwertes kann das Vorzeichen von Δz erneut wechseln, der berechnete Wert für das Schichtfallen kann negativ werden. Ist dies der Fall, ist der berechnete Wert ungültig. Da die Höhenkorrektur immer nur vertikal erfolgt, kann der Neuberechnete Punkt den Gültigkeitsbereich zwischen den Randnormalen verlassen oder bei schiefer Profilebene diese. Die hierbei auftretenden Fehler fallen in der Regel eher gering aus. Ein dritter Fehler ergibt sich bei der Interpolation innerhalb der Dreiecksvermaschung. Auch hier kann der Neuberechnete Punkt den gedachten Gültigkeitsbereich verlassen. Eine Korrektur ist mit den einfachen Mitteln eines 2,5-D GIS sehr aufwändig und soll daher vernachlässigt werden. Alle drei Fehler führen lokal zu unruhigen Interpolationsergebnissen. Das Ergebnis weicht damit vom ursprünglich angenommenen Ideal einer zylindrischen Fläche ab. Wie die Faltengeometrie zwischen den Stützpunkten jedoch in der Realität aussieht, ist sowieso nur durch hohe Datendichte in Erfahrung zu bringen.

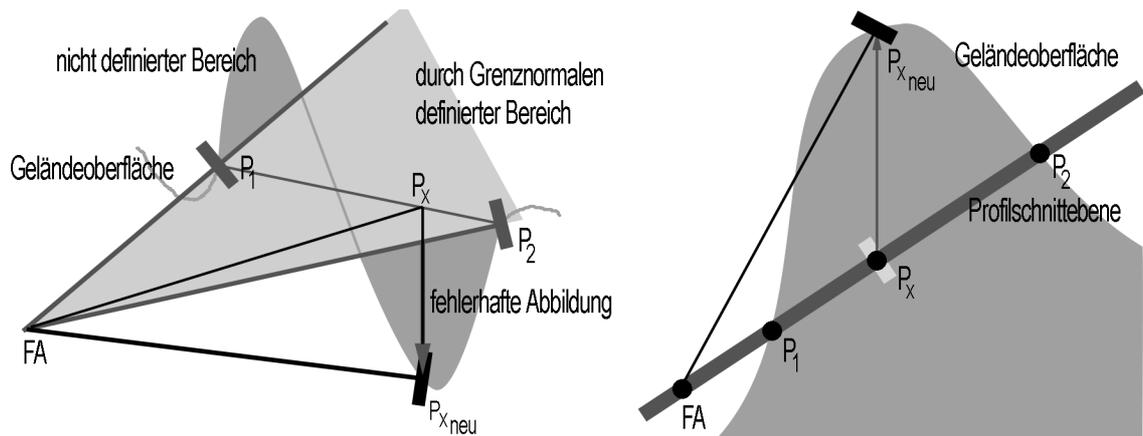
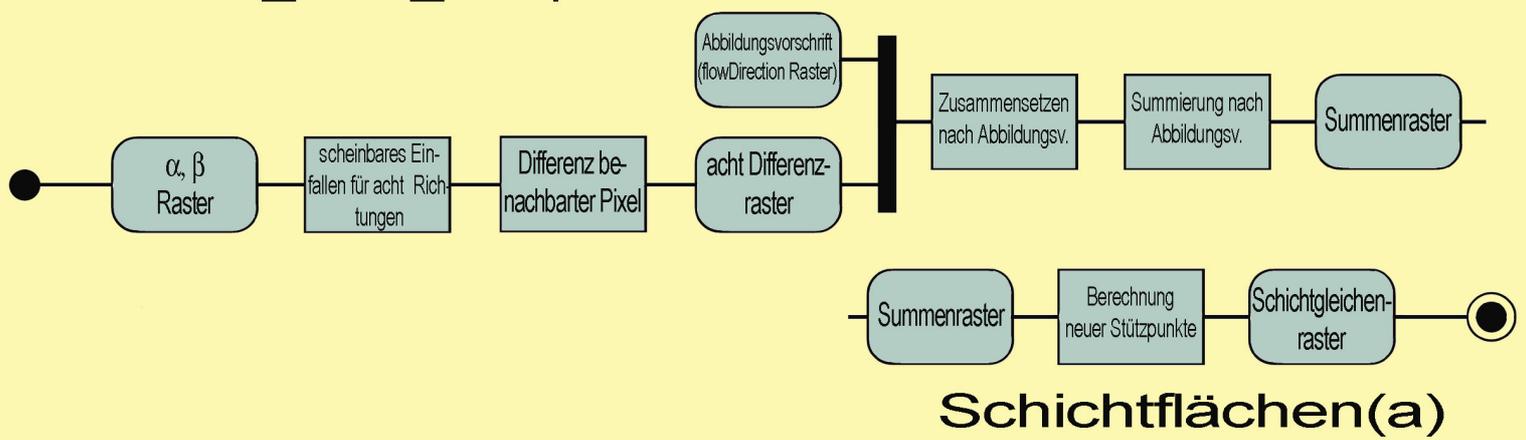


Abbildung 3.3 Fehlerhafte Geländehöhenkorrektur: **a)** Fehler in der Profilschnittebene: Der Punkt P_x wird durch Angleichung an das Gelände außerhalb des durch die Grenznormalen definierten Bereichs verschoben. Im Normalfall aufrechter oder mäßig geneigter Falten fällt der Wert für P_{xneu} immer etwas zu groß aus! **b)** Fehler außerhalb der Profilschnittebene: Durch schiefe Faltenachsen liegt die Profilschnittebene nicht vertikal und eine Geländehöhenkorrektur führt zur fehlerhaften Abbildung des Punktes P_x .

Die Ergebnisraster für die Fallrichtung α und dem Schichtfallen β können nun mit topographischem Kartenmaterial projiziert und ob Besonderheiten und Fehler gesichtet werden. Eine erste Interpretation der Messergebnisse und auffälliger Strukturen erleichtert die weiterführende Planung der Feldarbeit und sichert eine variable und zeitsparende Datennahme, und damit optimierte Ergebnisse.



Schichtflächen(a)

3.2 Idealfäche

In einer weiteren Anwendung wird aus den interpolierten Rastern für die Fallrichtung und das Schichtfallen unter Berücksichtigung der Höhenkorrektur eine Fläche berechnet, die eine ideale Abbildung der Geometrie eines bestimmten Markerhorizontes im gefalteten Gestein darstellen soll. Es wird also eine Tiefenextrapolation durchgeführt. Als Ergebnis liegt entsprechender Markerhorizont in flächendeckenden Stützpunktdaten vor. Erreicht wird dies durch flächige Summation von Korrekturwerten finiter Elemente. Interpolation der z-Werte dieser Menge generiert eine Oberfläche dieser Schicht.

Mit dem Werkzeug *SE/delta_dAM_composit* wird zunächst für vier vertikale Geländeschnitte mit den Normalenrichtungen 0° , 45° , 270° und 315° (ein Profilschnitt mit der Normalenrichtung 270° verläuft von Süd nach Nord) das scheinbare Einfallen (SE) aller Rasterzellen bestimmt, also die Neigung der Spur der Schichtflächen in der Profilschnittebene. Dies geschieht jeweils durch den internen Aufruf des Werkzeugs *SE_0°/45°/90°/135°*. Die Bestimmung erfolgt über trigonometrische Berechnungen.

Raumlage der Schichtfläche an Punkt P_1 : α_1, β_1

Schnittlage der Profilschnittebene: α_{Profil}

$$\mathbf{SE} = \text{atan}(\tan(\beta_1) * \cos(\alpha_1 - \alpha_{\text{Profil}}))$$

Mit Hilfe der errechneten Werte kann in den Profilebenen nun eine Tiefenextrapolation erfolgen. Die Spur der repräsentierten Schicht einer jeden Zelle wird abhängig von den Fallwerten der jeweils nächsten Nachbarn im Geländeschnitt in die Tiefe (bzw. in die Höhe) verfolgt. Die benachbarten Zellen erhalten so einen Korrekturwert, der diese in die darzustellende Gesteinsschicht überführt. Die Korrektur erfolgt entlang der Flächen-

normalen. Entsprechen sich die Gesteinsflächen benachbarter Rasterzellen, so wäre keine Korrektur notwendig, das Gelände folgte der Geometrie dieser Schichtfläche. Die Berechnung erfolgt durch automatischen Aufruf des Werkzeugs *Differenzraster_II*. Bestimmt werden die Korrekturwerte für die vier oben genannten, vertikalen Profilebenen, wobei nur jeweils der rechte Nachbar einen solchen erhält. Bei einem Profilschnitt mit Normalenrichtung 270° entspricht die nördlich angrenzende Pixelzelle dem rechten Nachbarn.

Um mit benachbarten Zellen rechnen zu können, wird das ursprüngliche Raster verdoppelt und verschoben (Werkzeug *shift*). Sucht man den rechten Nachbarn, so muss das neue Raster eine Zellengröße in negativer Richtung verschoben werden. Subtraktion des alten Rasters vom Neuen ergibt den Differenzwert mit richtigem Vorzeichen. Die Berechnungen erfolgen trigonometrisch.

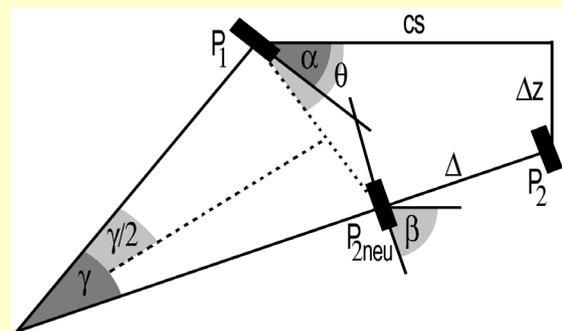
Koordinaten der Punkte P_1, P_2 : z_1, z_2
 Scheinbares Einfallen P_1, P_2 : α, β
 Zellgröße (bei diagonalem Profilschnitt
 multipliziert mit $\text{sqr}(2)$): cs

$$\Delta z = z_1 - z_2$$

$$\theta = (\alpha + \beta) / 2$$

$$a = \tan(\beta) * (cs * \tan(\theta) - \Delta z) / (1 + \tan(\beta) * \tan(\theta))$$

$$\Delta = a / \sin(\beta)$$



Ein positives Δ bedeutet eine Korrektur in Richtung Erdmittelpunkt, entsprechend der positiven Werte für den Abstand eines Stützpunkts vom korrespondierenden Faltenachsenpunkt bei einer Synklinalform (schüsselförmige Falte). Hier liegen die Faltenachsenpunkte oberhalb der Stützpunkte und eine positive Korrektur verlängert diese Differenz, verschiebt also die Stützpunkte nach unten.

Positives Δ bedeutet auch ein Verjüngen der Gesteine in Profilschnitttrichtung oder anders gesagt, ein Abtauchen der Schichtflächen in Schnittrichtung unter die Geländeoberfläche.

Am Ende des Programmablaufs im Werkzeug *SE/delta_dAM_composit* werden die erstellten Werteraster zur Vorbereitung für spätere Berechnungen durch die Zellgröße

geteilt. Bei den diagonalen Profilen wird entsprechend zusätzlich durch die Wurzel von zwei geteilt.

Die oben berechneten Raster beinhalten für jede Zelle einen Korrekturwert, bezogen auf die, in Schnittrichtung, vorherige Zelle. Folgend soll daraus ein Raster mit Korrekturwerten bezogen auf einen Stützpunkt berechnet werden. Hierzu werden die Rasterwerte, ausgehend von einem Punkt, aufsummiert. Im Ergebnis enthält jede Rasterzelle einen Korrekturwert. Dieser entspricht der fehlenden Projektionslänge, um den korrespondierenden Stützpunkt auf die Fläche des Markerhorizontes des Ursprungspunktes abzubilden.

Mit dem Werkzeug *Summenraster* werden die vier oben berechneten Korrekturraster zu einem vereint. Das notwendige *flowDirection*-Raster ist im Vorfeld anzufertigen. Es beinhaltet die Summationsvorschrift, aufgeteilt in acht Richtungen, angefangen mit der Ziffer eins als binärer Kode für 90° (Tabelle 1).

Kode der Summationsvorschrift	1	2	4	8	16	32	64	128
Abweichender Kode für <i>SummenrasterDirAus</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
Richtung	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°/0°	45°
Himmelsrichtung	Ost	Süd-Ost	Süd	Süd-West	West	Nord-West	Nord	Nord-Ost
Wert der Richtungsmaske	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
Korrespondierender Profilschnitt	90°	135°	0°	45°	90°	135°	0°	45°
Name des Rasters	delta_dAM_ X	delta_dAM_ X-Y	delta_dAM_ Y	delta_dAM_ XY	delta_dAM_ X	delta_dAM_ X-Y	delta_dAM_ Y	delta_dAM_ XY

Tabelle 1 Zusammenhang zwischen der Summationsvorschrift (*flowDirection*-Raster) und zugehörigen Profilschnittrichtungen, Maskierungsvorzeichen (Richtung im Profilschnitt) und Name der Differenzraster.

Da die zugrundeliegenden Korrekturraster fehlerbehaftet sind, unterscheiden sich die Summenwerte auf verschiedenen Wegen von einem Ausgangspunkt zu einem Endpunkt. Dass dies nicht sein darf wird einem schnell klar, wenn man sich überlegt, dass so auf einer Oberfläche der Endpunkt abhängig vom Weg einen anderen Höhenwert erhielte.

Um nun den Fehler so gering als möglich zu halten, sollte die Aufsummierung radial vom Startpunkt erfolgen. Ein entsprechendes *flowDirection*-Raster ist leider nicht automatisch zu erstellen. Wendet man das Werkzeug *Flow_Direction*, das die Richtung zum Nachbarn mit dem größten Gradienten bestimmt, auf eine Polybuffer-Fläche an, so erhält man ein segmentiertes Raster (Abbildung 3.4.a). Eine echt radialstrahlige Summationsvorschrift lässt sich nur aus einzeln berechneten Richtungsrastern zusammensetzen. Hierfür erstellt man eine Linienkreuz (oder Stern aus vier oder acht Linien) in mindestens der Größe der Geländefläche, über die summiert werden soll und berechnet die *Flow_Direction*. Gradweise Rotation des Grundgefüges um ein Grad und Neuberechnung erstellt weitere ‚Strahlen‘. Zuletzt werden all diese Raster mit dem Werkzeug *Moasic_To_New_Raster* zusammengesetzt (Abbildung 3.4.b).

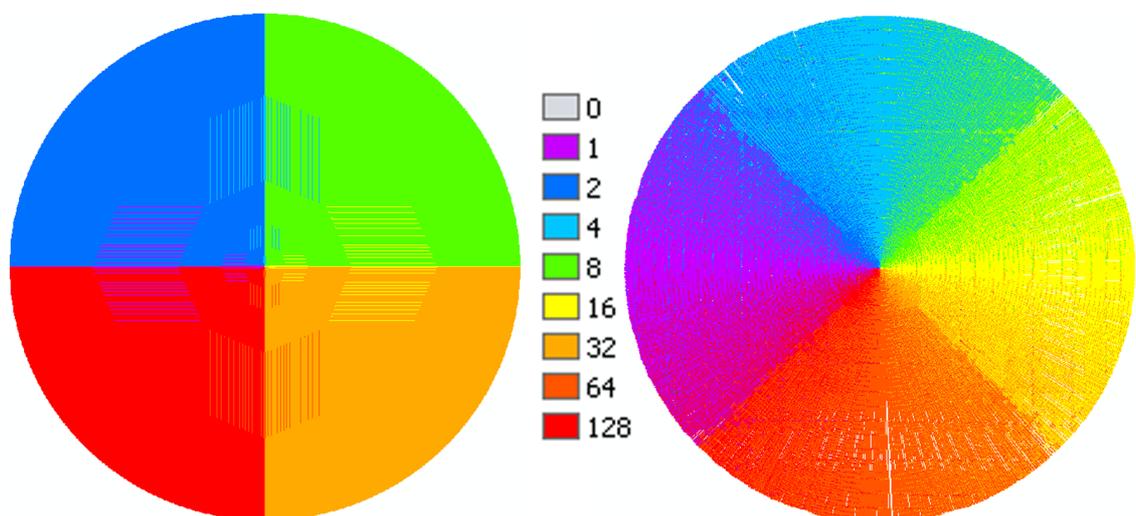


Abbildung 3.4 Vergleich eines Cost-Back-Link Rasters (a) und einer idealen Summationsvorschrift (b): In b) wird tatsächlich ein radialstrahliger Weg zurückgelegt, während in a) von jedem Punkt zunächst die Diagonale bis zum Mittelkreuz verfolgt wird.

Im Werkzeug *Summenraster* wird die radialstrahlige Summationsvorschrift entsprechend der acht dargestellten Richtungen in acht Masken zerlegt, mit unterschiedlichem Vorzeichen für entgegengesetzte Richtungen (Tabelle1). Multiplikation der Masken mit den korrespondierenden Differenzrastern (Tabelle1), die aufgrund der Art ihrer Berechnung im Werkzeug *DifferenzrasterII* zuerst wieder an ihre ursprüngliche Stelle verschoben werden müssen (*shift*), und anschließendes Zusammenfassen zu einem Raster ergibt die Kostenoberfläche für nachfolgende Summation.

Da eine Kostenoberfläche per Definition keine negativen Werte beinhalten darf, muss das Raster entsprechend dem Vorzeichen der Werte geteilt werden. Beide Raster werden als positive Kostenoberfläche getrennt aufsummiert und im Anschluss voneinander ab-

gezogen. Das Aufsummieren erfolgt mit dem Werkzeug *Flow_Lenght* der Werkzeugkiste *Hydrology*. Das Fließrichtungsraster ist die radialstrahlige Summationsvorschrift und für die Einstellung der Messrichtung ist ‚*downstream*‘ anzugeben. Das Ergebnis ist ein Raster mit aufsummierten Korrekturwerten für die Projektion der Stützpunkte entlang ihrer Flächennormalen, bezogen auf die Schichtfläche des Ursprungspunktes.

Dieser Punkt sollte einige grundlegende Bedingungen erfüllen. So sollte an dieser Stelle ein Markerhorizont oder ein markanter Gesteinswechsel an der Geländeoberfläche anstehen, der auch an möglichst vielen anderen Punkten erfasst wurde. Dies bedeutet, dass diese Schichtfläche relativ oberflächennah verläuft und somit nur eine geringere Tiefenextrapolation mit geringeren Lagefehlern notwendig ist. Zudem kann die berechnete Idealfäche in einer weiteren Anwendung durch andere Stützpunkte derselben Gesteinszugehörigkeit in der Form korrigiert werden. Sollten die Gesteinsschichten im untersuchten Gelände monoton einfallen und somit nicht an anderer Stelle wieder zu Tage treten, können auch andere Markerhorizonte zur Korrektur herangezogen werden, ist der Normalenabstand, also die Mächtigkeit der dazwischen liegenden Gesteine, bekannt. Diese Werte sind vielleicht direkt einmessbar oder an anderer Stelle ortnah bereits bestimmt worden oder aber aus der Literatur entnommen. Diese Schichtmächtigkeiten schwanken jedoch von Ort zu Ort und stellen einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor dar. Um die Fehler bei der Summation der unsicheren Differenzraster (siehe oben) möglichst klein zu halten, sollte der Ursprungsort zudem möglichst mittig im Untersuchungsgebiet liegen, da mit der Lauflänge der Summenbildung die potentielle Abweichung vom Realwert zunimmt. Zudem muss die Höhe des Punktes in die bisherigen Berechnungen eingegangen sein, sei es als vollständiger Stützpunkt für die Interpolationen oder mit der Geländehöhenkorrektur, die unter anderem extra für unvollständige Messpunkte (Markerhorizont ohne einmessbare Schichtorientierung) eingeführt wurde.

Um die Präzision der Berechnung zu steigern, kann für mehrere Ausgangspunkte gleicher Schichtfläche ein Summenraster erstellt und für die Korrektur ein Durchschnittswert bestimmt werden. Handelt es sich um Messpunkte unterschiedlicher Markerhorizonte, so ist der Wert der dazwischen liegenden Mächtigkeit dem älteren Gestein (im Normalfall aufrechter oder mäßig geneigter Falten) zuzuschlagen. Dies ist sicherlich für eine handvoll Punkte machbar und sinnvoll. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass diese Stützpunkte möglichst gleichmäßig im Untersuchungsgebiet verteilt sind.

Für eine größere Anzahl von Punkten, oder Scharen von Punkten entlang einer Ausbisslinie ist eine punkt weise Berechnung jedoch sicherlich zu aufwendig. In einer ergänzenden Anwendung wird deshalb ein Korrekturverfahren eingeführt.

Mit dem Werkzeug *Schichtflächen(a)* werden in einem weiteren Schritt aus den Daten für die Fallrichtung und das Schichtfallen und dem oben berechneten Summenraster und der schon bekannten Geländehöhenkorrektur die Koordinaten neuer, auf der Idealfäche sitzender, Stützpunkte berechnet und anschließend als Punktwolke ausgegeben. Durch Interpolation der neuen Stützpunkthöhe erhält man ein Raster, welches die Idealfäche im 2,5D Raum darstellt.

Die Berechnung erfolgt durch Koordinatenzerlegung eines Verschiebevektors der oben bestimmten Summenlänge und der Winkel der Fallrichtung α und des Schichtfallens β .

Raumlage des Punktes P_1 : α_1, β_1
 Summenlänge des Verschiebevektors: dAM

Koordinaten des neuen Stützpunktes:

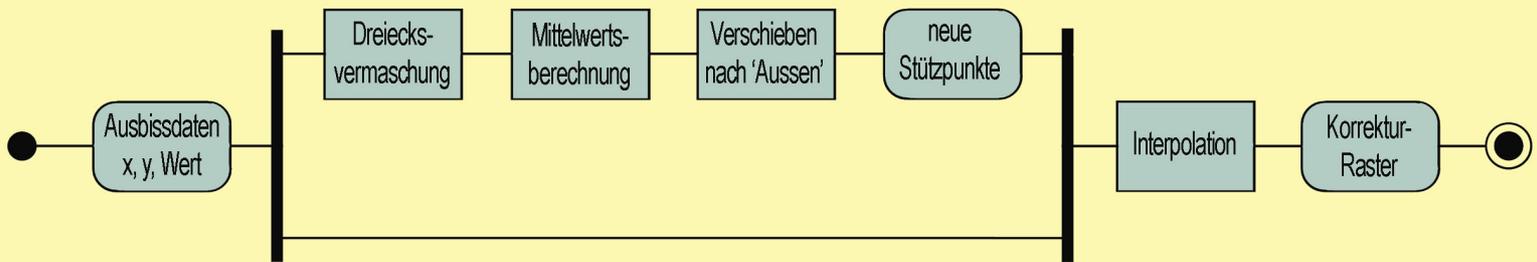
$$X_{\text{neu}} = X_{\text{alt}} + \sin(\alpha) * \sin(\beta) * \text{dAM}$$

$$Y_{\text{neu}} = Y_{\text{alt}} + \cos(\alpha) * \sin(\beta) * \text{dAM}$$

$$Z_{\text{neu}} = Z_{\text{alt}} + \cos(\beta) * \text{dAM}$$

Die anschließende Umwandlung in ein Punkthema (*Raster_To_Point*) funktioniert nur mit Integer-Zahlen, so dass zur höheren Genauigkeit zunächst mit dem Faktor 1000 multipliziert wird. Durch *Join* der Attributtabelle über die Punkt-ID können die Werte der verschiedenen Raster aneinandergesetzt werden. Die Ausgabe erfolgt als Punktwolke mit den Koordinaten der verschobenen Stützpunkte und deren Ursprung als Attributwerte, und als interpoliertes Raster der Höhen der Idealfäche. Die Ursprungswerte sind für weitere Berechnungen notwendig.

Das Höhenraster der Idealfäche stellt die modellierte Geometrie einer spezifischen, durch den Ursprungspunkt des Werkzeugs *Summenraster* festgelegten, Gesteinschicht dar. Seine Verschneidung mit der tatsächlichen Geländeoberfläche erzeugt künstliche Ausbisslinien. Der Vergleich mit dem tatsächlichen Verlauf zeigt die Qualität der Modellierung auf. Die Darstellung der Idealfäche ermöglicht eine genauere Interpretationen der synthetisierten Faltenstruktur und ist hilfreich bei der fortgeführten Planung der Datennahme im Feld.



OuterGrowth (b)

3.3 Anpassung der Idealfäche

Unwägbarkeiten bei den tatsächlichen Faltengeometrien, ungenügende Datenbasis, sich fortpflanzende Fehler bei den Berechnungen und Abweichungen von der Natur durch idealisierte Modelle führen dazu, dass die berechneten Idealfächen nicht der Realität entsprechen. Sie werden zwar zumeist den ungefähren Verlauf der Faltengeometrie wiedergeben, doch wird die Unsicherheit der Extrapolation mit dem Abstand vom Ursprungsort zunehmen. Je mehr solcher Quellpunkte nun in die Berechnungen einfließen, umso genauer kann das Ergebnis werden. Zum Einen stellen sie einen geometrischen Rahmen, in den die berechnete Idealfäche eingespannt wird, zum Anderen ermöglichen sie eine Extrapolation der Schichtflächenkorrektur auch über die Grenzen der Quellpunkte hinaus und somit eine Ausdehnung der Korrektur auf das gesamte Untersuchungsgebiet.

Als mögliche Quellpunkte gelten alle Aufnahmen der zu modellierenden Schichtfläche (Ausbisslinie der Schichtfläche im Gelände), sowie Punkte anderer Horizonte mit bekannten Normalenabstand (Mächtigkeit der zwischen beiden Horizonten liegenden Gesteinschichten). Letztere können zwar berücksichtigt werden, doch ist es nicht unproblematisch einen festen Schichtabstand anzugeben. Ist dieser im Feld direkt messbar, kann ohnehin der Punkt der gesuchten Schichtfläche in die Korrektur einfließen.

Die verwendeten Datenpunkte gleicher Schichtzugehörigkeit besitzen zunächst den Korrekturwert Null, da die Idealfäche ja durch sie hindurchgelegt werden soll. Punkte fremder Schichtzugehörigkeit halten den Wert der Mächtigkeit der dazwischenliegenden Gesteinspakete. Der Wert des Normalenabstands ist im Normalfall aufrechter oder mäßig geneigter Falten dem älteren Gestein zuzuschlagen. Anschließend muss der Wert des Summenrasters des Werkzeugs *Summenraster* allen Datenpunkten hinzu addiert werden.

Im Werkzeug *ConvexHull* wird zunächst aus den Raumkoordinaten (x, y) der gewählten Quellpunkte die abgedeckte Fläche bestimmt und für das nächste Werkzeug bereitgelegt. Diese ist identisch mit der Fläche des, durch diese Punkte, aufgespannten TIN.

Mit dem Werkzeug *OuterGrowth(b)* findet die Berechnung zusätzlicher Stützpunkte außerhalb des Ereignisraums der Quellpunkte statt. Hierzu werden zunächst diejenigen Punkte der Quelldaten gesucht, die auf der Umhüllenden liegen, also den Ereignisraum nach außen begrenzen. Diese werden extrahiert und wie Kondensationskeime für Thiessenpolygone behandelt.

Bei der Erstellung von Thiessenpolygone wird der Raum in Domänen aufgeteilt. Die Grenzen dieser Bereiche stehen mittig und senkrecht auf den Kanten eines durch die Kondensationskeime aufgespannten TIN. Da die Korrektur jedoch nicht ordinal erfolgen soll, erhalten die Grenzkanten zwischen den Polygonen den Mittelwert der beteiligten Kondensationskeime (Abbildung 3.5.a).

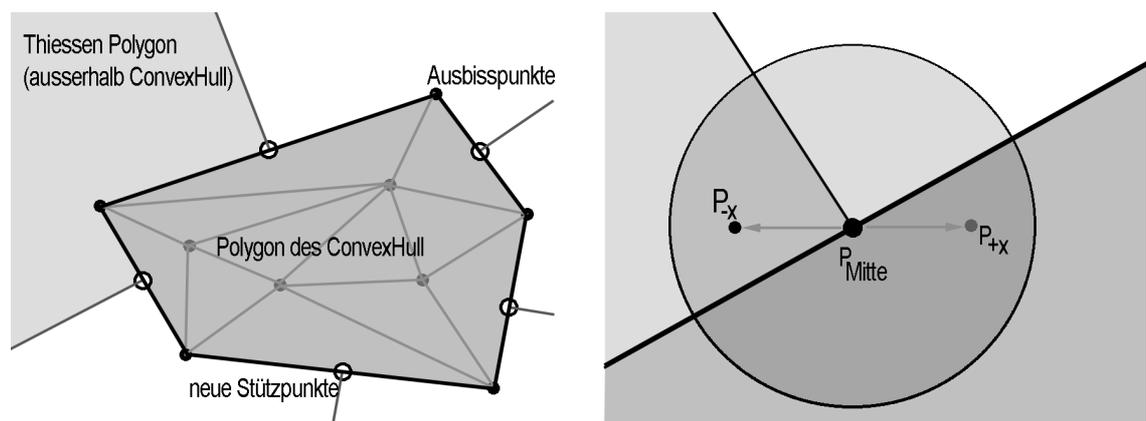


Abbildung 3.5 Bestimmung der Korrekturstützpunkte: **a)** Durch Dreiecksvernetzung der Datenbasis kann das Flächenpolygon der umfassenden Grenze bestimmt werden. Randpunkte der einzelnen Kanten der Convex Hull ergeben deren Mittelpunkte und den gemittelten Korrekturwert. **b)** Zur Bestimmung von ‚Aussen‘ und ‚Innen‘ der Convex Hull werden die neu definierten Punkte um einen Wert Δ nach links und rechts verschoben. Die Auswahl der Punkte, die nicht in die Fläche des Polygon des Convex Hull fallen, liegen ‚Aussen‘.

Im Werkzeug *OuterGrowth(b)* erfolgt die Berechnung der neuen Stützpunkte durch Mittelwertbildung, sowohl der Raumkoordinaten, als auch des Korrekturwertes, der Punkte, die jeweils Eckpunkte einer Kante der Umhüllenden sind. Die neuen Punkte kommen genau auf die Mitte dieser Kanten zu liegen. Durch Verdoppelung und Verschiebung dieser Punkte um eine Einheit nach $+x$ und $-x$ mit anschließender Auswahl derjenigen, der nicht in den Ereignisraum der Datenbasis zu liegen kommt, lässt sich die Richtung von ‚Aussen‘ (und Innen) bestimmen (Abbildung 3.5.b). Nun erfolgt die

Berechnung neuer Raumkoordinaten für diese Punkte mit einem beliebigen Abstand von der Umhüllenden. Dieser ist möglichst so zu wählen, dass die Fläche, aufgespannt von den neuen Stützpunkten, das gesamte Untersuchungsgebiet überdeckt.

Raumkoordinaten der Randpunkte der Kanten des Convex Hull: x_1, y_1, x_2, y_2
 Anzeiger über die Verschieberichtung („Innen“, „Aussen“): flag
 Abstand des neu zu berechnenden Punktes von der Convex Hull: Δ

$$\Delta x = (x_1 - x_2) / 2$$

$$\Delta y = (y_1 - y_2) / 2$$

$$x_{\text{Mitte}} = \Delta x + x_2$$

$$y_{\text{Mitte}} = \Delta y + y_2$$

$$\text{Korrekturwert } Z = (\text{Korrekturwert}_1 + \text{Korrekturwert}_2) / 2$$

$$X_{\text{neu}} = x_{\text{Mitte}} + \Delta * \text{flag} * \cos(\text{atan}(\Delta x / \Delta y)) - \text{flag}$$

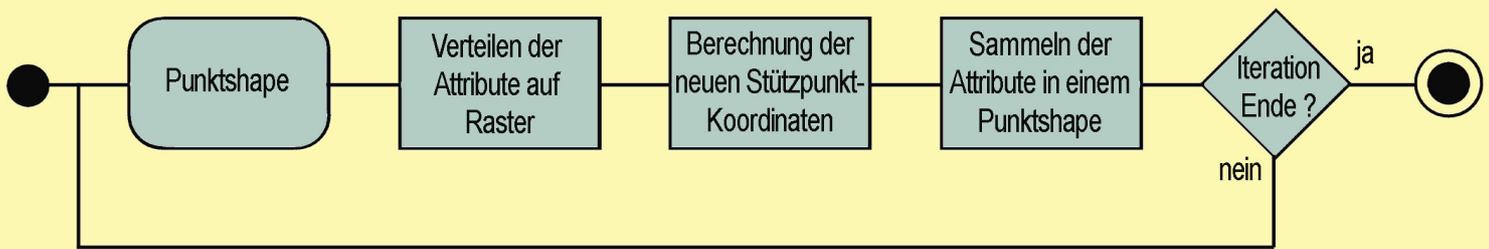
$$Y_{\text{neu}} = y_{\text{Mitte}} + \Delta * \text{flag} * \sin(\text{atan}(\Delta x / \Delta y))$$

Durch Zusammenführung der neuen Punkte und der Quelldaten kann nun ein Korrekturraster interpoliert werden, das vom Summenraster des Werkzeugs *Summenraster* abgezogen wird.

Innerhalb der Umhüllenden findet eine echte Interpolation statt, während außerhalb durch obigen Trick eine statische Extrapolation berechnet wird. Da diese mit großen Unwägbarkeiten und somit hoher Unsicherheit verbunden ist, sollte darauf geachtet werden eine möglichst große Fläche des Untersuchungsgebietes mit echten Stützpunkten abzudecken.

Im Anschluss an die Berechnungen des Werkzeugs *OuterGrowth(b)* kann mit dem Werkzeug *Schichtflächen(a)* nun erneut eine Idealfäche berechnet werden, die durch Einbeziehung neuer Daten eine höhere Qualität erreicht. Das interpolierte Korrekturraster zeigt die Abweichung von der unkorrigierten Idealfäche. Hohe Werte deuten auf fehlerhafte Interpolation oder fehlerhafte Messwerte hin. Eine weitere Entscheidungshilfe bei der fortgeführten Planung der Messkampagne stellt dieses Korrekturraster jedoch nicht dar, da nicht auszumachen ist, wo genau sich die Quelle der fehlerhaften Werte befindet. Hinweis fehlerhafter Werte ist das Korrekturraster zudem nur, wenn es aus Datenpunkten nur einer bestimmten Schichtfläche erstellt wurde!

Projection / ProjectionIteration



3.4 Hilfswerkzeug Projection / ProjectionIteration

Zunächst sollen in einer Anwendung die Werte für Fallrichtung und Schichtstreichen der korrigierten Idealfläche ermittelt und anschließend iterativ der Geländeoberfläche aufprojiziert werden. Dabei wird der Schnittpunkt der Flächennormalen eines Punktes der Idealfläche mit der Oberfläche gesucht. Dieser Schnittpunkt ist nur direkt zu errechnen, wenn die Geländeoberfläche als mathematische Kurve vorliegt. Behelfsweise wird der gesuchte Punkt iterativ angenähert. Dabei wird der vorgefundene Punkt als neuer Anfangswert in die Berechnung eingegeben. Mit jedem Durchgang liegt der Neubestimmte Punkt näher am gesuchten Ort. Das Ergebnis entspricht dem der ersten Anwendung (3.1 Interpolation der Raumlage), nur dass hier alle verfügbaren Daten zur Modellierung herangezogen wurden. Entsprechend näher liegen die gefundenen Strukturen an der Wirklichkeit. Ist während der Geländearbeit Zeit genug vorhanden alle Schritte bis hierhin durchzuführen (und alle anfallende Informationen auszuwerten), kann eine optimale Datennahme erreicht werden.

Im Werkzeug *Projection* wird zuerst aus dem Z-interpolierten Raster der Idealfläche (Oberfläche der Idealfläche) mit dem Werkzeug *Aspect* die Fallrichtung α und mit dem Werkzeug *Slope*, beide aus dem Modul *3D_Analyst*, das Schichtfallen β errechnet. Folgend werden die Raumkoordinaten der projizierten Stützpunkte bestimmt und sowohl die neuen Koordinaten, als auch die ursprünglicher Lage wieder in Raster umgewandelt. Die Berechnung findet im Profilschnitt statt. Hierzu wird das Koordinatensystem um $90^\circ - \alpha$ um den Stützpunkt gedreht.

Koordinaten des Punktes P_S und seines Ursprungs P_{ait} (vor der Projektion in *Schichtflächen(a)*):

$x_S, y_S, z_S, x_{alt}, y_{alt}, z_{alt}$

Raumlage der Schichtfläche an Punkt P_S : α, β

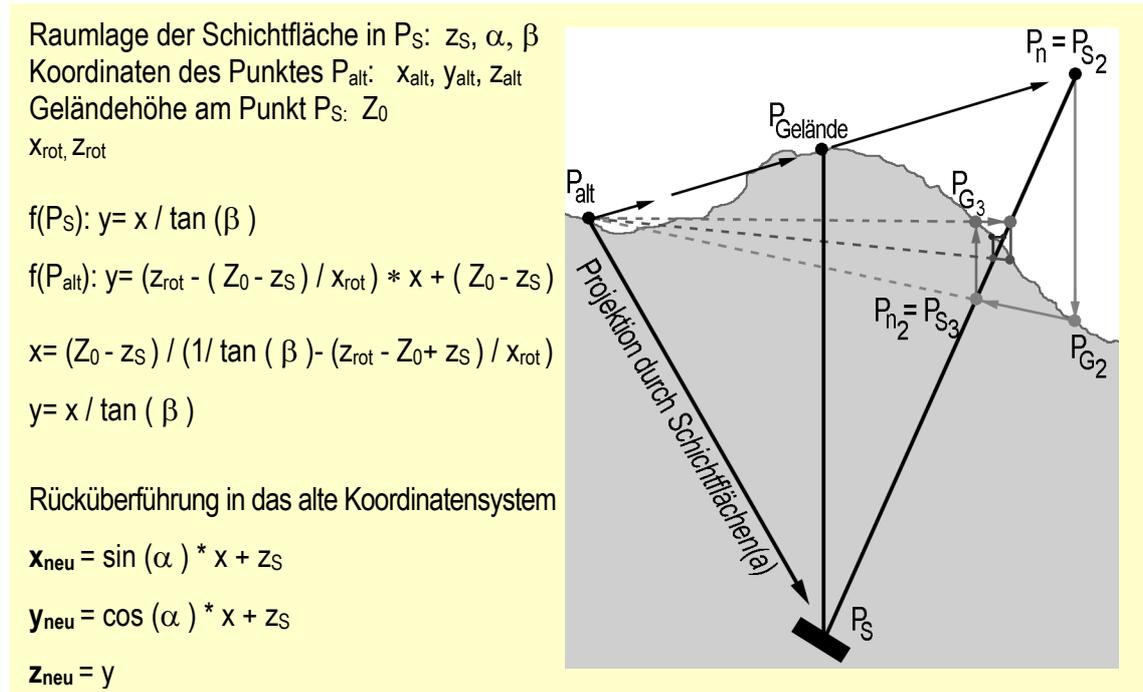
$$\Delta x = x_{alt} - x_S$$

$$z_{rot} = z_{alt} - z_S$$

$$\Delta y = y_{alt} - y_S$$

$$x_{rot} = \Delta x * \sin(\alpha) + \Delta y * \cos(\beta)$$

In diesem Profil ist der Punkt der Idealfäche der Nullpunkt des Koordinatensystems und dessen vertikale Projektion ein Punkt auf der y-Achse ($P_{\text{Gelände}}$). In der weiteren Berechnung wird die Flächennormale des Punktes im Koordinatenursprung mit der Geraden, aufgespannt durch $P_{\text{Gelände}}$ und dem Ursprungsort des Punktes P_S (P_{alt}), verschritten. Die vertikale Projektion des erhaltenen Schnittpunktes an die Geländeoberfläche wird im weiteren, iterativen Verlauf als ‚neuer‘ Punkt $P_{\text{Gelände}}$ behandelt.



Abschließend werden die Informationen aus den Rastern für $X, Y, Z, X_{\text{neu}}, Y_{\text{neu}}, Z_{\text{neu}}, \alpha$ und β wieder in ein Punktshape zurückgeführt. Die Iterative Weiterberechnung erfolgt im Werkzeug *ProjectionIteration*, das dem Werkzeug *Projection* gleicht, einzig mit dem Unterschied, dass die Werte für Fallrichtung und Schichtfallen nicht neu bestimmt werden müssen, sondern direkt aus dem Punktshape entnommen werden können. Mit der Anzahl der Iterationen steigt die Genauigkeit der Bestimmung des Oberflächenpunktes.

Hilfswerkzeug Winkelfehler

Zur Abschätzung der Fehler der Modellierung werden die berechneten Werte für die Raumorientierung der Gesteinsschichten verglichen mit der tatsächlich am Ort vorherrschenden Flächenlage. Eine getrennte Auswertung der Abweichungen von Fallrichtung und Schichtstreichen ist nicht möglich, da beide Winkel zusammenhängen und einen Fehler definieren. So geht bei einem horizontalen Schichtfallen ($\beta = 0^\circ$) die Fallrichtung nicht in die Fehlerberechnung ein, da eine Horizontale keine Richtung beinhaltet. Im Gegensatz dazu bestimmt sich die Abweichung bei vertikalem Schichtfallen ($\beta = 90^\circ$) direkt aus dem Fehler der Fallrichtung.

Bestimmt werden muss also die Abweichung der Raumlage der Flächen. Diese ist identisch mit dem Winkel zwischen den korrespondierenden Schichtflächennormalen. Berechnet wird dieser im Werkzeug *Winkelfehler* durch Drehung der Normalen des Messpunktes um den negativen Betrag der Fallrichtung und des Schichtfallens mit dem Koordinatenursprung als Drehpunkt. Solcherart wird die Normale der Referenzfläche auf die Z-Achse abgebildet. Der gesuchte Fehler ist also der Winkel zwischen der Normalen des Messpunktes und der Z-Achse.

Raumlage des Messpunktes: α, β (Schichtstreichen, Schichtfallen)
 Raumlage des Referenzpunktes: γ, δ (Schichtstreichen, Schichtfallen)

$$\theta = \gamma - \alpha$$

$$x = \sin(\theta) * \sin(\delta)$$

$$y = \cos(\theta) * \sin(\delta)$$

$$z = \cos(\delta)$$

$$y_{\text{neu}} = y * \cos(\beta) - z * \sin(\beta)$$

$$z_{\text{neu}} = y * \sin(\beta) + z * \cos(\beta)$$

$$\Omega = \text{atan}(\text{sqr}(x^2 + y_{\text{neu}}^2) / z_{\text{neu}})$$

Das Ergebnisraster zeigt die Winkeldifferenz zwischen den Flächennormalen der berechneten Punkten und der Realität. Dieser Parameter hält nur positive Werte. Ob also die Steigung der Schichtflächen im Modell als zu gering oder zu hoch berechnet wurde, geht daraus nicht hervor. Da die Interpolation der Raumwinkel verschiedener Punkte aber immer über die Horizontale verläuft (überkippte Schichten sind bei der Modellierung durch die Begrenztheit auf 2,5D nicht erlaubt), fallen die berechneten Raumlagen eher zu flach aus.

Die Berechnung des räumlichen Lagefehlers, also des Abstands von Punkten gleicher Bedeutung für die Geometrie der Falte, ist leider nicht möglich.



Kapitel 4 Modellierung

Die Daten, die den verschiedenen Modellen zu Grunde liegen, werden im Programm *GeoMatrix* generiert. Dies ist eine, vom Autor in Tcl/Tk programmierte, Anwendung. Sie erlaubt die Darstellung struktureologischer Daten, wie Schichtflächen, Störungsflächen, Faltenachsen, Striemungslinearen und Busolenzüge von Ausbisslinien, und deren Manipulation wie etwa Blockversatz an Störungen und Faltung.

Für die Berechnung der benötigten Modelldaten startet das Programm mit einer beliebigen Anzahl regelmäßig angeordneter Datenpunkte, die auf einer Horizontalen liegen. Sie stellen Elemente einer ungefalteten Schichtfläche im Raum dar. Durch Wahl einer Profilebene und einer darin erstellten Faltengeometrie werden die Punkte zylindrisch gefaltet. Die Faltenachsen verlaufen parallel der Normalen zur Profilebene. Die Faltung erfolgt durch vertikales *simple shear*. Dabei werden die Datenpunkte einfach entlang der Vertikalen zum Ort der gewünschten, gefalteten Schichtfläche verschoben. Anschließend erhält dieser Stützpunkt durch Verkippen der, durch ihn dargestellten, Schichtfläche um den Betrag der lokalen Steigung seine neue Raumorientierung. Solcherart erstellte Daten können keine überkippten Falten darstellen. Diese sind jedoch wegen der Einschränkung auf 2,5D sowieso von der Modellierung ausgeschlossen.

Simple shear kommt in der Natur als Faltungsmechanismus nur in größeren Tiefen (von meist über 15km Tiefe) vor und dann zumeist horizontal.

Für die Nutzbarkeit der berechneten Daten in den Modellen ist dies jedoch unerheblich, da als Vorlage jede beliebig geformte Oberfläche herangezogen werden kann (mit Einschränkungen der Nutzung von 2,5D GIS).

Normale Falten besitzen etwa eine Wellenlänge von 100m bis 10km. In diesem Bereich liegen vier wichtige Eigenschaften der Falte, zwei Inflexionslinien (Linien der Kurvaturumkehr) und zwei Scharnierlinien (Linien größter Krümmung). Bei Gleichverteilung der dazwischenliegenden Bereiche, besitzt somit jeder Bereich eine Länge von 25m bis 2,5km.

In eher kleinräumigen Kartierungen mit Karten im Maßstab 1:10000 bis 1:25000 liegt die Genauigkeit der Ortsbestimmung (abgesehen vom Einsatz von GPS-Geräten) bei maximal 5m. Bei den Modellierungen in dieser Arbeit wird deswegen eine Zellgröße von 2,5m verwendet. Bezogen auf die Wellenlänge normaler Falten können so selbst die Kleineren noch ausreichend genau dargestellt werden.

Reale Falten werden jedoch meist von Kleinfalten überprägt. Deren Wellenlängen liegen im Meter-Bereich. Diese können nicht berücksichtigt werden und bei der Datennahme, bzw. bei der Auswertung, ist darauf zu achten, dass nur die Trendfläche der kleingefalteten Schichten in die Berechnungen eingeht, da sie sonst eine Fehlerquelle darstellen. Nicht immer ist am Aufschluss im Gelände allerdings einzusehen, welcher Größenordnung die eingemessenen Falten angehören.

In den ersten zwei Modellen liegt die Wellenlänge der Faltung im Bereich von 250m, die dargestellte Fläche beträgt etwa einen viertel Quadratkilometer. In den letzten beiden Modellen beträgt die Grundfläche etwa neun Quadratkilometer, die Wellenlänge der dargestellten Falten liegt bei zwei Kilometern.

In einem ersten Modell werden die Daten direkt aus dem Programm *GeoMatrix* genutzt. Das heißt, dass alle zur Modellierung gewählten Stützpunkte einer Schichtfläche angehören. Zur Korrektur der Idealfäche kann also ein jeder Punkt herangezogen werden. Die Interpolation der Höhen-Werte der Stützpunkte stimmt nicht mit der tatsächlichen Modellfläche überein, eine Geländekorrektur ist deshalb notwendig. Das bei der Berechnung der Idealfäche entstehende Summenraster trägt wegen der geringen Abweichung von Geländeoberfläche und Schichtfläche nur minimale Werte, so dass die Fehler durch Extrapolation gering ausfallen. Die Falte soll eine einfache, zylindrische Form haben.

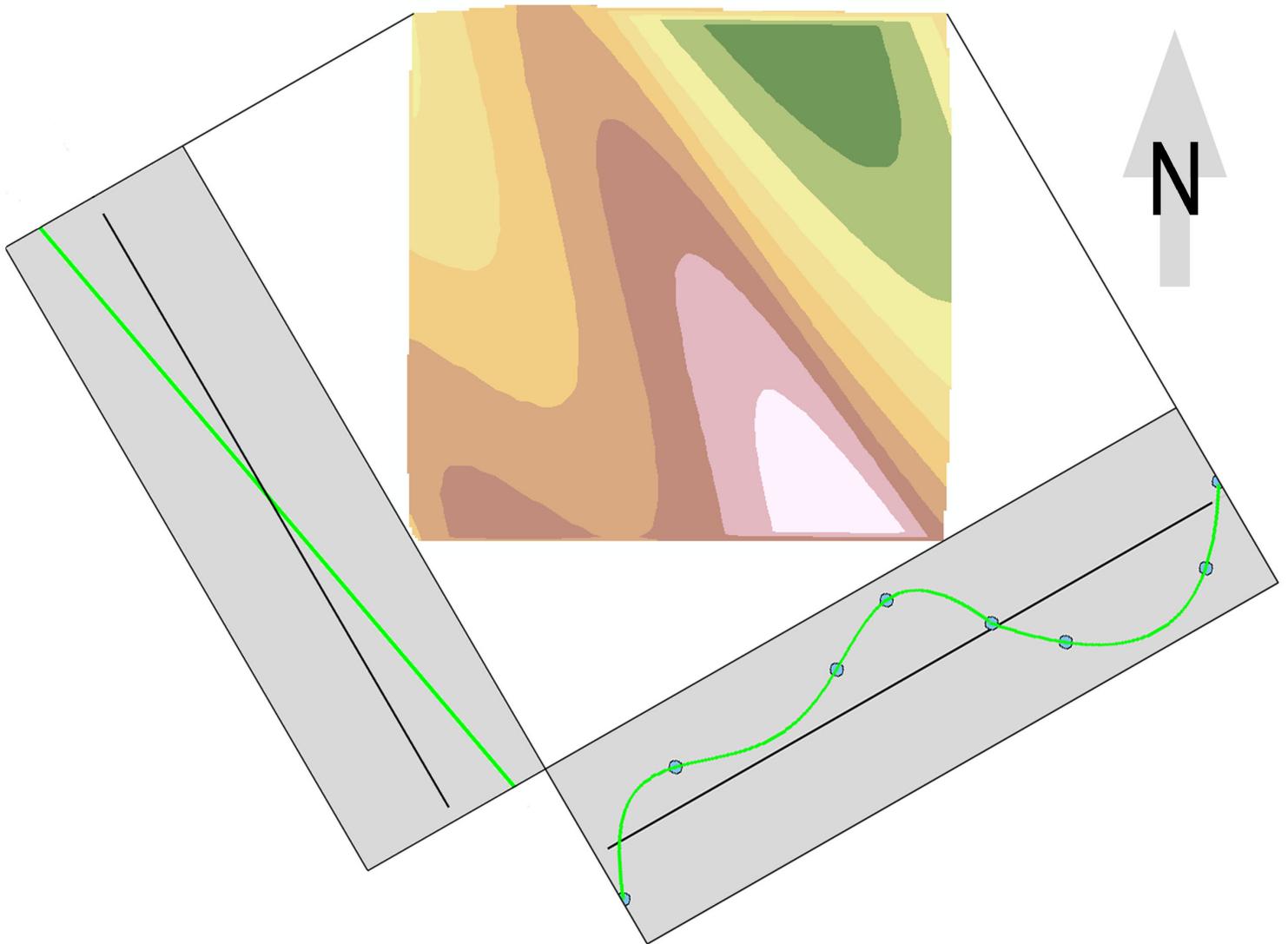
Durch Projektion aller Daten des ersten Modells auf eine subhorizontale Fläche entsteht die Grundlage für das zweite Modell. Da das Gelände eben ist, ist eine Geländehöhenkorrektur nicht notwendig. Eine Verschneidung der Schichtfläche des ersten Modells mit der subhorizontalen Geländeoberfläche des zweiten Modells ergibt die Ausbisslinien,

die zur Korrektur der Idealfläche herangezogen werden können. Die Extrapolation hält durchschnittliche Werte, womit auch ihr Fehler moderat ausfällt.

Die korrigierte Idealfläche des zweiten Modells sollte den Ausgangsdaten des ersten Modells entsprechen, da ja hiervon abgeleitet.

In einem dritten Modell soll die Anwendung an einer überprägten Faltung getestet werden. Hierzu werden in *GeoMatrix* zwei Faltungen nacheinander ausgeführt. Die Stützpunkte gehören wie im ersten Modell einer Schichtfläche an.

In einem letzten Modell wird die überprägte Faltengeometrie des dritten Modells auf die Fläche eines echten Gebirgsstocks projiziert, um einen Realfall zu simulieren. Die Stützpunkte für die Modellierung werden in diesem Fall der Modellmenge an Stellen entnommen, wo sie möglicherweise tatsächlich einzusammeln wären.



4.1 Modell I

Die Daten für das erste Modell stellen eine mit 10° leicht nach Nordwest abtauchende, zylindrische Falte dar. Der Bereich der ausgedehnten Antiklinale im Westen ist von einer zusätzlichen, kleinen Falte überprägt. Die Erstellung der Modelldaten in *GeoMatrix* erfolgt durch zunächst 10° Rotation der Daten in Richtung 330° und anschließende Faltung in der Profilebene (Richtung der Normalen der Profilebene: 330° , Fallen: 10°). Folgend müssen die Daten auf das notwendige Format gebracht werden, um in ArcGIS eingelesen werden zu können und um der Form zu entsprechen, die von den Anwendungen verlangt werden. Nach den Vorbereitungen enthalten die Daten die Attribute: X, Y, Z, alpha und beta. Alpha entspricht dabei der Fallrichtung und beta dem Schichtfallen.

Aus der Datenmenge werden 12 Stützpunkte zufällig und jeweils einer an den Ecken des Modells entnommen. Diese 16 Stützpunkte entsprechen knapp 0,5% der 2500 Punkte des Modells (Kantenlänge 500m; Zellgröße 10m) und sind die Datenbasis für die folgende Modellierung. Um zu vermeiden, dass alle Punkte zufällig in ein enges Cluster

fallen oder entlang einer Linie aufgereiht sind, wird die Modellfläche in vier mal vier Bereiche eingeteilt, aus denen jeweils zufällig ein Punkt gezogen wird. Die Stützpunkte an den Ecken werden zudem soweit nach innen verschoben, dass sie keinen viereckigen ‚Rahmen‘ um die anderen Stützpunkte aufspannen. Dies ist wichtig, da die randlichen Dreiecke der Vermaschung sonst sehr lang werden und mehrere Bereiche einer Falte überdecken können. Ist dies der Fall, so werden an diesen Kanten falsche Werte berechnet und die nachfolgende Validierung verfälscht.

Da die Basisdaten im 10m-Abstand vorliegen, in der Modellierung aber mit einer Zellgröße von 2,5m gearbeitet werden soll, müssen sie zur Validation der Modellierung interpoliert werden. Dies ist auf Grund der hohen Datendichte und der Einfachheit der Faltung mit der von de Kemp vorgeschlagenen Direction Cosine Interpolation möglich [deKemp 2000]. Die entstehenden Raster stellen eine ausreichend gute Abbildung des Modells dar.

Nach der Nutzung des Werkzeugs *InnerGrowth_composit* liegt neben einer Tabelle, mit der weitergerechnet wird, auch ein Linienthema vor, das die Kanten der vollzogenen Dreiecksvermaschung darstellt. Einzige Eingabe in das Werkzeug sind die Rohdaten, vorliegend als *Feature Dataset* oder Tabelle in der Form X, Y, Z, alpha, beta. Ausgegeben wird ein *Feature Dataset*, das die Kanten des erstellten TINs beinhaltet und eine Tabelle, die frei benannt wird.

Die bestimmten Kanten der Dreiecksvermaschung liegen aus geologischer Sicht nicht unbedingt immer sinnvoll. Optimal verlaufen sie subparallel zum Streichen der Faltenachsen. Hier gibt es eine erste Korrekturmöglichkeit, indem die Daten der Eckpunkte der ungünstig liegenden Kanten ausgetauscht werden (Abbildung 4.1). Dies ist ein relativ aufwändiger und somit zeitintensiver Prozess, der allerdings zumeist ein deutlich besseres Berechnungsergebnis liefert. Beschließt man sich zu diesem Schritt, so wird mit dem Werkzeug *InnerGrowth* unter Eingabe der Rohdaten, das *Feature Dataset* der Kanten (siehe oben) und ein *Shapefile* ausgegeben, das unbedingt ‚tinEdgeData‘ heißen muss. Hierin können unter der ID der gesuchten Kante die Daten der Eckpunkte von Hand ausgetauscht werden (FID_tinEdge). Durch anschließendes Nutzen des Werkzeugs *InnerGrowth_II* wird die Anwendung komplettiert und dieselbe Tabelle ausgegeben, die auch vom Werkzeug *InnerGrowth_composit* erstellt wird.

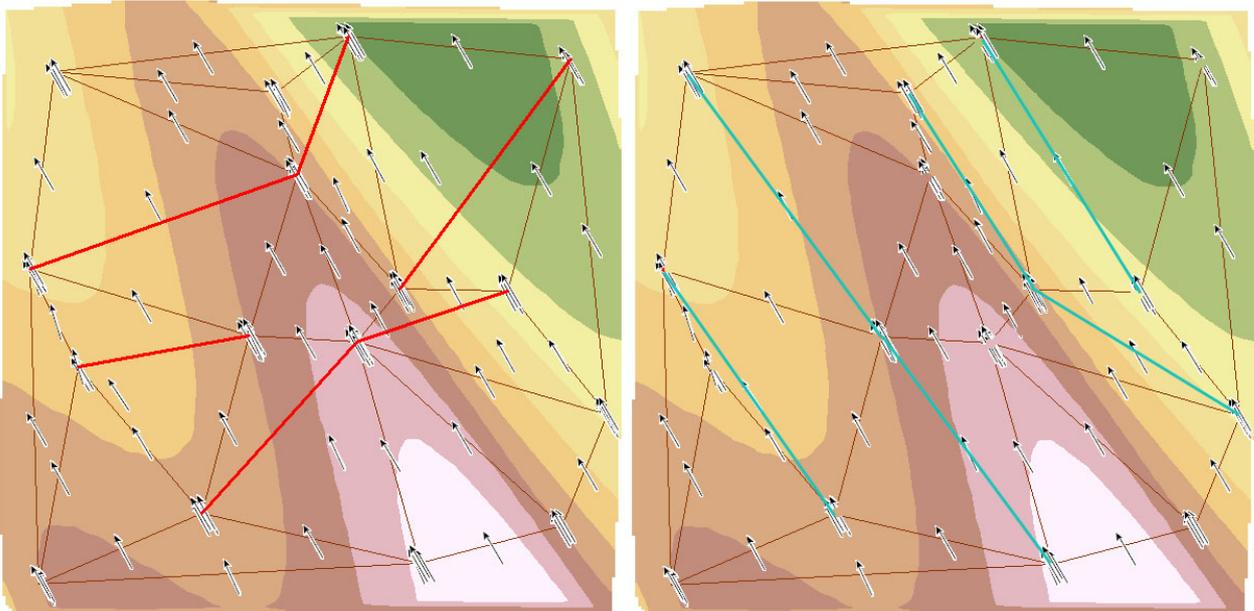


Abbildung 4.1 TIN-Korrektur: Eine ideale Vermaschung der Stützpunkte wäre erreicht, wenn die Kanten subparallel zu den Faltenachsen verlaufen würde. Im Beispiel des Modell I ergeben sich sechs Korrekturmöglichkeiten.

Im Werkzeug *ConCalculation* muss bereits die später gewünschte Zellgröße der Berechnungen (aus programmtechnischen Gründen multipliziert mit zehn) eingegeben werden. Dies ist notwendig, damit entlang der Kanten der Dreiecksvermaschung die, nach der Busk-Methode bestimmten, Werte gelten. Gibt man einen deutlich kleineren Wert ein, so wirken die berechneten Werte nur in der Mitte der Kanten. An den randlichen Stützpunkten gilt dann ein Mischwert aller beteiligten Kanten. Bei solcherart berechneten Schichtflächen werden schwach gekrümmte Bereiche flacher und größer dargestellt, während stark gekrümmte Bereiche kleiner werden und noch schärfere Biegungen zeigen. Das Ergebnis ist eine eckigere Oberfläche.

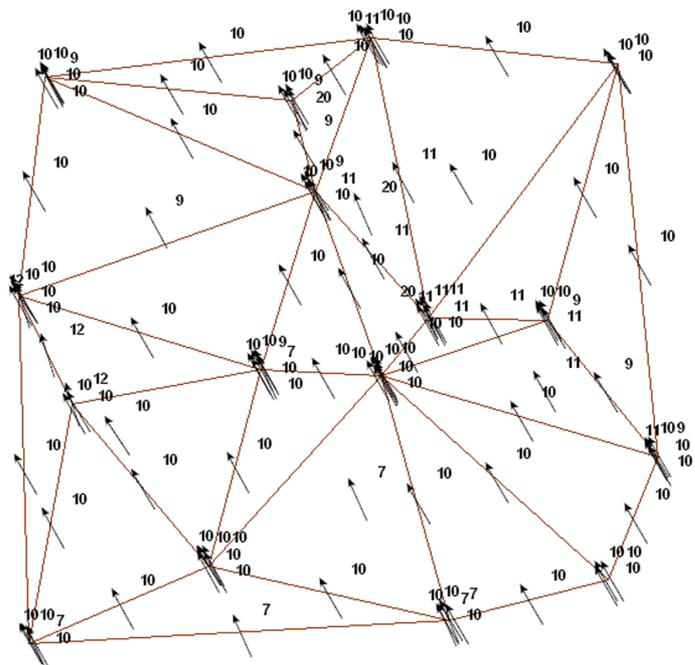
Bei Eingabe eines größeren Wertes werden zusätzliche Stützpunkte entlang der Kanten nach innen verschoben. Zwischen ihnen gelten die Werte errechnet nach der Busk-Methode, außerhalb ein Mischwert.

Nun werden mit dem Werkzeug *ConCalculation* unter Eingabe der Tabelle und Anwendung der Busk-Methode die Werte berechnet, die für die Interpolation notwendig sind. Dies geschieht mit dem Werkzeug *PostCalculation*. Aus oben bestimmter Tabelle werden mehrere Ausgaberraster gerechnet, die eine Flächeninterpolation der, im Gelände gesammelten, Stützpunkte darstellen. In die Berechnung kann eine Korrektur für die Geländehöhen eingebracht werden, sei es ein Höhenraster, abgeleitet von der Topographie des Geländes, oder nur die Einbeziehung der Höhe weiterer Datenpunkte, die erst

später in die Berechnung einfließen, wie zum Beispiel Grenzen zwischen Gesteinsschichten oder Markerhorizonte. Alle Raster können beliebig benannt werden (*alpha* steht für die Fallrichtung, *beta* für das Schichtfallen und das korrigierte *beta* für die Projektion auf die korrigierte Geländehöhe).

Zur Interpretation der gewonnenen Daten kann zunächst einmal die Raumlage der, mit dem Werkzeug *ConCalculation*, berechneten Faltenachsen untersucht werden. Die Tabelle wird mit AX und AY als Punktshape dargestellt, der Wert für die Fallrichtung der Achsen (aRD_FA in RAD!) als Richtungsgeber eines Pfeils. Durch Etikettieren des Wertes des Fallens sind alle Daten übersichtlich zusammengestellt (Abbildung 4.2).

Abbildung 4.2 Faltenachsen Modell I (Streichen in Pfeilrichtung und Fallen entsprechend der Label). Sie besitzen alle die gleiche Richtung und das gleiche Fallen, was auf eine zylindrische Falte hinweist.



Die Faltenachsen verlaufen alle parallel zueinander und besitzen etwa dasselbe Einfallen von zehn Grad. Dies deutet auf eine zylindrische Falte mit einheitlichem Fallen der Faltenachse hin. Senkrecht zu den Achsen liegt das Profil der Falte, parallel zu den Achsen passieren keine Änderungen, weder im Schichtstreichen, noch im Schichtfallen. Im Vergleich mit den Ergebnistrastern der ersten Anwendung (Abbildung 4.3.a, 4.3.b) können schon einige Bereiche für eine zusätzliche Beprobung ausgewiesen werden. Besonders wichtig für eine gute Datenbasis sind die Bereiche des steilsten Schichtfallens, der Bereiche um die Inflexionslinien, weil im Gelände diese Daten nur zufällig aufgenommen werden. Da alle Fallwerte über Null interpoliert werden, bedeutet dies eine insgesamt zu flache Darstellung der Faltengeometrien. Doch auch die Stellen flachen Einfallens

besitzen Gewicht, wie jeder zusätzliche Stützpunkt. Hier ist vor allem wichtig, dass Bereiche unruhigen Datenverhaltens besser beprobt werden. Solcherart reduzieren sich die Flächen einer dringenden Beprobung. In Abbildung 4.5 sind diese Problembereiche aufgezeigt.

Die Faltenachsen weisen ein weiteres wichtiges Merkmal auf. Deren Richtung ist im Bereich der Scheitel- oder Troglinien parallel zur Richtung des Schichtfallens. Im Bereich der Inflexionslinien ist die Abweichung der Richtungen maximal. Da die Faltenachsen im Modell I flächendeckend gleich sind, ist hieraus jedoch keine weitere Information zu gewinnen.

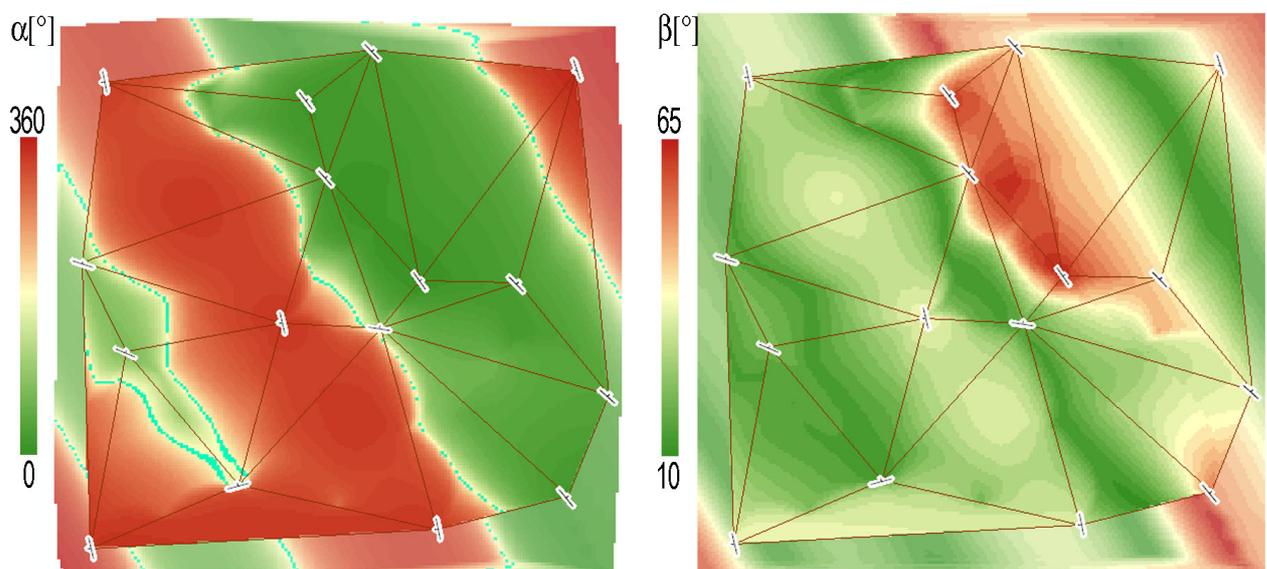


Abbildung 4.3 Ergebnisraaster der ersten Anwendung (auf Basis des korrigierten TIN) **a)** zwischen den Stützpunkten interpolierte Fallrichtung **b)** interpoliertes Schichtfallen. Blass im Hintergrund jeweils der tatsächliche Verlauf im Modell I

Eine weitere Möglichkeit, die Qualität der Berechnung zu testen, ist zu kontrollieren, ob das Schichtstreichen senkrecht zum getrennt berechneten Schichtfallen steht. Dies muss immer gewährleistet sein, da die Begriffe so definiert sind.

Dabei kann einfach der Richtungswert für den größten Gradienten im Schichtfallen (Werkzeug *Aspect*) von der Fallrichtung abgezogen werden. Das Ergebnis ist jedoch von vielerlei Störfaktoren gekennzeichnet. Da es sich um zyklische Daten handelt, kann das Bild durch Reklassifikation stark vereinfacht werden. Als Ergebnis sollen nur noch Werte von 0° (keine Abweichung) bis 90° (maximale Abweichung) auftreten. Bedarf für zusätzliche Probennahme besteht überall dort, wo größere Abweichungen zu beobachten sind (Abbildung 4.4.a). Deutlich zeichnen sich wieder die Inflexionslinien und die Trog- und Scheitellinien ab. Da bei sehr flachem Schichtfallen die Richtung

der Neigung nur gering in den tatsächlichen Fehler eingeht, kann eine Variation des Ergebnisrasters durch Multiplikation mit einem normierten Raster des Schichtfallens gerechnet werden. Die hier auftretenden Gebiete größerer Abweichung sind wichtige Probenahmepunkte (Abbildung 4.4.b).

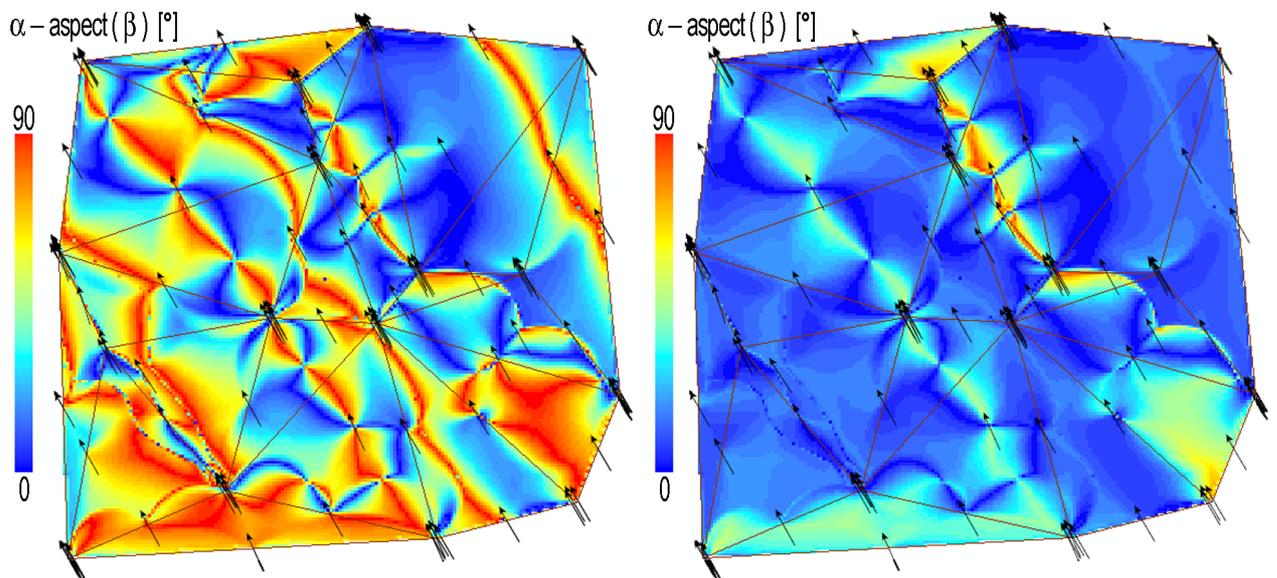


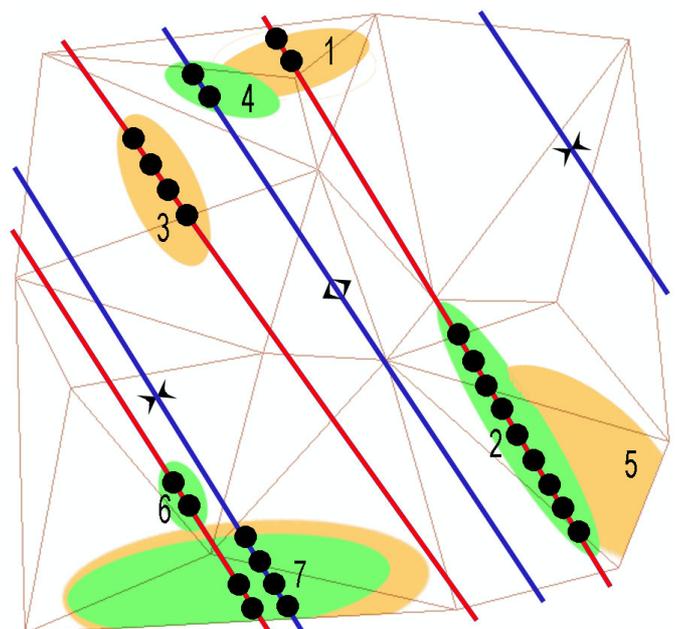
Abbildung 4.4 Orthogonalität von Streichen und Fallen a) Ungefiltert ist das Ergebnis selbst bei einfachen Falten kaum zu interpretieren b) Gefiltert durch Multiplikation mit einem, auf den Wertebereich [0;1], normierten Schichtfallen-Raster. Deutlich treten die Inflexionslinien zu Tage und größere Flächen fehlerhafter Interpolation

Abbildung 4.5 Interpretation der Ergebnisse: Aus dem Raster für das Schichtfallen lassen sich leicht die Inflexionslinien (rot, größte β -Werte) und die Sattel- und Muldenlinien (blau, kleinste β -Werte) extrahieren. Im Raster für die Fallrichtung liegen die Inflexionslinien in Bereichen kleinster Winkeländerungen und die Sattel- und Muldenlinien in den Bereichen größter Winkeländerungen. Die Inflexionslinien scheinen zudem im gefilterten Orthogonalitätsraster durch. Die grün eingefärbten Flächen entstammen den Ergebnisrastern für die Fallrichtung und das Schichtfallen, die Orangen dem Orthogonalitätsraster:

Die Bereiche 1), 3), 5) und 7) sind flächige Unregelmäßigkeiten im Orthogonalitätsraster.

Im Raster für die Fallrichtung liegen Unregelmäßigkeiten in den Bereichen 4), 6) und 7) vor, im Raster für das Schichtfallen hauptsächlich im Bereich 2), und zudem in den Bereichen 1) und 7).

Da die Probenahme um die Eigenschaftslinien einer Falte am aussagekräftigsten sind, kristallisieren sich durch Verschneidung dieser Linien mit den Problemflächen die Bereiche aus, die für eine Optimierung der Datenbasis zusätzlich beprobt werden müssen (Punkte).



Entsprechend der abgegrenzten Gebiete in Abbildung 4.5 scheint es besonders wichtig in 1), 2), 3), 4), 6) und 7) weitere Daten zu erheben. Eine genauere Planung der Probenahme ist im weiteren Verlauf stark durch die Erreichbarkeit der Geländeabschnitte und der Exposition von anstehendem Gestein abhängig. Auch spielt es eine große Rolle, wie sich die zusätzliche Datenerhebung in bestehende Planung integrieren lässt. Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Stützpunkte möglichst gleichverteilt liegen sollen, mit der Ausnahme der Bereiche um die Inflexionslinien. Hier sollten die Stützpunkte möglichst exakt die steilsten Schichtflächen repräsentieren, um diese, für die Faltengeometrie wichtigen, Bereiche so gut als möglich abzubilden

Ist die tatsächliche Geometrie der untersuchten Falten bekannt, kann der Fehler der Interpolationen berechnet werden. Dieser ergibt sich aus der absoluten Winkelabweichung der Normalen zu den berechneten Schichtflächen und der Modellpunkte. Mit dem Werkzeug *Winkelfehler* kann dieser Fehler Ω aus den Werten für die zu überprüfenden Schichten (α, β) und dem Modell (α, β) bestimmt werden.

Mit den errechneten Ergebnisrastern kann auch die Effektivität der verschiedenen, angewandten Korrekturen untersucht werden. Da gibt es zum Beispiel die Geländehöhenkorrektur im Werkzeug *PostCalculation*. Ein Vergleich des Winkelfehlers des unkorrigierten β und dem des Korrigierten zeigt nur geringen Einfluss (Abbildung 4.6.b,c). Wie die Verteilung der Werte (Maximum und Form der einseitigen Gleichverteilung) zeigt, bilden die korrigierten Werte das Modell geringfügig besser ab.

Einen wesentlich größeren Einfluss hat die Korrektur der ursprünglichen Dreiecksvermaschung in der Anwendung des Werkzeugs *InnerGrowth*. Während die Besprechung der Ergebnisse bislang auf den korrigierten TIN-Kanten basierte, zeigt die Berechnung des Winkelfehlers für die unkorrigierte Vermaschung deutlich schlechtere Werte (Abbildung 4.6.a).

Eine Korrektur der TIN-Kanten sollte in Hinblick auf die Qualität der Ergebnisse auf jeden Fall erfolgen. Bei größeren Datenmengen steigt jedoch die Anzahl der Kanten zwischen den Punkten progressiv an, so dass höchstens ein Bruchteil korrigiert werden kann. Dies gilt vor allem für die Bearbeitung im Gelände, wo erfahrungsgemäß kaum Zeit für eine vernünftige Datenaufbereitung bleibt.

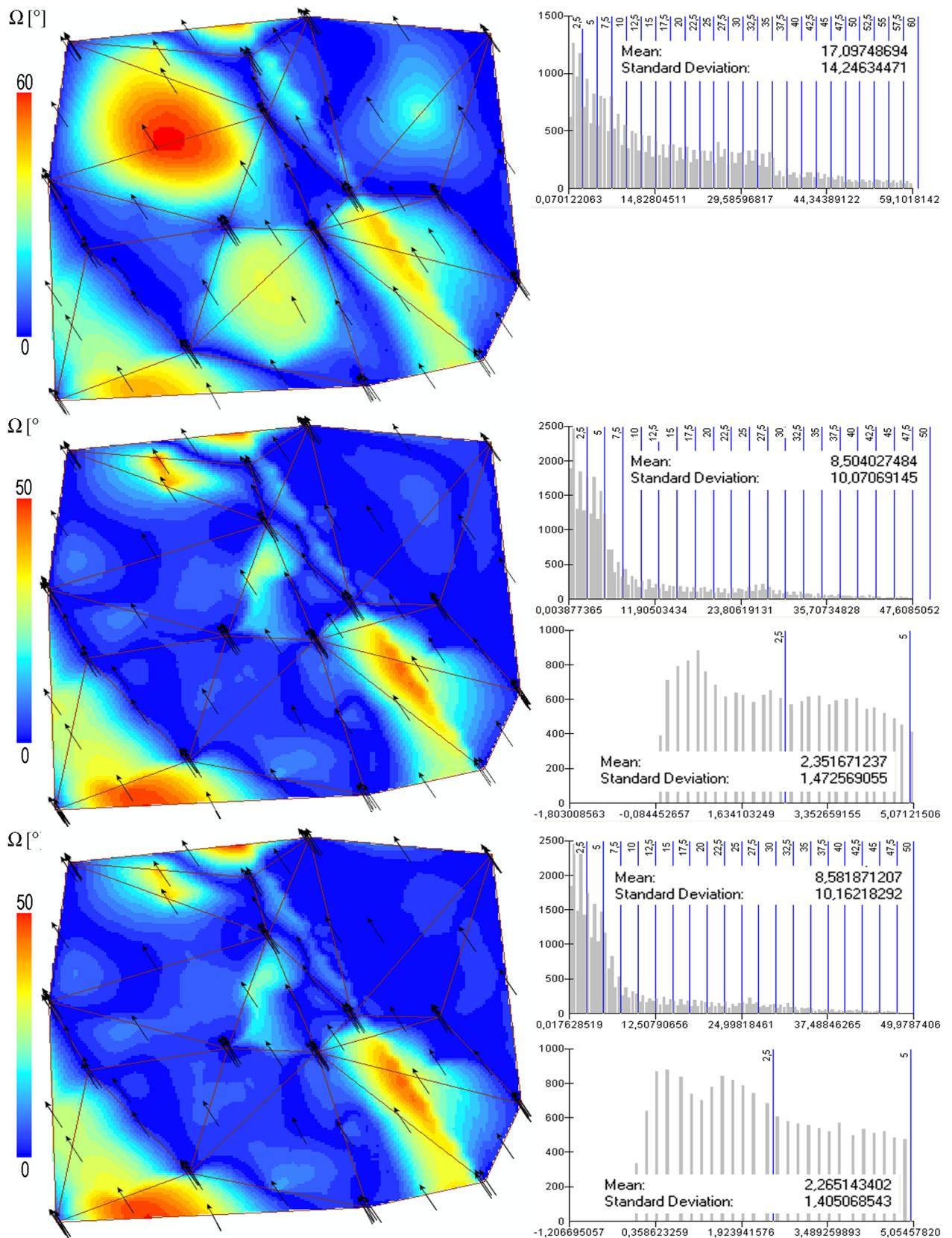


Abbildung 4.6 Winkelabweichung der Berechnung: Da es sich um unsymmetrische Verteilungen handelt, ist bei der Bewertung der Wert des *mean* im Gesamtzusammenhang zu betrachten a) Winkelfehler ohne TIN-Korrektur mit einem Maximum der Verteilung bei etwa 2,5° b) Winkelfehler der TIN-korrigierten Raster ohne Geländehöhenkorrektur im Werkzeug OuterGrowth mit einem Maximum der Verteilung bei etwa 1,3° c) Winkelfehler der Berechnungen mit beiden Korrekturen und einem Maximum der Verteilung bei etwa 1,2°. Durch Randeffekte bei der Geländehöhenkorrektur fällt der mean-Wert insgesamt schlechter aus.

Trotz der relativ geringen Stützpunktzahl (durchschnittlich acht Punkte für die Geometrie einer jeden Falte, jeweils zwei für die verschiedenen Bereiche), bildet die Interpolation die Modellrealität schon sehr gut ab. Hohe Werte im Ω -Raster der korrigierten Berechnungen zeigen sehr gute Übereinstimmung mit den fehlerhaften Bereichen aus der Interpretation der Ergebnisse (Abbildung 4.5)!

Obwohl die Falten sehr einfach gebaut sind und ein geübter Geologe schon während der Geländearbeit sehr schnell eine generelle Interpretation liefern könnte, bieten doch die Darstellung der primären Faltenachsen und die Hilfestellung bei der Suche nach der Spur der Inflexionslinien und der Trog- und Schulterlinien eine genauere Planungsgrundlage für eine mögliche weitere Datennahme in diesem Gebiet.

Noch gar nicht berücksichtigt in den Berechnungen sind Daten zur Gesteins- oder Schichtzugehörigkeit. Diese können in einer weiteren Anwendung eingebracht werden. Mit den Werkzeugen *SE/delta_dAM_composit*, *Summenraster*, *ConvexHull*, *OuterGrowth(b)* und *Schichtflächen(a)* wird unter Eingabe der berechneten Daten aus der ersten Anwendung eine Idealfäche modelliert, die der dreidimensionalen Spur einer bestimmten Schichtfläche entsprechen soll. Die Eingangsdaten entstammen den korrigierten Berechnungen (sowohl TIN-korrigiert, als auch Geländehöhen-korrigiert).

Das Werkzeug *SE/delta_dAM_composit* benötigt als Eingabe das Feature-Dataset der Ausgabe des Werkzeugs *ConCalculation*, die berechneten Raster für die Fallrichtung und das Schichtfallen aus dem Werkzeug *PostCalculation* und mehrere Angaben zur gewünschten Zellgröße (positive, negative und diagonale Zellgröße (cellsize 45°/135°)). Ausgegeben werden vier Raster-Datensätze. Sie zeigen in vier Himmelsrichtungen den Unterschied der Schichtzugehörigkeit benachbarter Rasterzellen. Unter Wahl eines strategisch günstigen Punktes werden diese im Werkzeug *Summenraster* zu einem Raster zusammengefügt. An jeder Zelle liegt dann Information über die Mächtigkeit der Gesteine zwischen dieser und dem gewählten Mittelpunkt vor. Der Punkt soll zwei Voraussetzungen erfüllen. Zum Ersten soll er möglichst mittig im Untersuchungsgelände liegen, da der Lagefehler im Ausgaberraster mit Abstand vom gewählten Punkt ansteigt. Zum Zweiten soll es möglichst viele andere Punkte gleicher Schichtzugehörigkeit (Ausbisslinien einer bestimmten Schichtgrenze oder eines bestimmten Markerhorizonts) zur weiteren Korrektur geben.

Das Werkzeug *Summenraster* benötigt in der Eingabe neben den vier oben berechneten Rastern und dem X- und Y-Wert des gewählten Mittelpunktes einen richtungs-

weisenden Datensatz. Dieses *flowDirection* Raster soll unter Angabe der acht vorgegebenen Himmelsrichtungen den Weg möglichst radialstrahlig beschreiben. Im ausgegebenen Summenraster sollte an allen Punkten der gleichen Schichtzugehörigkeit eine Nullstelle erreicht werden, da die Mächtigkeit der Gesteine zwischen diesen Punkten Null ist. Dies wird aus Gründen ungenügender Datendichte und Fehlern bei der Modellwahl und Modellberechnung jedoch nie der Fall sein. Um diese Abweichungen zu korrigieren gibt es zwei mögliche Ansätze.

Das Summenraster kann für jeden bekannten Punkt einer Schichtfläche extra gerechnet werden. Aus allen gewonnenen Datensätzen wird dann durch Mittelwertbildung (*Cell Statistics* im Modul *Spatial Analyst*) ein Mischraster gebildet. Dadurch verläuft die Fläche aber nicht mehr durch die Stützpunkte! Zudem ist diese Methode durch mehrmaliges Aufrufen der Berechnungsprogramme sehr zeitintensiv. Für jeden Bestimmungspunkt ist ein Aufschlag von 20 Prozent an Rechenzeit zu kalkulieren.

In einem anderen Ansatz wird nur ein Summenraster berechnet. Umso wichtiger ist eine zentrale Stellung des gewählten Ursprungspunktes. Nun werden die X- und Y-Koordinaten aller, zur Korrektur heranzuziehenden, Punkte und die Wert des Summenrasters an ihrer Stelle in einem neuen Datensatz gesammelt. Innerhalb der Punktwolke, die diese aufspannen, kann ein Korrekturraster einfach durch Interpolation berechnet werden. Liegen die Punkte jedoch nicht am Rand des Untersuchungsgebietes, so kann nur ein Bruchteil der Fläche korrigiert werden. Mit dem Werkzeug *ConvexHull* wird deswegen zunächst aus dem neuen Datensatz (Attribute X, Y und Z als Wert des Summenrasters) ein, die Punktwolke umhüllendes, Polygon gebildet und Punktpaare auf dessen Kanten bestimmt. Der Datensatz für die Eckdaten muss aus programmtechnischen Gründen ‚SF_convexHull‘ heißen! Anschließend können daraus mit dem Werkzeug *Outer Growth(b)* zusätzliche, außenliegende Stützpunkte bestimmt werden. Die Interpolation aller ergibt ein gebietsübergreifendes Korrekturraster (Abbildung 4.7).

Dieses Werkzeug benötigt zur Eingabe den oben berechneten Datensatz (SF_convexHull), die für die Korrektur erstellten Basisdaten (SF_Daten), das oben ausgegebene Polygon, die gewünschte Zellgröße und das Summenraster aus dem Werkzeug *Summenraster*. Ausgegeben werden das Korrekturraster und ein korrigiertes Summenraster.

Das Korrekturraster zeigt Bereiche größeren Fehlverhaltens im unkorrigierten Summenraster. Rückschlüsse auf die zu Grunde liegenden fehlerhaften α - und β -Raster sind allerdings nur schwer zu treffen.

Abbildung 4.7 Schichtgleichenkorrektur: Die Stützpunkte gleicher Schichtzugehörigkeit (Punkte) spannen ein Korrekturraster auf. Innerhalb des transparenten Polygons wird zwischen den Werten interpoliert, außerhalb findet ein Export der Mittelwerte der randlichen Stützpunkte statt.

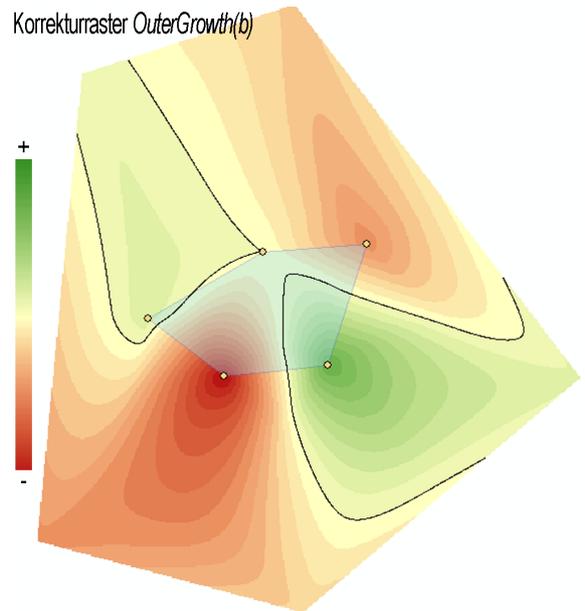
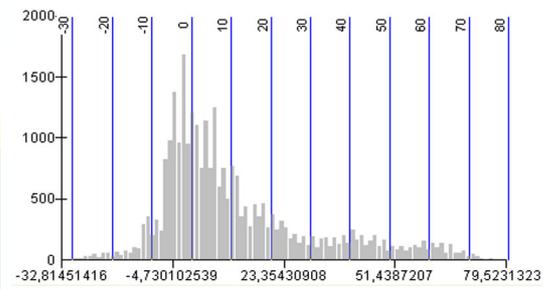
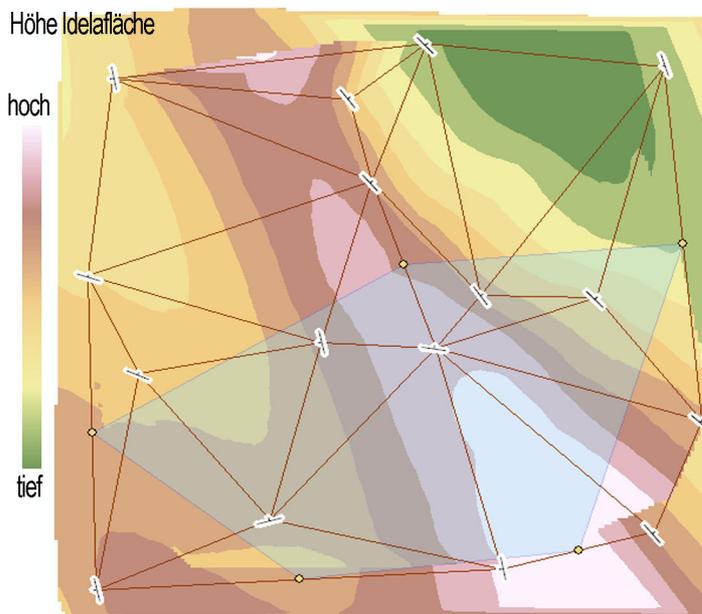
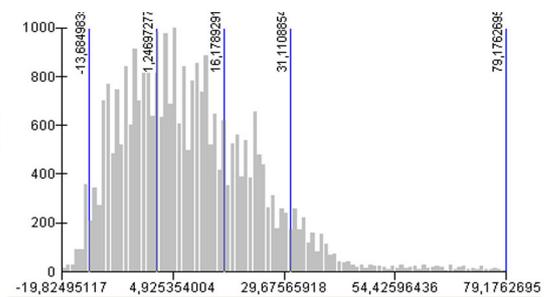
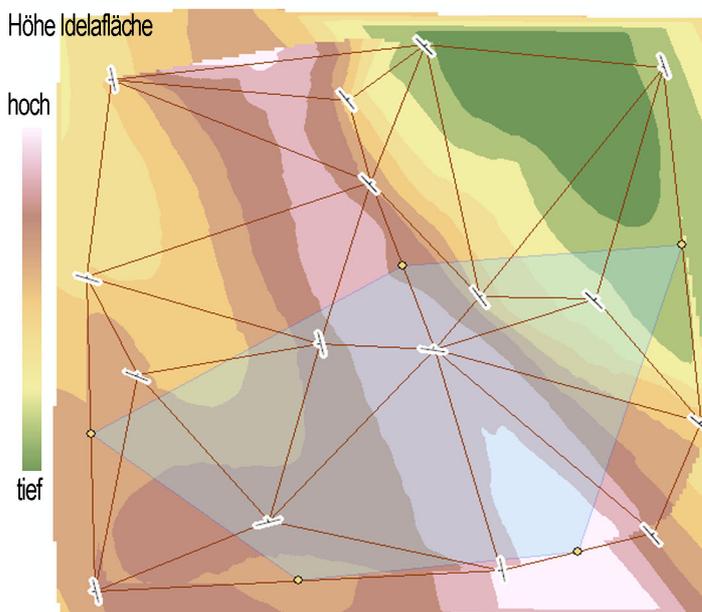


Abbildung 4.8 Dargestellt sind die berechneten Idealflächen vor dem Hintergrund der realen Oberfläche des Model I, die Stützpunkte der Korrektur und das durch sie aufgespannte Polygon der Convex Hull. Die Statistiken zeigen die Abweichung der Idealfäche von der Modellfläche und somit ihre Passform.

a) Idealfäche aus einem Summenraster, bestimmt durch Mittelwertbildung fünf einzelner Summenraster (je eines für jeden Korrekturpunkt). **b)** Idealfäche, berechnet aus einem Summenraster, bestimmt durch nebenstehende Schichtgleichenkorrektur. Die Statistik liegt deutlich besser.



Mean: 11,22919929
Standard Deviation: 19,36820954



Mean: 8,712950944
Standard Deviation: 14,93195634

Das korrigierte Summenraster wird abschließend mit dem Werkzeug *Schichtflächen(a)* in die gesuchte Idealfäche umgewandelt, die alle Korrekturpunkte beinhaltet. Zur Berechnung dieser Schichtfläche und eines Punkt-Shapefiles für eine weitere Anwendung müssen die Raster für die Fallrichtung und das Schichtfallen, das korrigierte Summenraster, die gewünschte Zellgröße der Ausgabe und die Daten zur Korrektur der Geländehöhen angegeben werden.

Da die Raumlage der modellierten Schichtfläche aus dem Modell bekannt ist, können die beiden Korrekturmethode verglichen werden. Die Statistik der Differenz der berechneten Idealfäche zur Modell-Schichtfläche zeigt bessere Kennwerte, jedoch eine weniger ausgeprägte Höhe der Verteilung (Abbildung 4.8).

Im Programm *ArcScene* von ESRI können die modellierten Flächen dreidimensional dargestellt werden. So lässt sich die Passform der bestimmten Form optisch überprüfen. Auch hier liegt die Methode II besser im Trend (Abbildung 4.9). Diese dreidimensionale Darstellung ist bei komplizierter Geologie sicher auch eine gute Interpretationshilfe.

Als zusätzliche Korrektur der Schichtflächenlage kann die Mächtigkeit der Gesteine in die Berechnung des Summenrasters einfließen. Hierzu sind mehrere Summenraster verschiedener Grenzflächen notwendig. Deren Differenz beinhaltet die dazwischenliegende Gesteinsmächtigkeit. Diese sollte im lokalen Bereich etwa stabil sein, erst regional können leichte Veränderungen auftreten, wie etwa das Auskeilen einer Schicht. Vorsicht ist jedoch geboten in engen Faltenscharnieren, da dort die Mächtigkeit inkompetenter Schichten stark zunehmen kann, wofür sie entlang der Schenkel wieder abnimmt. Eine Glättung der Werte für die Mächtigkeiten und das Zurückspielen der so gewonnenen Zusatzinformation bindet die beteiligten Grenzflächen des Gesteinskomplexes stärker aneinander. Daten fremder Schichtflächen können so in die Modellierung einer bestimmten Grenzfläche mit einfließen.

Auch zur Interpretation des Bewegungssinns und der Schubweite von Störungen kann eine solche dreidimensionale Darstellung hilfreich sein. Kann beiderseits der Bruchlinie die Form der Gesteine modelliert werden, so lassen sich die gesuchten Werte eventuell geometrisch bestimmen.

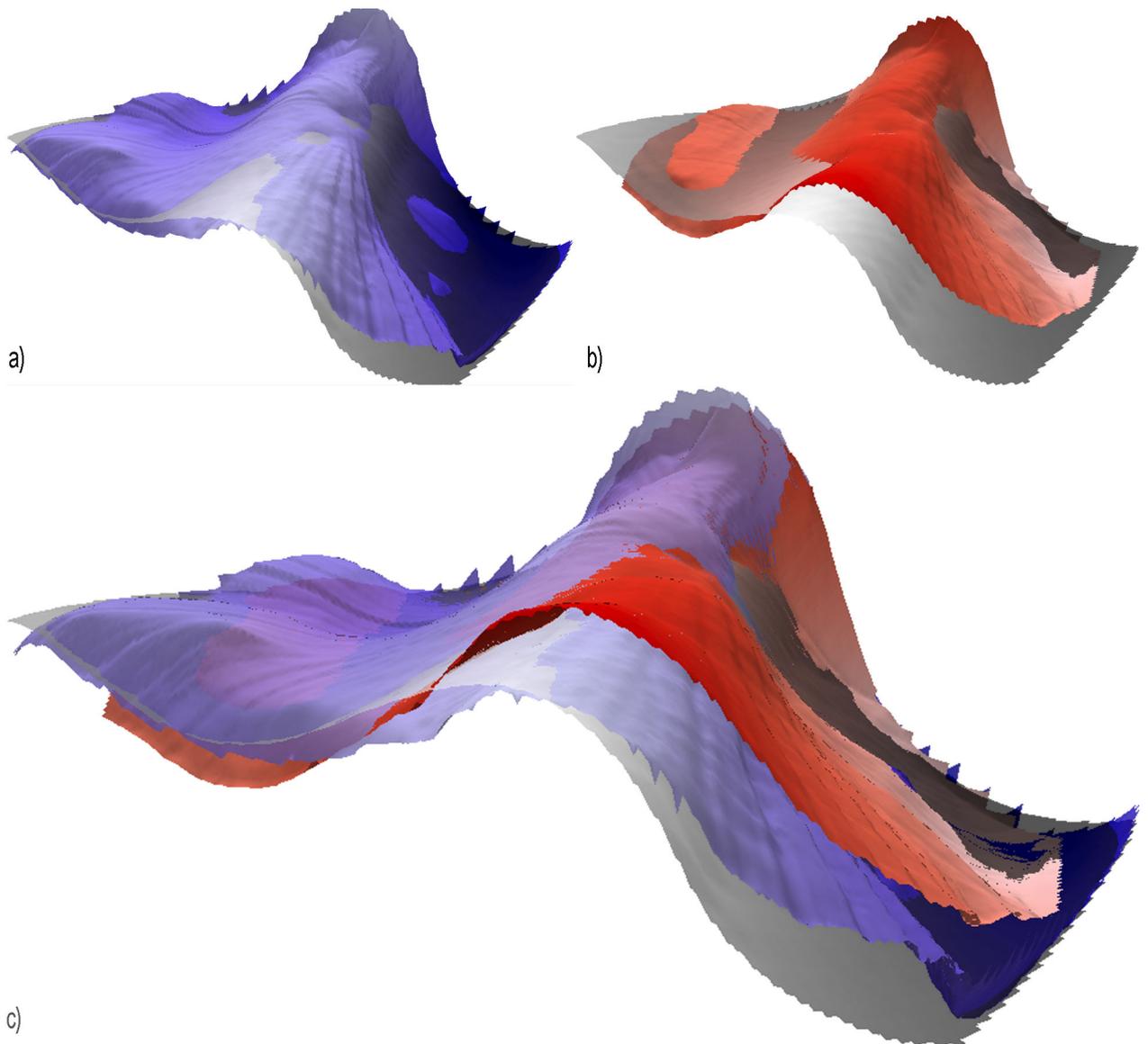


Abbildung 4.9 3D – Darstellung der Idealfächen im Vergleich mit der Modellfläche (schwarz) **a)** Idealfäche aus dem Summenraster, korrigiert durch die Schichtgleichenkorrektur **b)** Idealfäche aus den gemittelten Summenrastern der fünf Korrekturpunkte **c)** Zusammenschau der beiden Berechnungen: In der, im Bild rechten, Synklinale kommt die blaue Fläche zwischen der roten und der schwarzen zu liegen. Auch in der linken Mulde liegt die blaue Fläche näher an der Referenz. Im Verlauf entlang der mittleren Antiklinale allerdings schneidet die rote Fläche besser ab. Rein optisch bildet die blaue Idealfäche die Geometrie des Modells I besser ab.

Mit einer dritten Anwendung kann die modellierte Schichtfläche wieder auf die Geländeoberfläche projiziert werden. Dies ist vor allem wichtig, um die Geometrie der, durch die Schichtgleichenkorrektur angepassten, Idealfäche an den Stellen der real existierende Oberfläche abzubilden, damit sie zur weiteren Planung der Geländearbeit herangezogen werden kann. Ebenso kann die Idealfäche auf einen beliebigen, nicht-vertikalen, Geländeschnitt projiziert werden, um die Raumlage der verschiedenen, Faltengeometrie beschreibenden, Achsenebenen zu untersuchen.

Hierzu wird mit dem Werkzeug *Projection* eine erste Näherung der Abbildung der α - und β -Raster an die Geländeoberfläche berechnet. Eingang finden die Idealfäche, das Punktshape der Idealfäche, die Geländeoberfläche oder eine andere, beliebige Projektionsfläche und die gewünschte Zellgröße. Daraus wird ein neues Punktshape gerechnet. Dieses ist im folgenden, iterativen Prozess jeweils die neue Eingangsdatenbasis (neben der Geländeoberfläche und der Zellgröße). Berechnet wird jedes Mal ein weiteres Punktshape. Nach wenigen Durchgängen stabilisiert sich die Abweichung des berechneten Punktes von der Geländeoberfläche und die Anwendung hat ihr Ziel erreicht. Das Punktshape enthält die Koordinaten des Neubestimmten Punktes und die α - und β -Werte der dargestellten Schichtfläche

Ebenso wie bei der Validierung der Ergebnistraster der ersten Anwendung kann mit dem Werkzeug *Winkelfehler* der absolute Fehler der projizierten Idealfäche bestimmt werden (Abbildung 4.10).

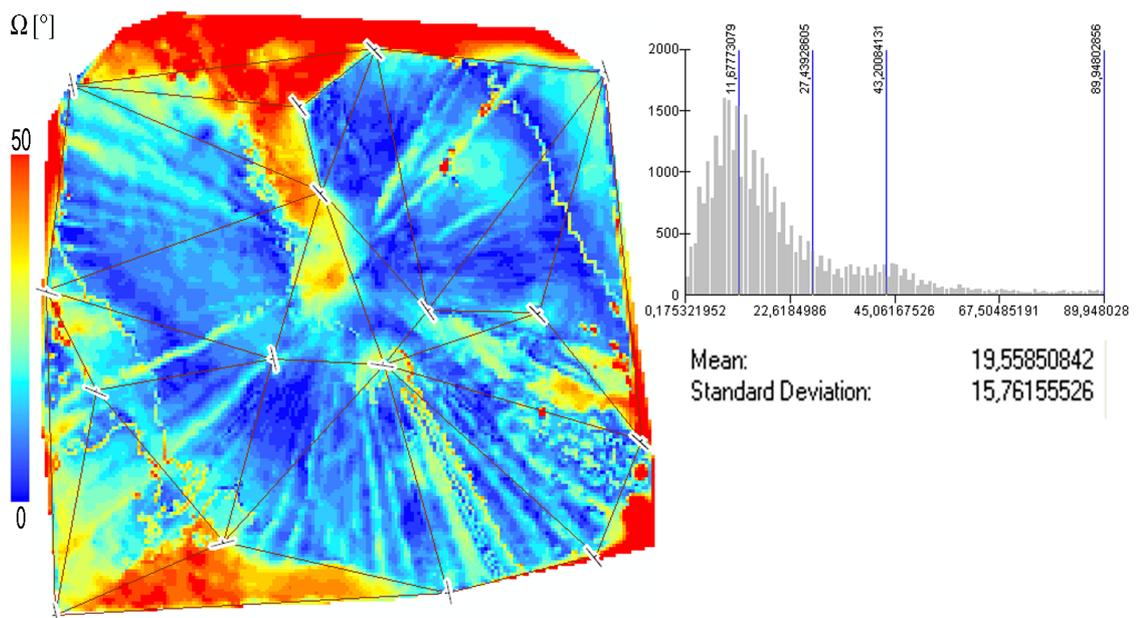
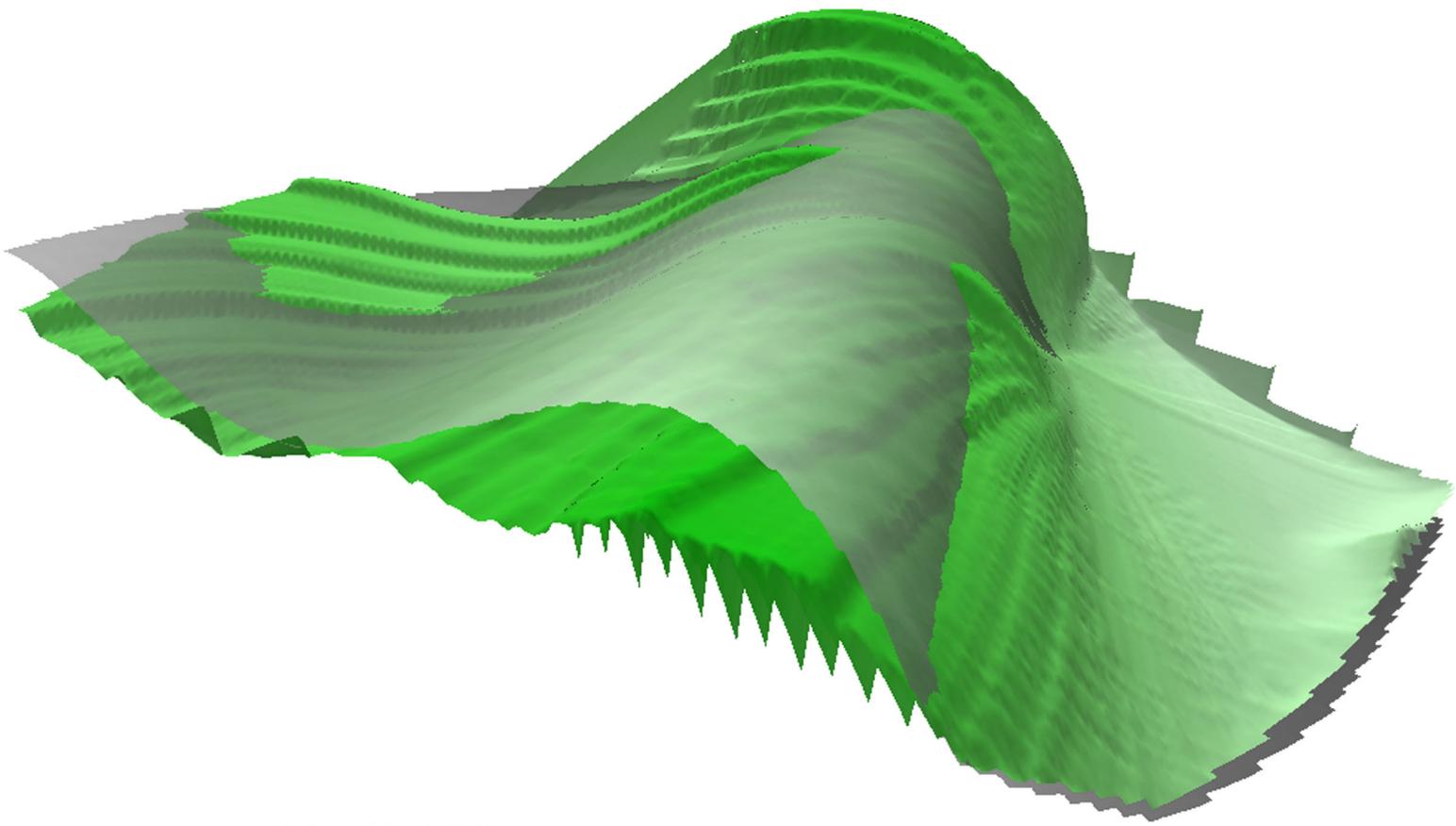


Abbildung 4.10 Winkelabweichung nach der Projektion. Deutlich sieht man die Spuren fehlerbehafteter Werte des Differenzrasters in der radialstrahligen Summation.

Da die modellierte Fläche, vor allem wegen der radialstrahligen Summation der fehlerbehafteten Differenzraster, ein sehr unruhiges Bild abgibt, kann sie für eine bessere Passform geglättet werden. Dabei ist es ratsam die modellierte Schichtfläche bereits vor der iterativen Projektion auf die Geländeoberfläche zu glätten. Ein gutes Ergebnis erhält man im Beispiel des Modell_I durch Mittelwertbildung (Werkzeug *Focal_Statistics* des Moduls *Spatial_Analyst*) mit einem quadratischem Kernel der Größe 20 Pixel.



4.2 Modell II

Das Modell II entspricht in Form und Geometrie der dargestellten Falte des Modell I. Während jedoch im ersten Modell die Stützpunkte alle auf einer Schichtfläche lagen, gehören sie im Modell II einer subhorizontalen, ebenen Fläche an, die die gefaltete Fläche in mehreren Bereichen schneidet. Diese Schnittlinien stellen die Ausbisslinien der gesuchten Schichtfläche dar.

Der Aufbau des Modell II entspricht der Arbeitsrealität, werden die Daten in flachen Bereichen erhoben. Während es in wenig exponierten Gebieten meist schwierig ist die Raumlage der anstehenden Gesteine zu erfassen und somit vollwertige Stützpunkte zu erhalten (wenn überhaupt fester Fels an die Oberfläche ragt), sind die Ausbisslinien markanter Leithorizonte nur selten in ungenügender Qualität zu erheben. Trotzdem sollen bei der Bearbeitung des Modell II analog zum ersten Modell nur fünf Korrekturpunkte für die Schichtflächengleichen (Werkzeuge *ConvexHull* und *OuterGrowth(b)*) in die Berechnung Eingang finden. Sie werden so gewählt, dass sie möglichst in Nähe der Korrekturpunkte des ersten Modells fallen. Auch die 16 Ausgangsstützpunkte besitzen – abgesehen von der Höhe – dieselben Raumkoordinaten, um eine bessere Vergleichbarkeit zu den Berechnungen des ersten Modells zu erreichen. Aus diesem Grund wird auch das Ausgabe-TIN des Werkzeugs *InnerGrowth* in gleicher Weise korrigiert, wie es im Kapitel 4.1 beschrieben ist.

Da die Stützpunkte alle auf einer Ebene liegen ist eine Geländehöhenkorrektur nicht notwendig!

Die Berechnung der Ausgangsdaten für das Modell II erfolgt durch Projektion der Rohdaten des ersten Modells mit den Werkzeugen *Projection* und *ProjectionIteration* auf eine subhorizontale Ebene. Anschließende Interpolation der gewonnenen, sehr dicht liegenden, Daten erfolgt problemlos mit der Direction Cosine Methode [deKemp 2000].

In der ersten Anwendung werden unter Eingabe der Stützpunktdaten mit den Werkzeugen *InnerGrowth*, *InnerGrowth_II*, *ConCalculation* und *PostCalculation* interpolierte Raster für die α - und β -Werte erstellt. Auf dem Weg dorthin kann nach dem Werkzeug *InnerGrowth* in den *tinEdgeData* eine Korrektur der Dreiecksvermaschung vorgenommen werden, indem die Eckpunkte von ungewünschten Kantenverläufen (FID_tinEdge) von Hand neubesetzt werden. Dies kann bei größeren Datensätzen enorm zeitaufwändig werden, eine grobe Korrektur ist aber auf jeden Fall empfehlenswert. Dabei sollen die Kanten der Dreiecksvermaschung möglichst parallel der synthetisch berechneten Faltenachsen verlaufen. Diese Korrektur hat erheblichen Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses. Mit ihr wird sichergestellt, dass die verschiedenen Korrelationslängen der Raumrichtungen der Daten – entsprechend der Anisotropie im Kriging-Verfahren – in die Berechnung mit einfließen. Im Modell II wird bei der TIN-Korrektur entsprechend dem Modell I verfahren.

Eine erste Hilfe bei der Interpretation der Ausgaberraster für die Fallrichtung und das Schichtfallen ist wieder die Darstellung der errechneten Faltenachsen aus den MA-Daten (Werkzeug *ConCalculation*). Durch die Parallelität der Faltenachsen ist sofort erkenntlich, dass es sich um eine einfache zylindrische Falte handelt. Das subeinheitliche Fallen der Achsen um 10° zeigt zudem, dass die Falte leicht nach Nordwesten eintaucht. Im Vergleich zu dem klaren Ergebnis aus dem Modell I (Abbildung 4.2) zeigt sich ein unruhigeres Bild (Abbildung 4.11.c). Das liegt an Fehlern bei der Bestimmung der projizierten Stützpunktdaten aus den Rohdaten des ersten Modells. Da in der Natur aber die Schichtflächen nie korrekt eine mathematischen Funktion nachbilden und zudem bei der Datennahme Messfehler nicht zu unterbinden sind, entspricht die Darstellung etwa der einer realen Situation.

Die Linien gleichen Schichtfallens sollten etwa subparallel der Faltenachsen liegen. Dies gilt auch für die besonderen Elemente einer Falte, wie die Spur der Faltenachsebene, die Inflexionslinien und die Mulden- und Sattellinien (crestlines). Weitestgehend ent-

spricht die Interpretation der Ergebnisse der des Modell I. Wiederum lassen sich so die Bereiche weiterer wichtiger Datenerhebung bestimmen (Abbildung 4.11.d).

Wichtig ist vor allem wieder das verstärkte Bemühen Stützpunkte in den steilsten Bereichen der Falte (Inflexionslinien) zu erhalten. Weiterhin wichtig sind die Bereiche um die Mulden- und Sattellinien, da hier die Krümmung der Falten am stärksten ist und eine höhere Datendichte hier eine bessere Abbildung der Faltengeometrien erlaubt.

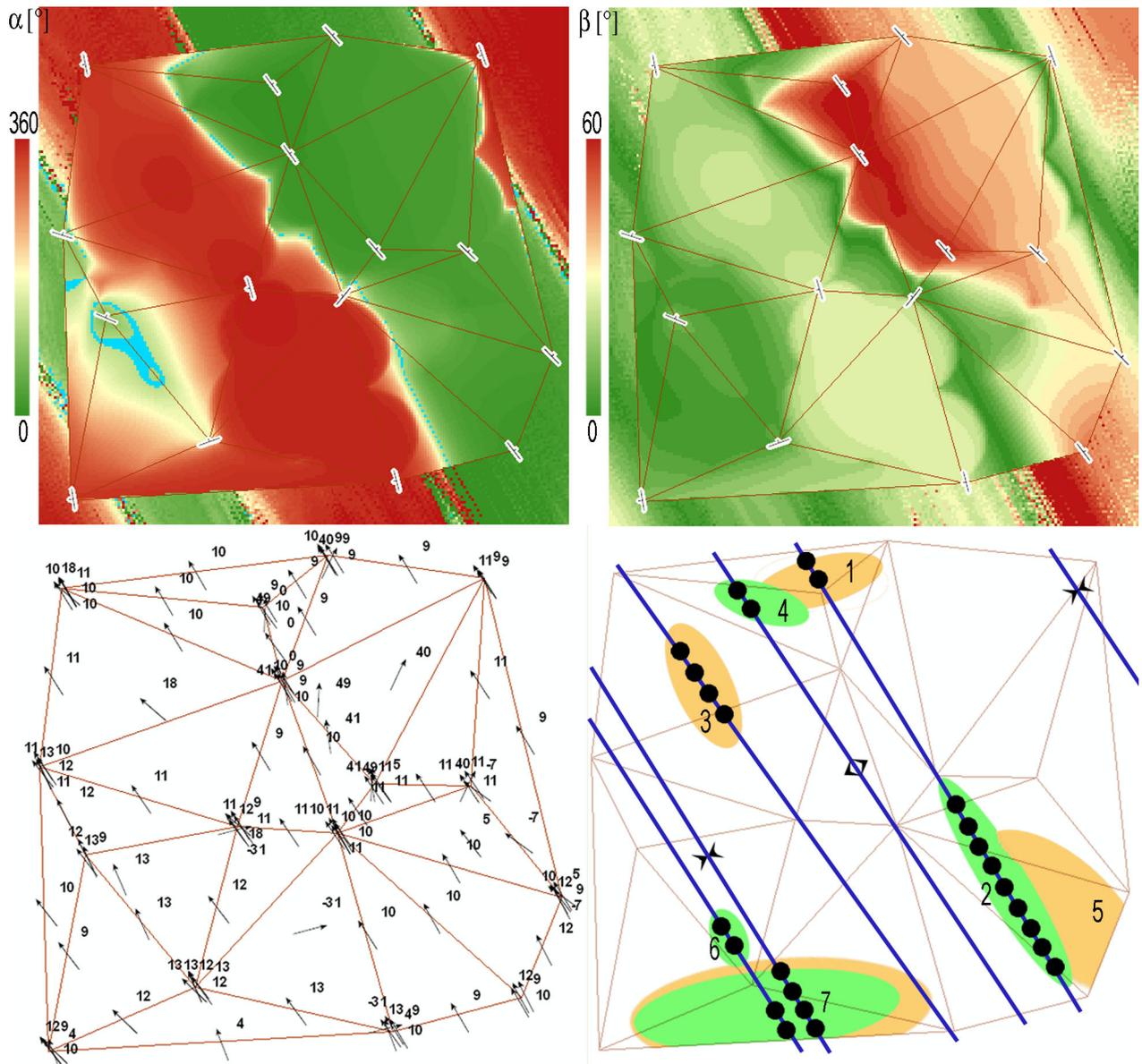
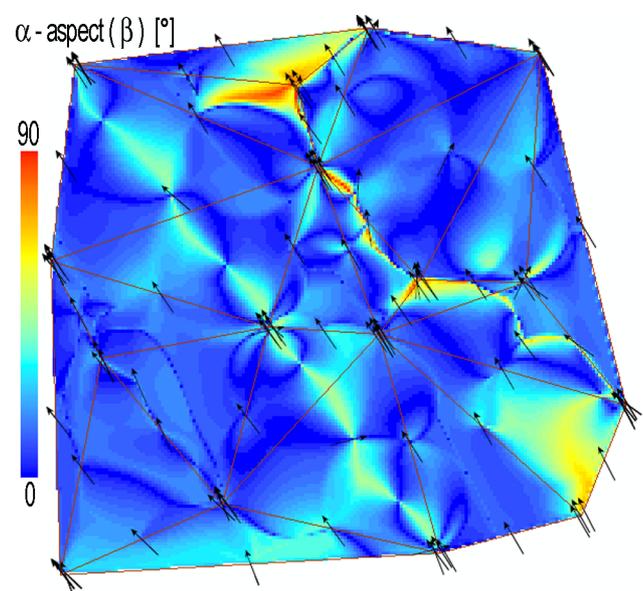


Abbildung 4.11 Anwendung I. a) Ergebnisraster der Fallrichtung (im Hintergrund die Modellrealität). b) Ergebnisraster des Schichtfallens (im Hintergrund die Modellrealität). c) Darstellung der synthetisch bestimmten Faltenachsen. d) Die Interpretation der Ergebnisse entspricht weitestgehend der des ersten Modells (Abbildung 4.5).

Ein weiteres interessantes Hilfsmittel ist die Darstellung der Orthogonalität von Schichtstreichen und Schichtfallen. Diese ist per Definition beider Begriffe an jedem Ort zwingend. Da beide Werte aber getrennt berechnet und interpoliert werden, gibt es Abweichungen, die wiederum Bereiche mangelnder Datendichte (oder fehlerhafter Stützpunkte) anzeigen.

Auch hier pausen sich wieder die besonders sensiblen Bereiche der stärksten Krümmung und der Kurvaturumkehr in der Geometrie der Falten durch. Normiert man die Orthogonalität abhängig vom Wert des Schichtfallens (Wertebereich $[0;1]$), so erhält man eine Darstellung der Wichtigkeit der Fehlbeiträge (Abbildung 4.12).

Abbildung 4.12 Orthogonalität von Streichen und Fallen, gefiltert durch Multiplikation mit einem normierten Raster des Schichtfallens. Das Ergebnis entspricht in den Grundzügen dem des Modell I.



Eine Fehlerberechnung der interpolierten Raster für die α - und β -Werte mit dem Werkzeug *Winkelfehler* zeigt Abweichungen von der Realität an etwa den vorhergesagten Bereichen (Abbildung 4.13). Das große zusammenhängende Gebiet der Fehlerberechnung in der Mitte, liegt vor allem an einer sehr engen – fast schon geknickten – Geometrie der Falte an dieser Stelle. Dies rührt daher, da die Ebene der Stützpunkte an dieser Stelle sehr nah dem Faltenkern kommt, an dem die Krümmung maximal ist. Die Methode der Busk-Modellierung legt zwischen die Stützpunkte eine ebenmäßige Krümmung und kann diesen Knick daher nur abbilden, wenn die Daten in diesem Bereich recht dicht vorliegen. Die Statistik der Winkelfehler zeigt trotzdem eine sehr schöne, enge (einseitige) Gauß-Verteilung, die eine hohe Qualität der Interpolationen bestätigt.

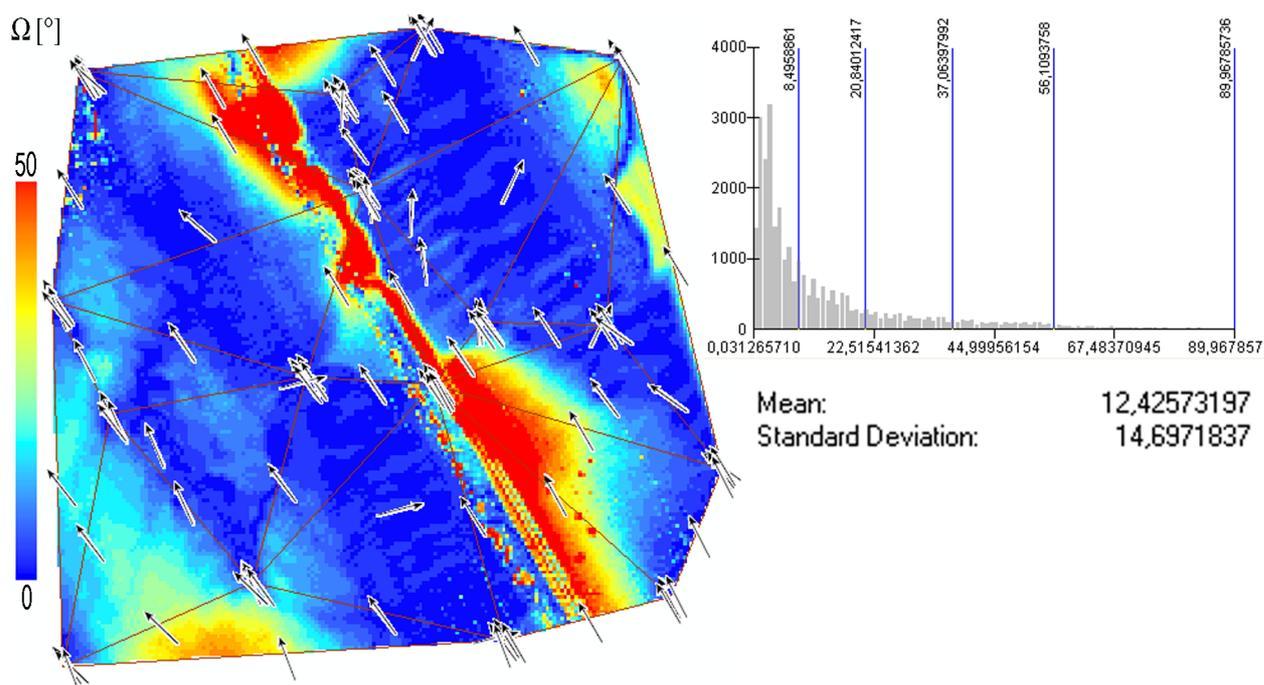


Abbildung 4.13 Validierung der Berechnung

Für eine genauere Interpretation der Daten ist es unerlässlich eine Schichtfläche der Falte als Repräsentant der Faltengeometrie darzustellen. Dies kann mit den Werkzeugen der zweiten Anwendung erfolgen.

Durch Eingabe der Verortung der Stützpunkte, der Rasterdaten für die Fallrichtung und das Schichtfallen, einem vorgefertigten *flowDirection*-Raster, einer möglichen Korrekturoberfläche und der Koordinaten eines beliebigen Punktes, kann mit den Werkzeugen *SE/delta_dAM_composit*, *Summenraster* und *Schichtflächen(a)* die Geometrie einer Schichtfläche innerhalb der Falte berechnet werden. Diese beinhaltet den beliebig gewählten Punkt.

Sind mehrere Orte gleicher Schichtzugehörigkeit bekannt, so können diese als Korrektur in die Berechnung mit einfließen. Hierzu wird mit den Werkzeugen *ConvexHull* und *OuterGrowth* das Ausgaberraster des Werkzeugs *Summenraster* entsprechend der neuen Daten angepasst.

Der Vergleich des Summenrasters mit der Ausbisslinie der darzustellenden Schichtfläche (Verschneidung der Geländeoberfläche von Modell II mit der Geometrie des Modell I), zeigt relative Übereinstimmung des Verlaufs des Nulldurchgangs (Abb. 4.14.a). Dies bedeutet, dass die berechnete Geometrie der gewählten Schichtfläche (beliebiger Punkt, in diesem Fall Element einer der Ausbisslinien) relativ gut dem Modell entspricht.

Durch Heranziehen weiterer Punkte der Ausbisslinien ist eine Korrektur der Abweichungen möglich (Abbildung 4.14.b). Um eine Vergleichbarkeit mit dem Modell I zu erhalten, werden nur vier Korrekturpunkte gewählt, an ähnlicher Stelle wie im Modell I.

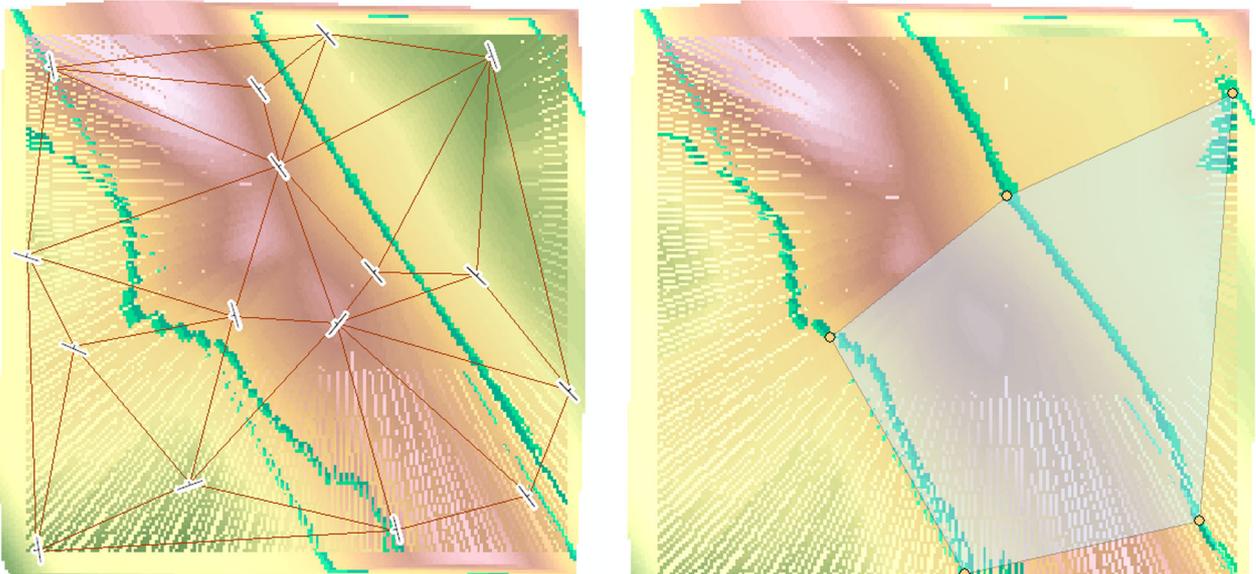


Abbildung 4.14 Schichtgleichenkorrektur. Dargestellt sind das berechnete Summenraster und im Hintergrund der Sollwert **a**) Im unkorrigierten Raster weichen die Ausbisslinien (cyan) noch deutlich voneinander ab **b**) Durch Korrektur mit fünf Stützpunkten (gelb) können sie schon stark angenähert werden.

Der Vergleich der berechneten Geometrie der Schichtfläche (Idealfäche: auch abgebildet als 3D-Darstellung am Anfang des Kapitels) mit dem Original des Modell I zeigt eine gute Übereinstimmung (Abbildung 4.15). Dies bestätigt auch die Statistik der Differenz der beiden Höhenraster.

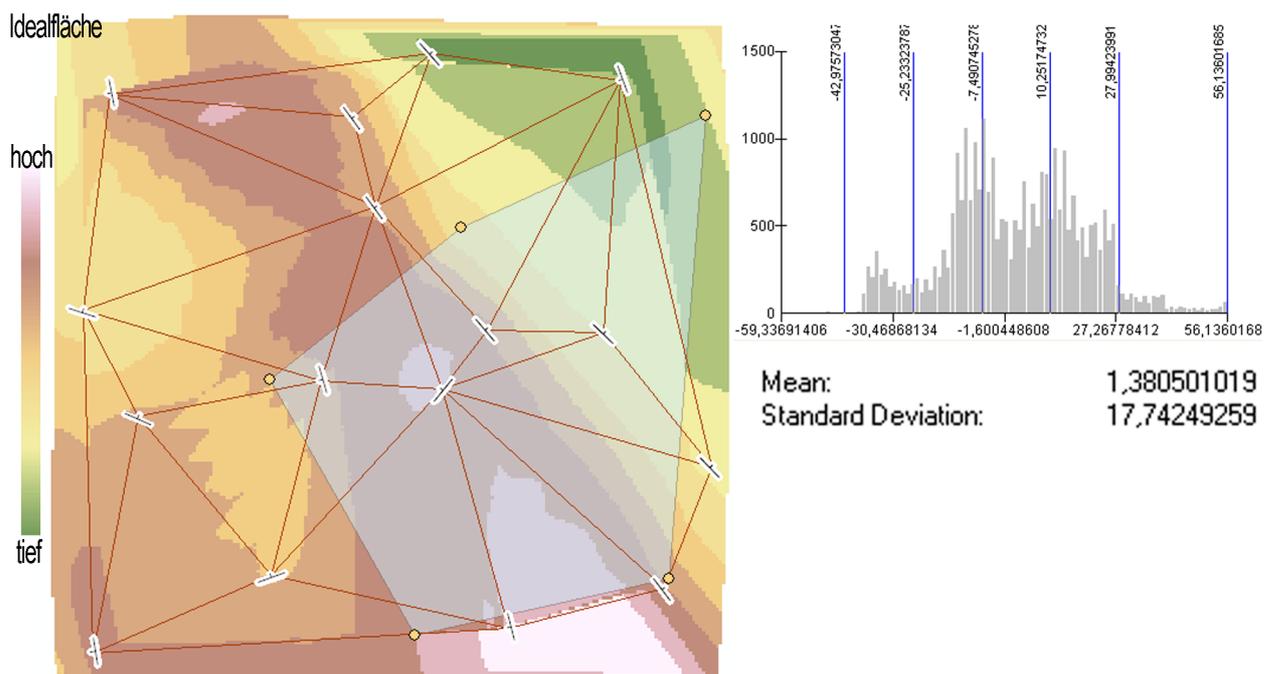
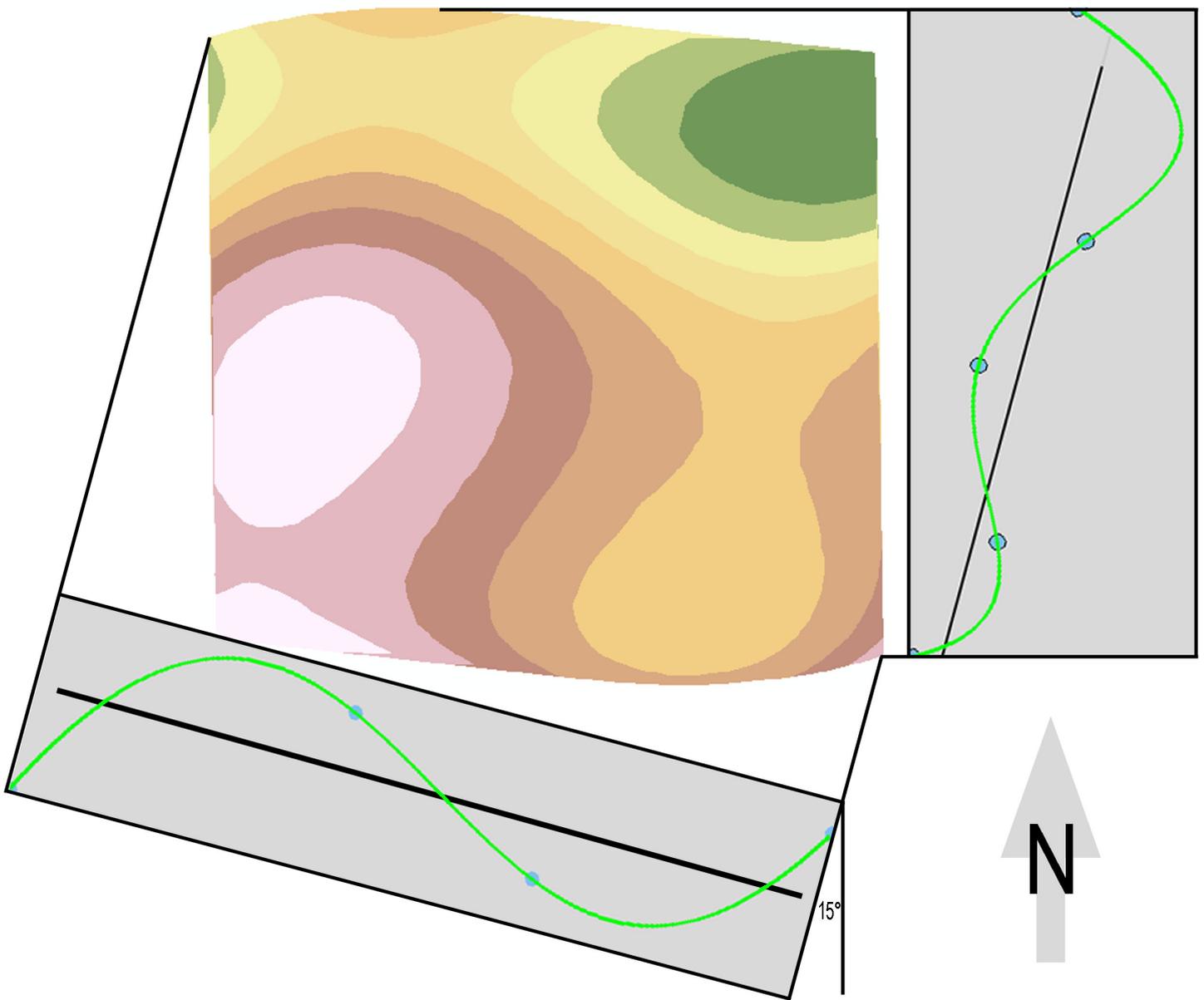


Abbildung 4.15 Idealfäche. Im Hintergrund die Faltengeometrie aus dem Modell I



4.3 Modell III

Im Gegensatz zu der einfachen Geometrie der ersten Modelle, stellt das Modell III eine überprägte Faltung dar. Einengung erfolgte in zwei Richtungen: Haupteinengungsrichtung ist 105° Ost-West, während nahezu senkrecht mit 0° Nord-Süd ein zweites Faltungsereignis stattfand. Bestimmt wurden die Ausgangsdaten wieder mit dem Programm *GeoMatrix*. Dabei wurde zunächst in Richtung 0° eine Faltung mit geringer Amplitude und Frequenz simuliert. Das Ergebnis wurde zudem um 15° nach Norden verkippt. Eine zweite, wesentlich prominentere, Faltung in Richtung 105° überprägt die erstangelegte Geometrie. Das Ergebnis zeichnet sich durch abwechselnde Kuppeln und Becken, sowie zwischenliegende Sättel aus.

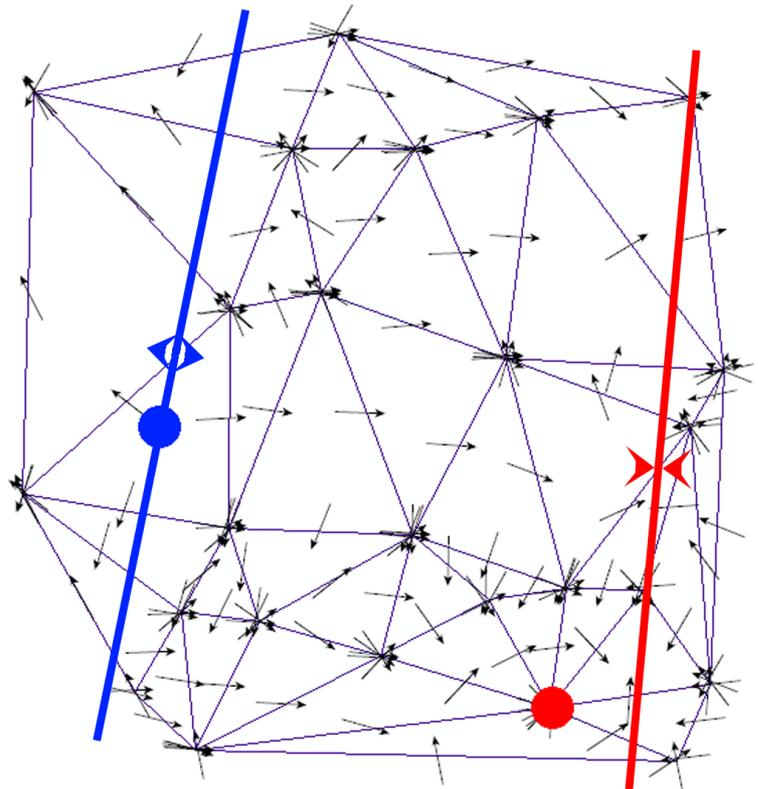
Im Modell III liegen die Stützpunkte analog zum ersten Modell auf der darzustellenden Schichtfläche. Sie werden nach dem Zufallsprinzip (Geostatistical Analyst) als Trainingsdaten aus der Grundmenge ausgewählt. Da die Geometrie deutlich komplizierter ist,

werden 21 Stützpunkte gezogen, weitere vier, randlich gelegene, Datenpunkte kompletieren den Versuchsdatensatz. In dieser Modellierung wird auf alle Korrekturmöglichkeiten verzichtet.

Betrachtet man die Dreiecksvermaschung des ersten Werkzeugs in Hinblick auf Parallelität mit den errechneten Faltenachsen, so lassen sich auf Grund der komplizierteren Geometrie potentielle Verbesserungsmöglichkeiten nur schwer einschätzen (Abbildung 4.16). Während im Großen und Ganzen die Richtung Ost vorherrscht, fallen einzelne Bereiche deutlich aus dem Rahmen. Hier ist schon abzusehen, dass es sich nicht um eine einfache, zylindrische Falte handelt. Interessant sind vier besondere Bereiche. Zum Einen gibt es links eine Linie von Nord nach Süd, von der die Achsen der vorherrschenden Richtung wegzeigen und rechts eine schwach erkennbare Linie, auf die diese Achsen deuten. Zum Anderen gibt es rechts unten einen Punkt, auf den alle umliegenden Achsen zeigen und links unten einen, von dem alle wegdeuten. Die länglichen Bereiche deuten die Sattel- und Troglinien einer der Faltungen an. An ihnen wechselt das Einfallen der eher flächig vorkommenden Faltenachsen der Hauptfaltung ihre Richtung.

Im Bereich der punktförmigen Anomalie rechts besitzen beide Faltungen eine Depression und die entstehende Geometrie entspricht einer schüsselförmigen Eindellung. Der korrespondierenden Punkt auf der linken Seite repräsentiert eine Kuppe.

Abbildung 4.16 synthetische Faltenachsen des Modell III. Sie zeigen ein sehr unruhiges, schwer zu deutendes Bild. Entlang der blauen Linie scheinen die Faltenachsen mit Ost-West Trend wegzudeuten (Hinweis auf eine Antiklinalstruktur). Am blauen Punkt deuten alle Faltenachsen weg, was auf eine domartige Geometrie deutet. Weniger gut zu erkennen ist der Trend der Ost-West streichenden Faltenachsen entlang der roten Linie, auf die sie zu deuten scheinen (Synklinalstruktur). Umso deutlicher fällt der rote Punkt auf, um den die nahen Faltenachsen kreisförmig streichen und auf den die entfernteren zeigen. Er verkörpert eine Beckenstruktur.



Das interpolierte β -Raster des dritten Werkzeugs bildet den oben gefundenen Sachverhalt ab (Abbildung 4.17.b). Nebenan gestellt ist das β -Raster der Modellfläche. Bereiche in Grün stellen die crest lines (Linien der Horizontalen im Profilschnitt der Falte) dar. Die Nord-Süd streichende Falte ist mit einer Trog- und einer Sattellinie vertreten, die Ost-West streichende Falte mit einer zusätzlichen Troglinie. Die Inflexionslinien (Linien der Krümmurumkehr) besitzen die höchsten β -Werte. Sie sind jeweils zwischen den crest lines zu finden. Deutlicher sieht man diese wichtigen Linien in der Abbildung der α -Werte (Abbildung 4.18.b). Da die Krümmung dort gegen Null geht, sind dies Bereiche gekennzeichnet durch minimale Veränderung der Werte des Schichtstreichens. Die Trog- und Sattellinien zeichnen sich (bei aufrechten Falten) durch maximale Veränderungen dieser Werte aus.

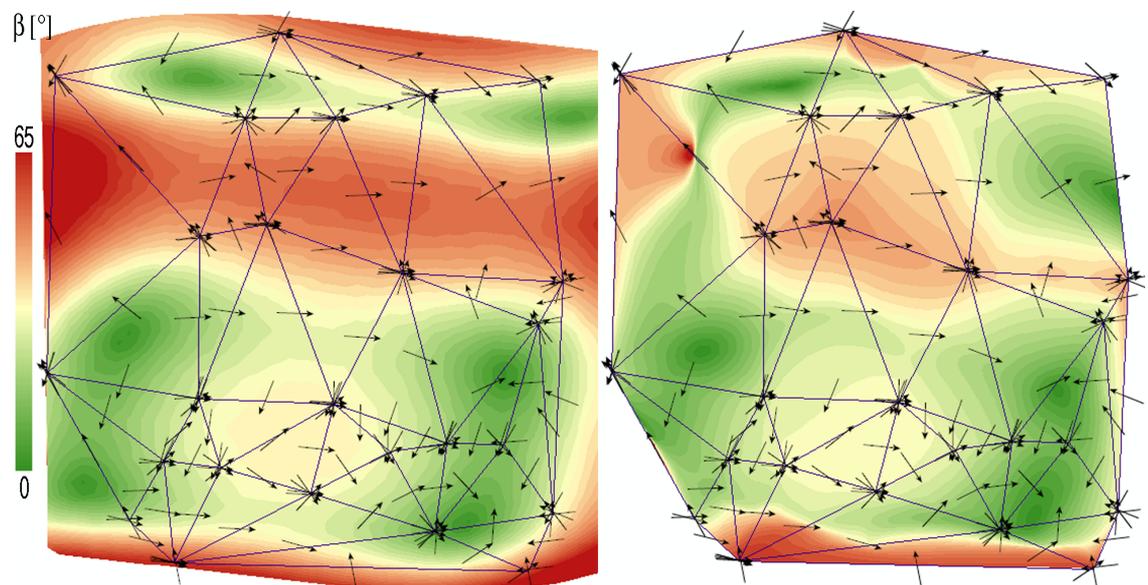
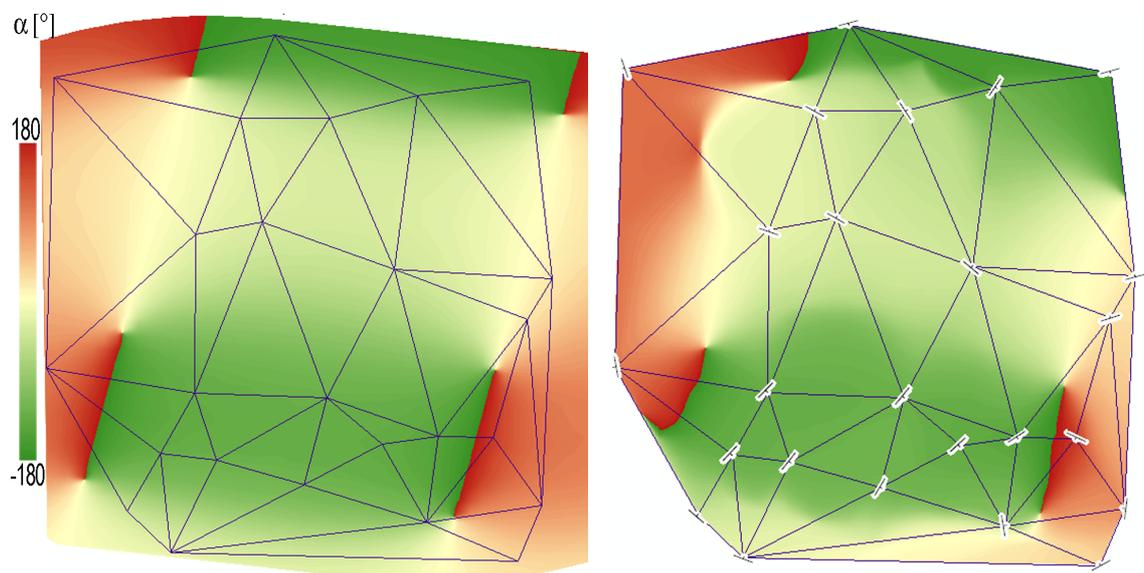


Abbildung 4.17 β -Raster a) Modellrealität b) Ergebnisraster der ersten Anwendung. Alle Strukturen sind im Ansatz vorhanden

Abbildung 4.18 α -Raster a) Modellrealität b) Ergebnisraster der ersten Anwendung



Eine Deutung der Darstellung der Orthogonalität des Schichtstreichens und des Fallens ist bei komplizierter gebauten Falten nicht mehr möglich. Während im zweiten Modell durchaus noch Information aus diesen Berechnungen zu gewinnen war, ist bei komplexerer Faltung ein sinnvolles Arbeiten hiermit nicht mehr möglich. Da der Charakter der untersuchten Falten nie im voraus klar ist und zudem Fehler bei der Datenaufnahme und Vereinfachungen in den Berechnung weitere Unsicherheiten darstellen, ist von einem Gebrauch dieser Vergleichsdarstellung abzusehen. Mit den interpolierten α - und β -Werten ist jedoch eine vernünftige Abschätzung der Lage der besonderen Geometrien möglich (Abbildung 4.19).

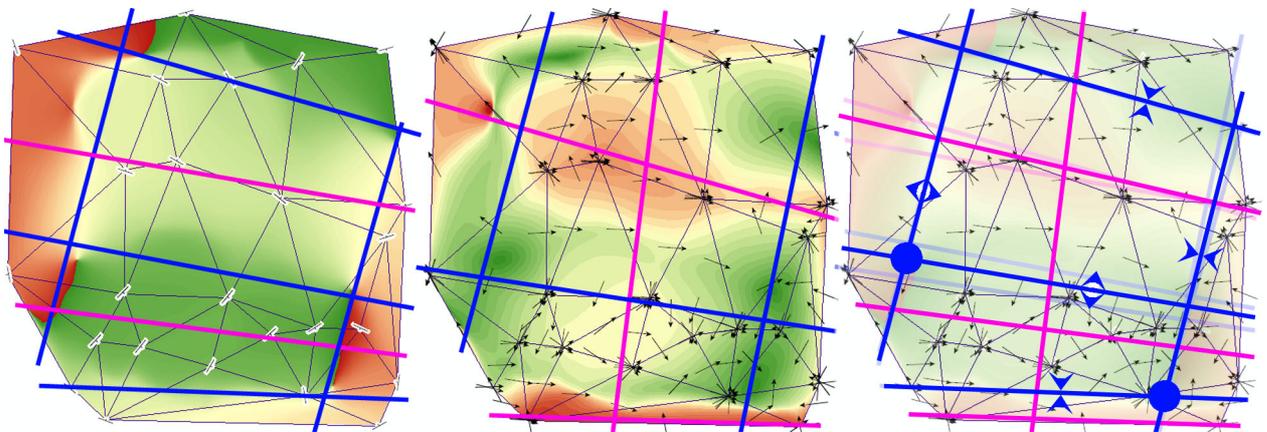


Abbildung 4.19 Interpretation der Ergebnisse **a)** Im α -Raster liegen die Inflexionslinien (pink) in den Bereichen geringster Werteänderung, die crest lines (blau) an Stellen größter Änderung. **b)** Im β -Raster erkennt man die Inflexionslinien an den Maximalwerten, die crest lines an den Minimalwerten. **c)** Zusammenschau der Einzelinterpretationen: Durch Einbeziehung der Informationen aus den Faltenachsen können die crest lines in Mulden- und Sattellinien aufgeteilt werden. Damit ist die Geometrie der Faltung erkannt. Der linke Punkt sitzt auf dem vorhergesagten Dom, der Rechte in der Senke.

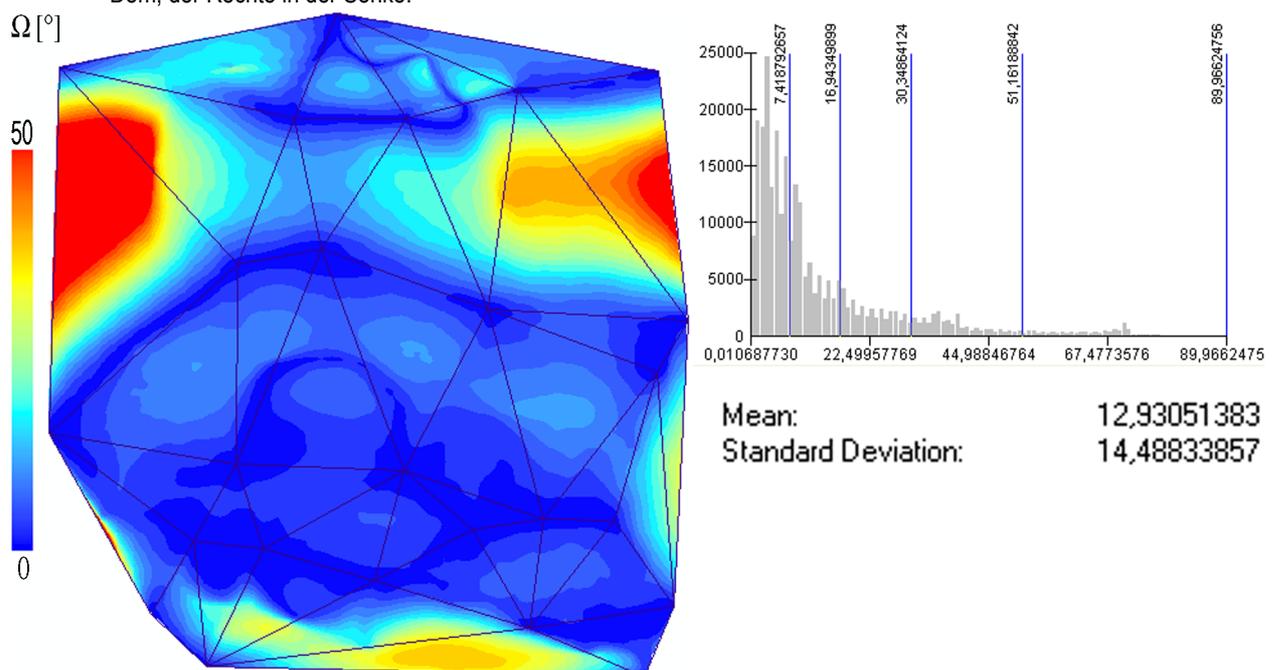


Abbildung 4.20 Validierung der Berechnungen: Fehlerbehaftet scheint vor allem die Berechnung der nördlichen und südlichen Inflexionslinien zu sein.

Eine genauere Eingrenzung auf punktförmige Atriale der notwendigen, zusätzlichen Probennahme ist jedoch ohne weitere Hilfsmittel nur schwer möglich. Die Berechnung des Abbildungsfehlers (Werkzeug *Winkelfehler*) zeigt, dass nur kleine Abschnitte der für kritisch befundenen Bereiche (crest lines und Inflexionslinien) tatsächlich größeren Korrekturbedarf besitzen (Abbildung 4.20). Die Statistik unterstreicht diesen Befund.

Als Ergebnis der Anwendung II entsteht eine Annäherung an die gesuchte Schichtfläche. Trotz des Verzichts auf alle möglichen Formen der Korrektur entspricht die berechnete Geometrie weitgehend der Modellfläche (Abbildung 4.21). Trotz einer Standardabweichung von 86 Meter, zeigt eine 3D-Darstellung eine gute Passform. Auch wenn die gesuchte Schichtfläche nicht exakt nachgebildet wird, bietet die Modellierung doch eine große Hilfestellung bei der Interpretation der oft komplex zu deutenden Daten. Sie kann somit auch bei der Festlegung der noch zu erbringenden Geländedaten hilfreich sein, insbesondere, da fehlerhaft interpolierte Bereiche mit eigenem Charakter aus dem Rahmen der großräumigen Geometrie fallen.

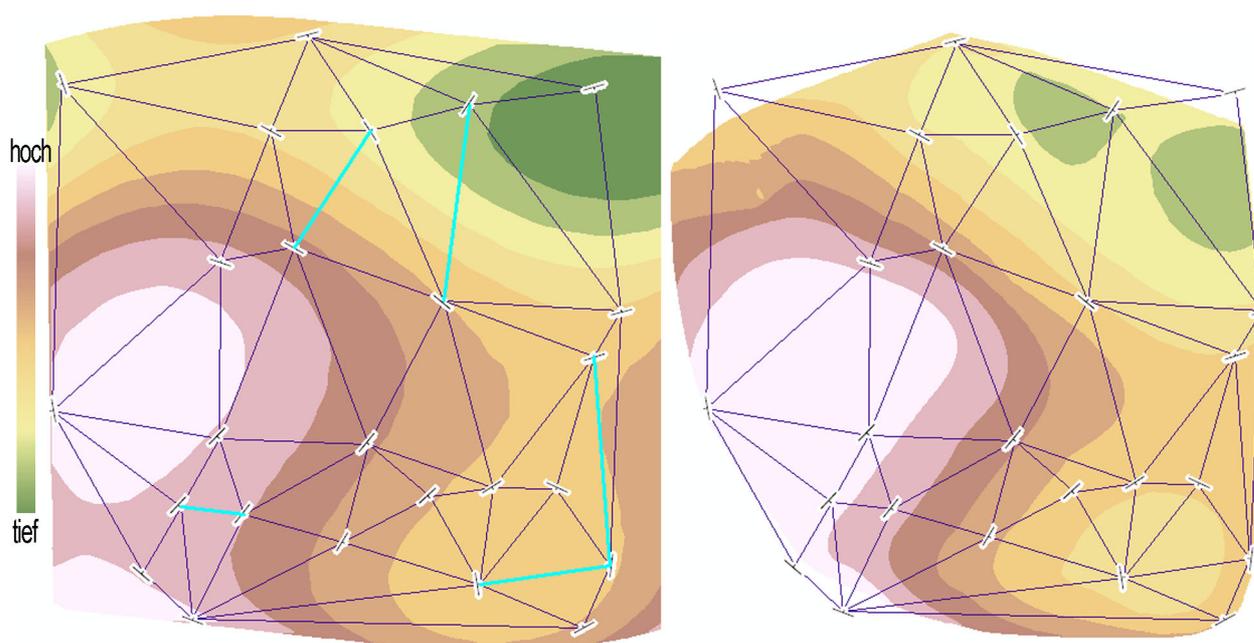
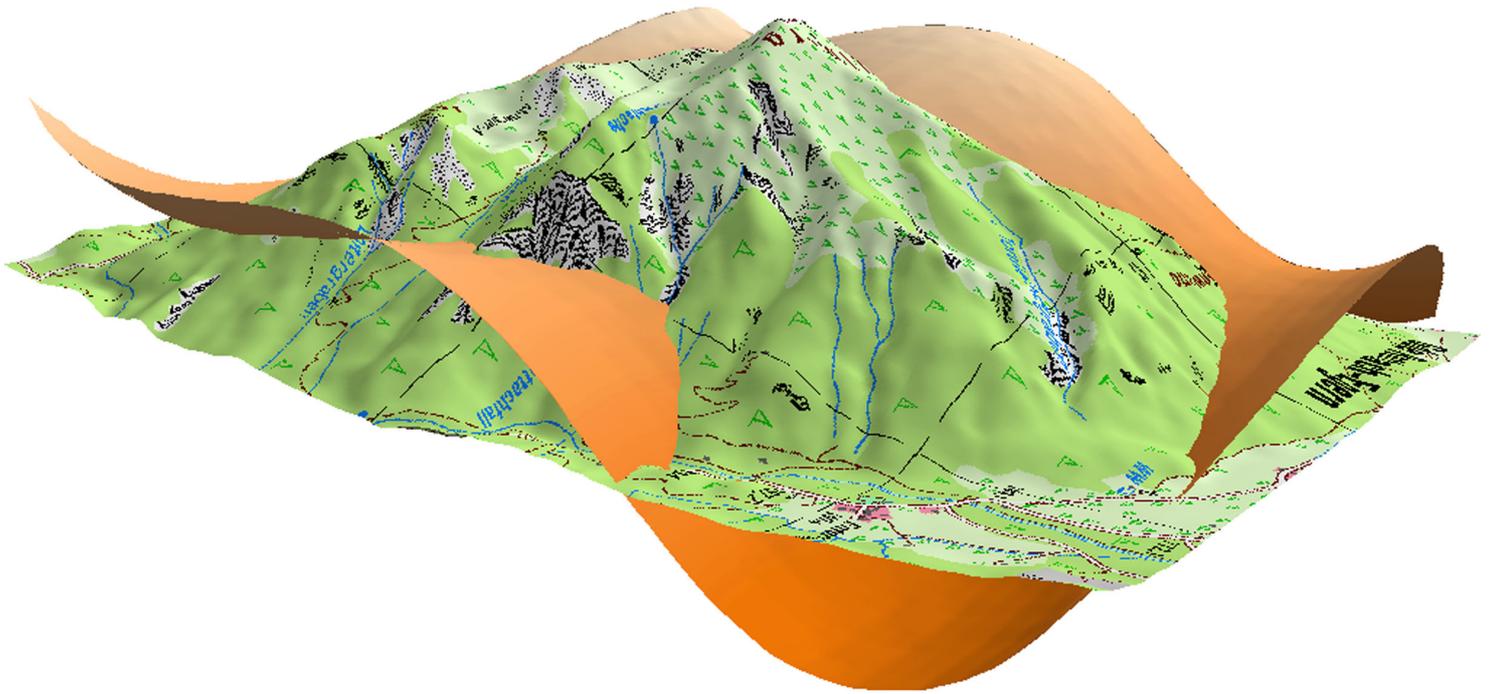


Abbildung 4.21 Vergleich der berechneten Idealfäche (rechts) mit der tatsächlichen Modellrealität: Trotz Verzicht auf alle Korrekturmöglichkeiten, bildet die berechnete Idealfäche die Geometrie der Faltung ab. Mit dieser Interpretationshilfe fällt es nicht schwer die Geometrie der Faltung zu erfassen. Eine Interpretation allein aus den Stützpunktdaten, fiel sicher nicht so genau aus.



4.4 Modell IV

Das Modell IV entspricht in Geometrie der Falte und Wahl der dargestellten Grenzfläche dem Modell III. Die Stützpunkte der Modellierung sind jedoch einer Projektion der Streich- und Fallwerte auf das Modell eines real existierenden Berges (Wallberg am Tegernsee, Oberbayern) entnommen. Die Umrechnung wurde mit den Werkzeugen *Projection* und *ProjectionIteration* vorgenommen. Die Verschneidung des Höhenmodells der Geländeoberfläche und der zu modellierenden Grenzfläche ergeben die, zur Korrektur notwendigen, Austrittspunkte der Schichtgleichen (Ausbisslinie der Schichtgleichen, siehe auch Titel des Kapitels).

Die Auswahl der Stützpunkte für die Modellierung erfolgt nach realen Kriterien. So wird angenommen, dass ein Feldgeologe einen Tag lang im Gelände Daten zur räumlichen Lage anstehender Gesteine aufnimmt. Dies erfolgt in der Regel zunächst entlang gut begehbarer Wege, um eine möglichst großflächige Datenbasis zu erhalten. Wo und ob Gesteine entlang der Wege anstehen, wird hier nach geologischen Standpunkten geschätzt: Je steiler das Gelände, umso wahrscheinlicher ist die Möglichkeit festen Fels anzutreffen. Besonderes Augenmerk liegt hier auf Kehrpunkten von Serpentin und tiefen Geländeeinschnitten, etwa von Bächen. Weiterhin können Daten an Schroffen erhoben werden, die in der topographische Karte mit Felszeichnung angegeben sind. Im Bereich geringer Höhenunterschiede werden sehr vereinzelt Messmöglichkeiten angenommen, hier am ehesten in direkter Nähe baulicher Veränderungen.

Zunächst werden zwei mögliche Routen hinsichtlich ihrer Modellierungserfolge verglichen. Das erfolgreichere Modell soll als Planungsgrundlage des zweiten Geländetages des virtuellen Geologen dienen.

Im ersten Beispiel beginnt der Geologe seine Tagestour in Enterrottach und steigt entlang der Strasse langsam nach Süden an. Dabei nutzt er alle Stichwege, um schnell zu Gebirgsbächen anzusteigen und Messwerte aufzunehmen. Auch entlang des Schiffbach können immer wieder Werte eingemessen werden. Ab der Portners-Alm werden günstige Messmöglichkeiten seltener. Erst im Abstieg an der steilen Kehre und wieder entlang eines Grabens ergeben sich nochmals gute Aufschlüsse. Am Fuß der Gondelbahn ist festes Gestein am Hanganriss des Parkplatzes einzumessen (Abbildung 4.22.a).

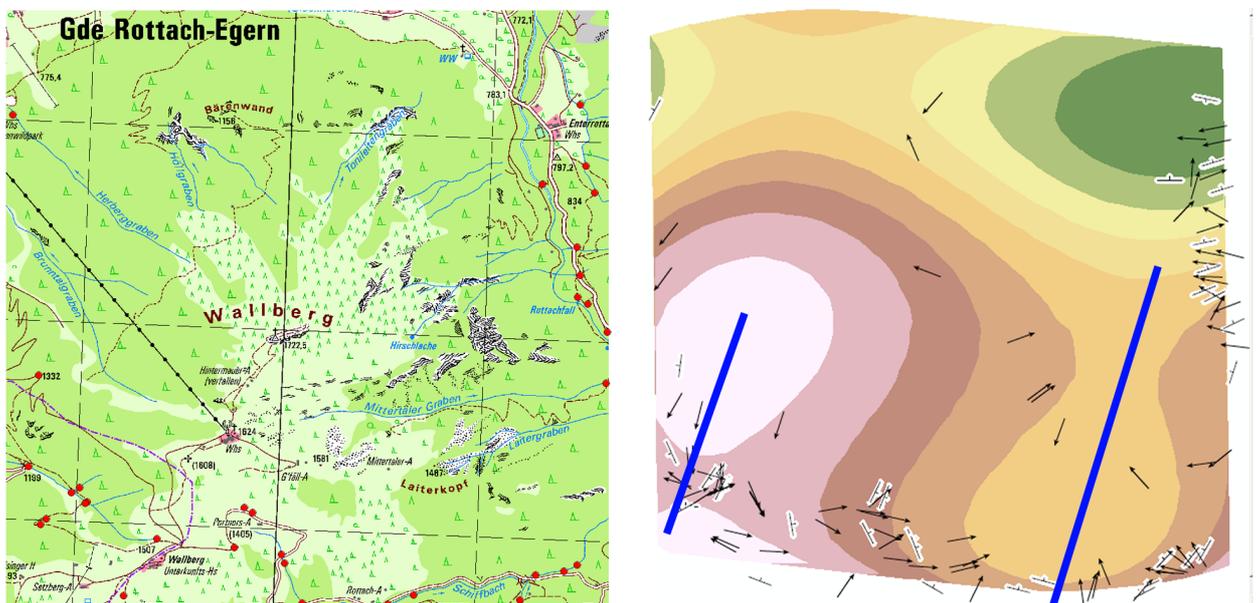


Abbildung 4.22 Route 1 a) Die Route 1 des Geologen verläuft im Uhrzeigersinn entlang des Randes von Enterrottach über den Schiffbach auf den Wallbergsattel und über einen Steig wieder hinunter zur Talstation der Seilbahn. Die roten Punkte stellen Probenahmeorte dar. b) Die Rohdaten bieten nur geringe Interpretationsmöglichkeiten.

Das Ergebnis der Dreiecksvermaschung durch das Werkzeug *InnerGrowth_composit* zeigt ein kompliziertes Muster. Die aufgereihten Stützpunkte sind durch ein enges Geflecht an Linien verbunden. Hier ist eine TIN-Korrektur kaum möglich. Mit der Darstellung des Streichens und Fallens der Stützpunkte und der berechneten synthetischen Faltenachsen der Ergebnistabelle des Werkzeugs *ConCalculation* kann eine erste Interpretation erfolgen (Abbildung 4.22.b). Mit dem Werkzeug *PostCalculation* werden abschließend flächig Raster für die Fallrichtung und das Fallen berechnet (Abbildung 4.23). Aus ihnen folgt eine weitere Interpretation der Faltengeometrien. Durch die ungünstige, weil nur randliche, Erfassung von Stützpunkten ist zu diesem

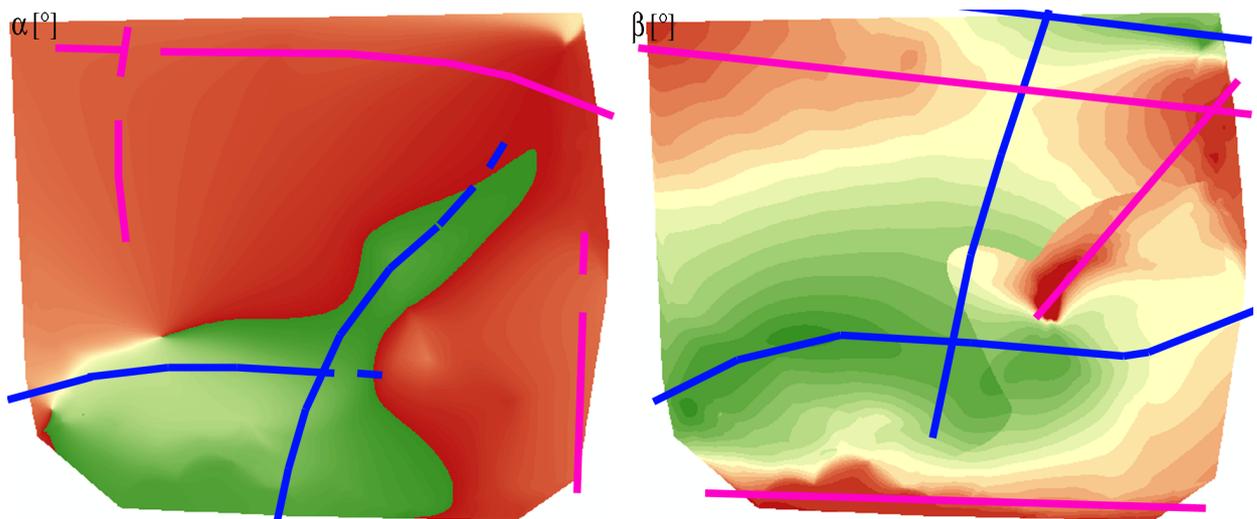


Abbildung 4.23 α , β Raster der Route 1 mit Interpretation (blau = crest lines, pink = inflexion lines). **a)** Sehr schwierige Interpretation des α -Rasters. Nur in Zusammenschau mit dem β -Raster aussagekräftig **b)** Deutlich treten Inflexionslinien im Norden und im Süden und eine dazwischen liegende crest line auf. Alle weiteren Elemente weichen stark von der Modellrealität ab.

Zeitpunkt noch keine sichere Prognose über den Aufbau der Falte möglich. Dies zeigt sich auch in der schlechten Statistik der Werte des Werkzeugs *Winkelfehler* (Abbildung 4.24). Der Durchschnittswert liegt mit über 21° Abweichung von der Realität und einem Maximum bei 27° Abweichung jenseits aller Nutzungsmöglichkeiten.

Bevor die Planung des nächsten Geländetages erfolgt, sollte in diesem Fall eine Korrektur der Ergebnisse durch Ausbisslinien mit der Anwendung *II* erfolgen. Diese sind zumeist in ausreichender Lagequalität aus den geologischen Karten zu extrahieren. Durch die Werkzeuge *SE/delta_dAM_composit* und *Summenraster* wird ein Ausgaberraster generiert, das mit den Werkzeugen *ConvexHull* und *OuterGrowth(b)* entsprechend der zu Grunde gelegten Ausbisslinien korrigiert wird.

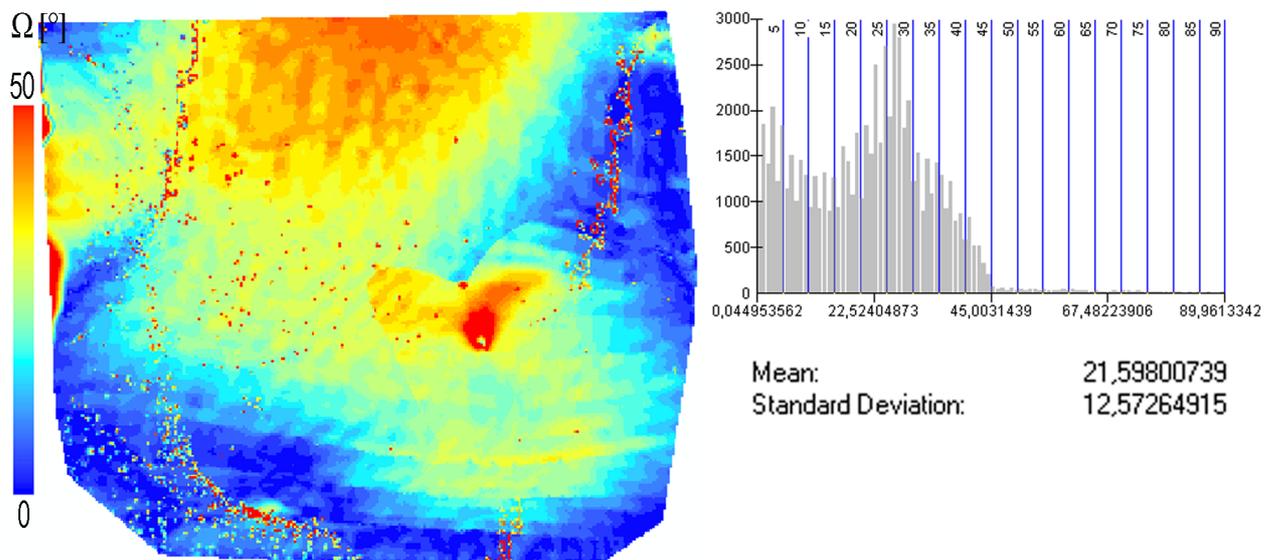


Abbildung 4.24 Winkelfehler Route 1. Der Mittelwert liegt sehr hoch und der maximale Zählwert wird bei etwa 27° erreicht! Die großen Lücken bei der nur randlichen Begehung im mittleren Bereich verursachen diese Fehler!

Mit dem Werkzeug *Schichtflächen(a)* wird hieraus dann eine Oberfläche gerechnet, die der Form der zugehörigen Schichtgleichen entsprechen soll. Die Geometrie dieser Oberfläche lässt weitere, abschließende Interpretationen über den Aufbau der Faltung zu (Abbildung 4.25).

Durch die ungünstige Wahl der Geländebegehung kann die Faltengeometrie allerdings nur randlich mit ausreichender Sicherheit beschrieben werden. Die Planung der weiteren Geländetätigkeit liegt demnach auch weitreichend im Ungewissen.

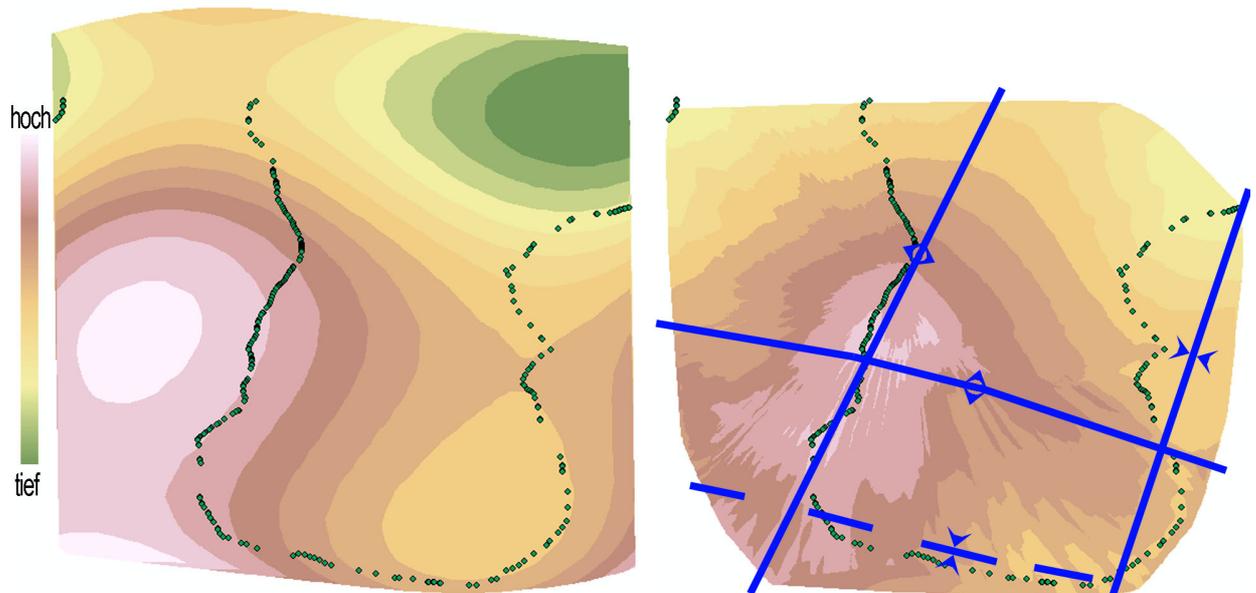


Abbildung 4.25 Idealfäche Route 1: links die Modellrealität, rechts die berechnete und entlang der Ausbisslinie (Punkte) korrigierte Idealfäche. Durch die Korrektur werden viele der Strukturelemente an ihren richtigen Platz verschoben, so dass der grobe Aufbau der Faltung klar wird.

In einem zweiten Beispiel soll aufgezeigt werden, wie wichtig eine möglichst flächige und gleichverteilte Datenbasis für die Vorhersagesicherheit ist. Hier beginnt der Geologe seine Geländetätigkeit mit der Nutzung der Gondelbahn für den Aufstieg. Im Gipfelbereich kann er zunächst in den felsigen Regionen schnell und einfach einige Datenpunkte gewinnen, bevor er sich an den Abstieg nach Westen macht. Entlang des Grabens, in den Schroffen und zum Teil in den steileren Bereichen des Weges sind weitere Daten leicht zu gewinnen. Am Fuße des Berges gestaltet sich dies jedoch weitaus schwieriger. Da bis in den Norden des Berges nur zwei weitere Stützpunkte erhoben werden können, steigt der Geologe zu, in der Karte verzeichneten, Felswänden an, wo zwei weitere Messpunkte der Datenbasis zugefügt werden können. Ab Enterrottach gibt es wieder mannigfaltige Möglichkeiten entlang der vielen Gräben. Seine Tagestour endet vor dem erneuten Gipfelaufstieg am Unterlauf des Schiffbach. Von dort kann er mit dem Bus wieder zurück zur Basis fahren (Abbildung 4.26.a).

Obwohl nicht wesentlich mehr Daten gesammelt wurden ist die räumliche Verteilung weitaus günstiger als im ersten Beispiel. Zudem hat sich der Geologe einen Aufstieg über 1000 Meter gespart und ist auch nicht viel weiter gelaufen.

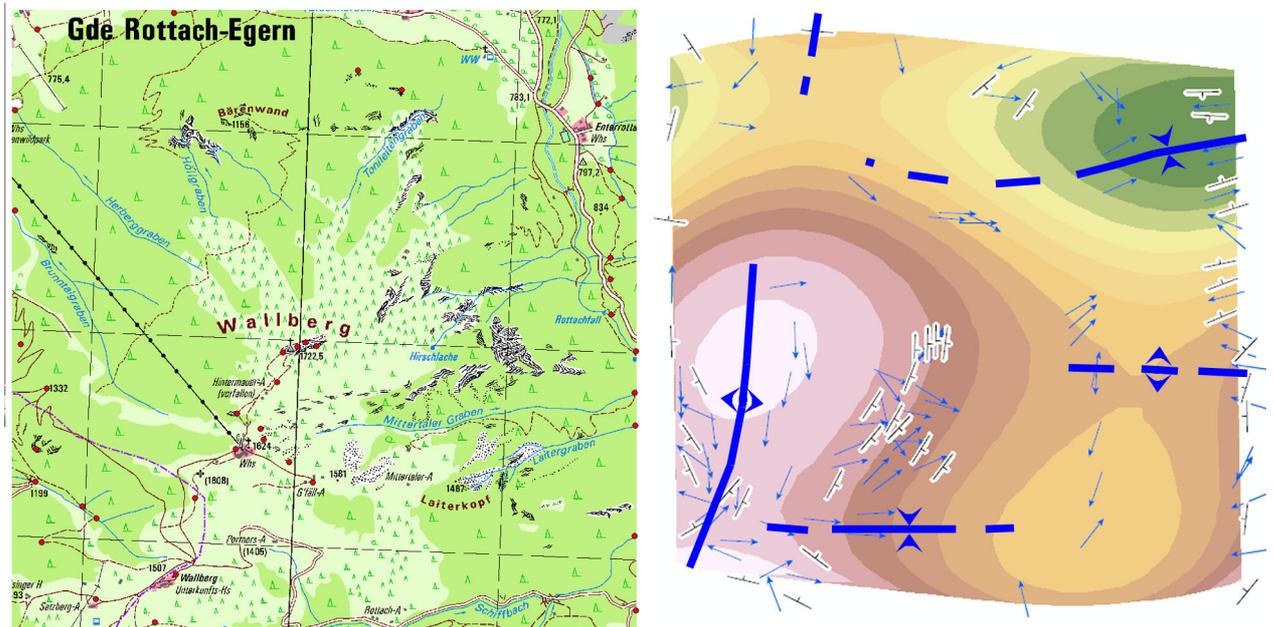


Abbildung 4.26 Route 2 a) Auffahrt mit der Gondel von Nord-West. Nach Arbeit im Gipfelbereich Abstieg im Westen, Umrunden des Berges und Aufstieg bis zum Schiffbach im Osten. Die roten Punkte stellen Probenahmeorte dar. b) Aus den synthetischen Faltenachsen und den Stützpunkten lassen sich erste Interpretationen ableiten. Die blauen Linien stellen crest lines dar. Im Hintergrund abgebildet ist die Modellrealität.

Die Darstellung der berechneten Faltenachsen und der Stützpunktwerte zeigt, dass die maximale Weite der Interpolationen (maximale Kantenlänge der Dreiecksvermaschung) etwa auf die Hälfte reduziert werden konnte. Zudem pausen sich bestimmte Geometrien der Faltung durch die raumgreifendere Verteilung der Daten bereits in diesem Stadium durch (Abbildung 4.26.b). Auch die Raster für die Fallrichtung und das Schichtfallen lassen sich weitaus leichter interpretieren (Abbildung 4.27). Dies spiegelt sich auch in der Statistik der Winkelabweichung von der Realität wieder (Abbildung 4.28). Während der Durchschnitt und die Standardabweichung noch immer recht hoch sind, zeigt die Verteilung nun einen Peak bei etwa 3° ! Das Ergebnis der Berechnung der Schichtgleichen mit Korrektur durch die Ausbisslinie zeigt auch schon eine sehr gute Annäherung an die Modellrealität (Abbildung 4.29).

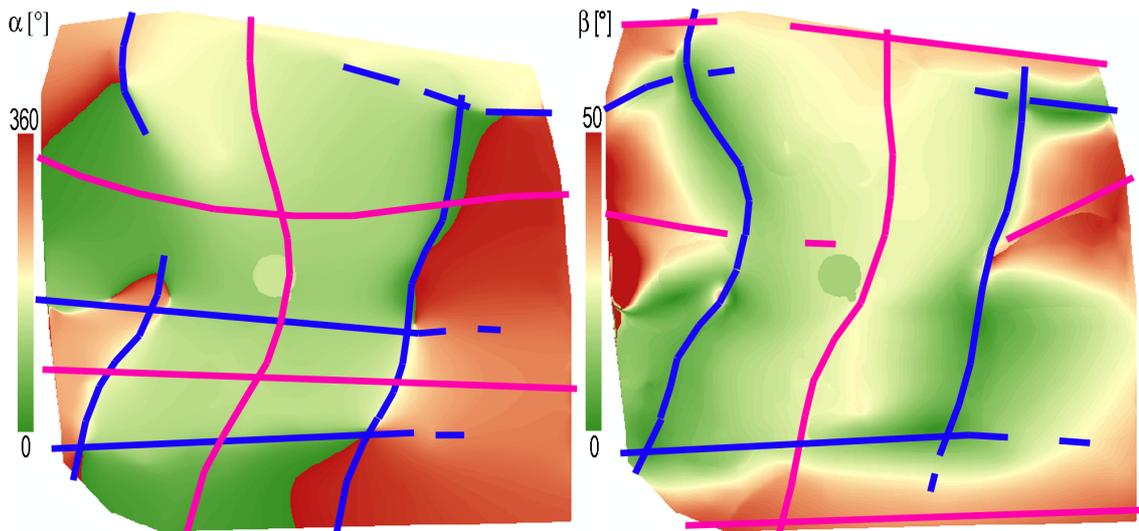


Abbildung 4.27 α, β Raster, Route 2 a) Interpretation des berechneten Rasters für die Fallrichtung: In blau angegeben die crest lines, in pink die Inflexionslinien b) Interpretation des Rasters für das Schichtfallen. Die Farben entsprechen der Interpretation von a).

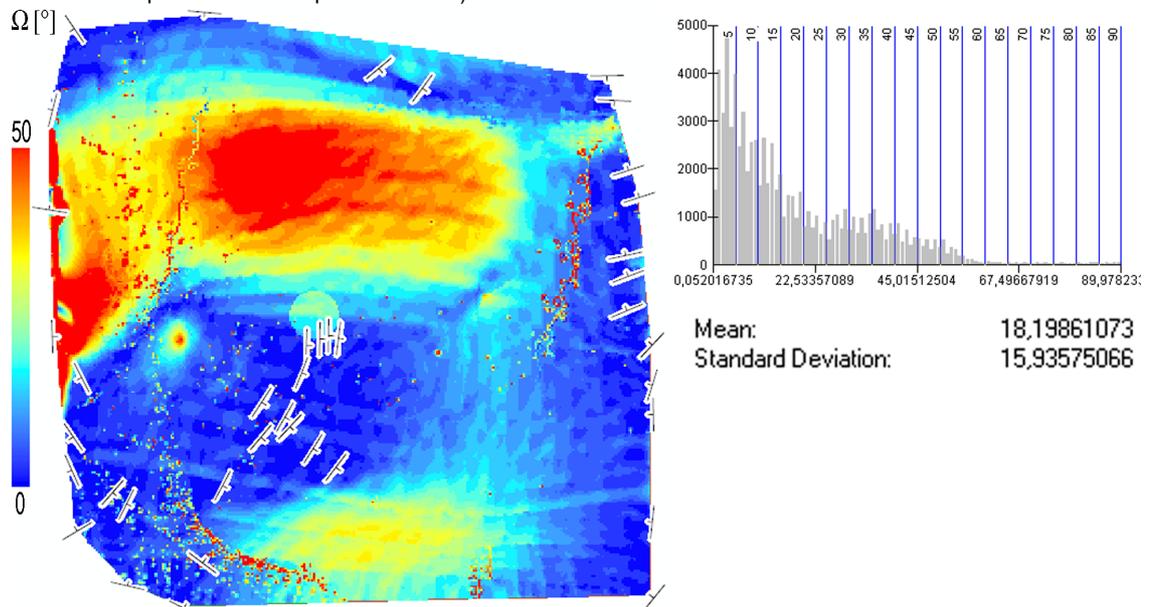
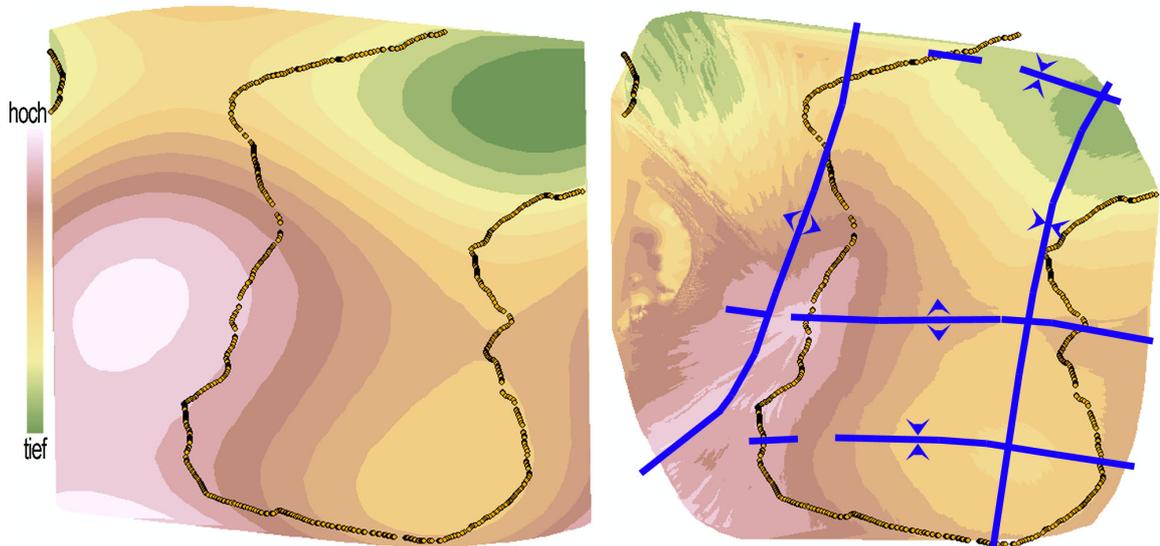


Abbildung 4.28 Winkelfehler, Route 2

Abbildung 4.29 Idealfäche, Route 2. Links zum Vergleich die Modellrealität. Die Punkte stellen die Ausbisslinie der Korrektur dar. In blau die Interpretation der Faltenoberfläche (crest lines).



Führt man die Interpretationen der Darstellung der Faltenachsen und der Stützpunkte, der Raster für Fallrichtung und Schichtfallen und des Höhenmodells der Schichtgleichen zusammen, so ergeben sich einige Bereiche, die bei weiterer Datenaquise bevorzugt zu begehen sind. Dies sind vor allem die Linien des Biegungswechsels (Inflexionslinien) und der Horizontalen im Profil (Troglinie und Sattellinie). Erstere sind vor allem wichtig, weil in ihrer Umgebung die höchsten Fallwerte auftreten, letztere erhöhen die Lagegenauigkeit der Interpretation der Geometrie der Falten. Am wichtigsten für weitere Datensammlung sind wiederum Bereiche, in denen sich Geometrielinien verschiedener Faltungsereignisse kreuzen und dort vor allem, wenn im direkten Umfeld noch keine Daten erhoben wurden. Im Beispiel kristallisieren sich solcherart fünf wichtige Punkte heraus (Abbildung 4.30).

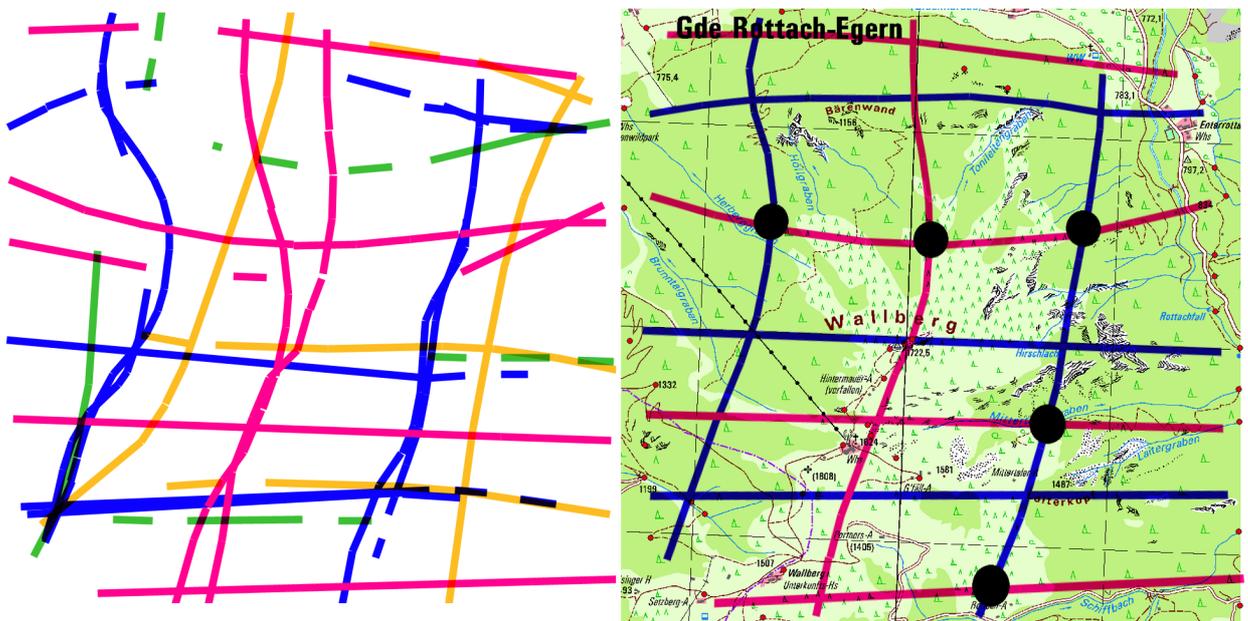


Abbildung 4.30 Interpretation, Route 2. **a)** Durch Überlagerung all der einzelnen Interpretationen soll ein wahrscheinliches Modell der Faltung abgeleitet werden. In blau dargestellt sind die crest lines der Raster für die Fallrichtung und das Schichtfallen, in pink die zugehörigen Inflexionslinien. Die Interpretation der synthetischen Faltenachsen ist in grün gezeigt, die der Idealfäche in gelb. Da die Idealfäche von der Geländeoberfläche abweicht, sind diese Daten eher zur Orientierung zu nutzen. **b)** Ergebnis der Zusammenschau der Einzelinterpretationen. Wichtigste Bereiche zusätzlicher Datenerhebung ergeben sich aus den Schnittpunkten der gefundenen Geometrielinien. Sind in deren unmittelbarer Umgebung bereits Daten erhoben, so können sie ausgeklammert werden. Derart ergeben sich fünf Bereiche (schwarze Punkte), die zur Erhöhung der Qualität der Datenbasis unbedingt beprobt werden sollten.

Diese werden in einer Beispielsrechnung der Datengrundlage zugeschlagen. Die Ergebnistraster für die Fallrichtung und das Schichtfallen (Abbildung 4.31) zeigen deutliche Annäherungen an das Original, was sich auch in der Berechnung des Winkelfehlers zeigt (Abbildung 4.32). In der Wirklichkeit wird die Datenerhebung allerdings nicht punktuell erfolgen. Vielmehr dient die Ortsbestimmung dieser Punkte der Planung der Routen weiterer Feldarbeit.

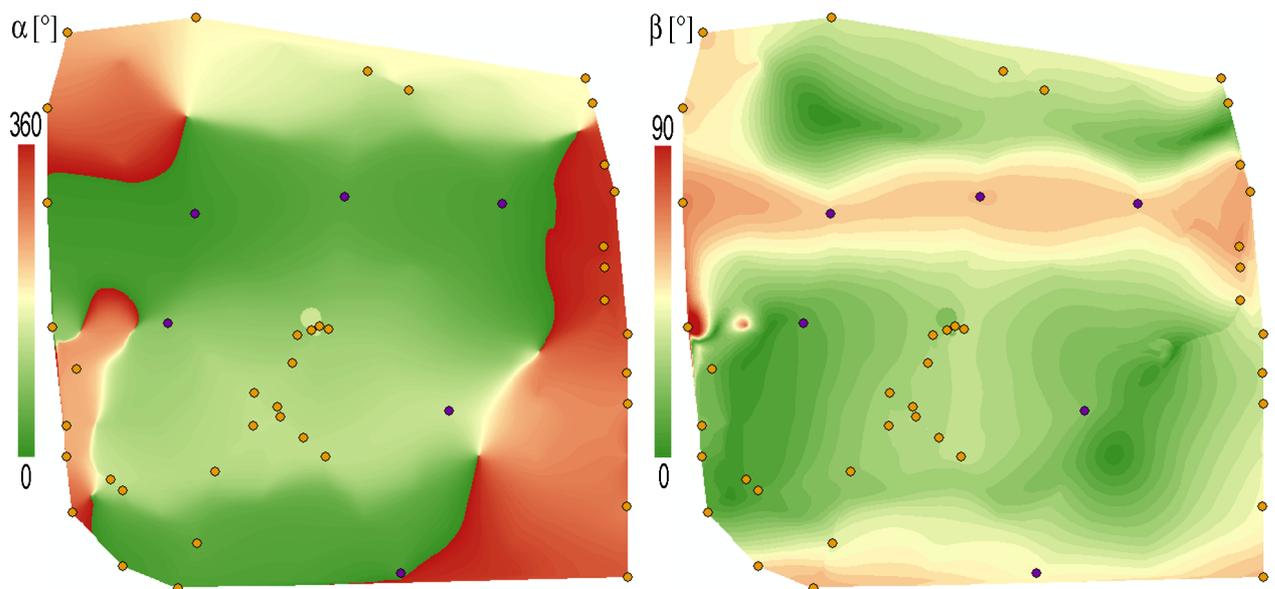


Abbildung 4.31 α, β Raster, Route2, zweiter Tag. Die sechs violetten Punkte sind eine Erweiterung der Datenbasis gemäß der in Abbildung 4.30 bestimmten Problembereiche.

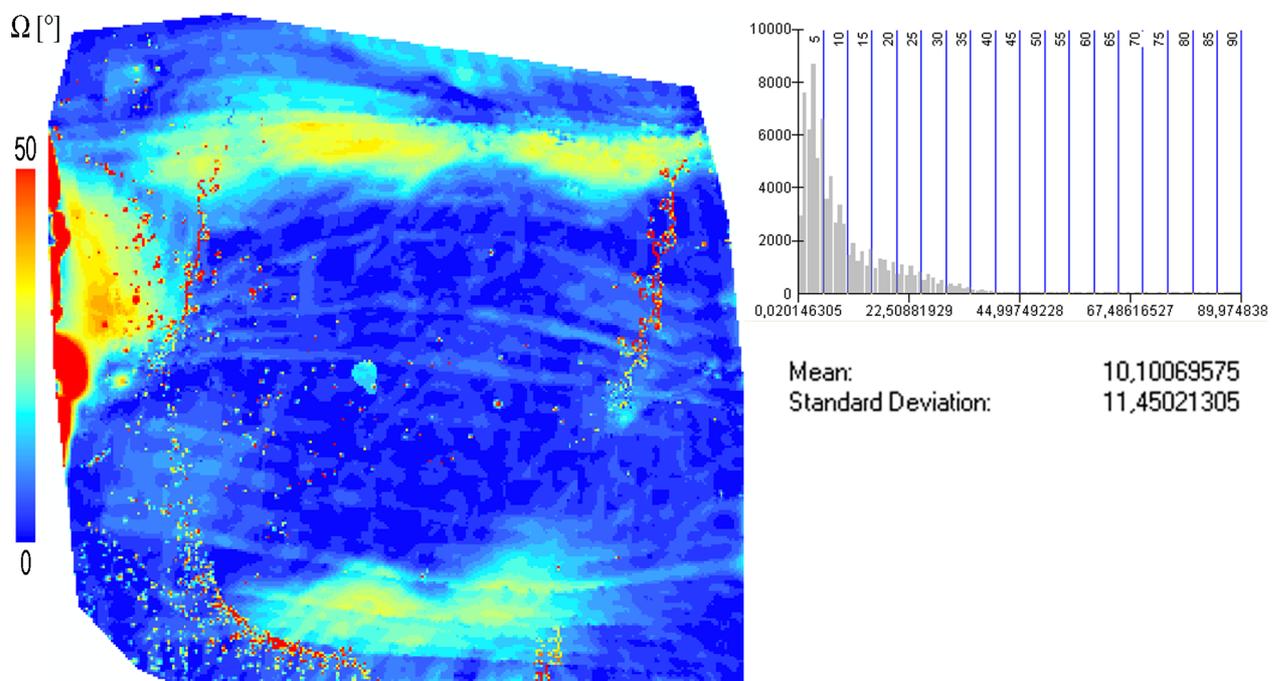


Abbildung 4.32 Winkelfehler, Route 2, zweiter Tag.

Der Geologe aus dem zweiten Beispiel könnte den zweiten Tag der Feldbegehung im Norden mit dem Anstieg zur Bärenwand beginnen. Der Weg endet dort und der Geologe folgt zunächst weiter dem Höllgraben, bevor er zum Herberggraben quert und von dort zum Höhenweg weitersteigt. Da weiter im Süden ein wichtiger zusätzlicher Aquisepunkt liegt (isolierter Fleck hoher Winkelabweichung in Abbildung 4.28), läuft er schnell bis etwa zur Bergbahn und sucht dort nach geeigneten Felsbereichen. Dann geht es gemütlich entlang der Höhenlinien bis zum beginnenden Abstieg wieder nach Norden, von wo aus nach Osten über den Tonleitengraben, weiteren Gräben und Schroffen zum

alten Jägersteig gequert wird. Wieder unten an der Rottach orientiert sich der Geologe zum Wandersteig zwischen Mittertalergraben und Laitergraben. Dieser endet auf der Mittertaler-Alm, wo es querfeldein zunächst zum Laiterkopf und dann zur Portners-Alm geht. Hier kann auf breitem Feldweg entlang des Schiffbach wieder abgestiegen werden. Mit dieser Route werden alle sechs, als wichtig erachteten, Bereiche der Planung abgelaufen (zum Nachvollzug der Route siehe Abbildung 4.33.a).

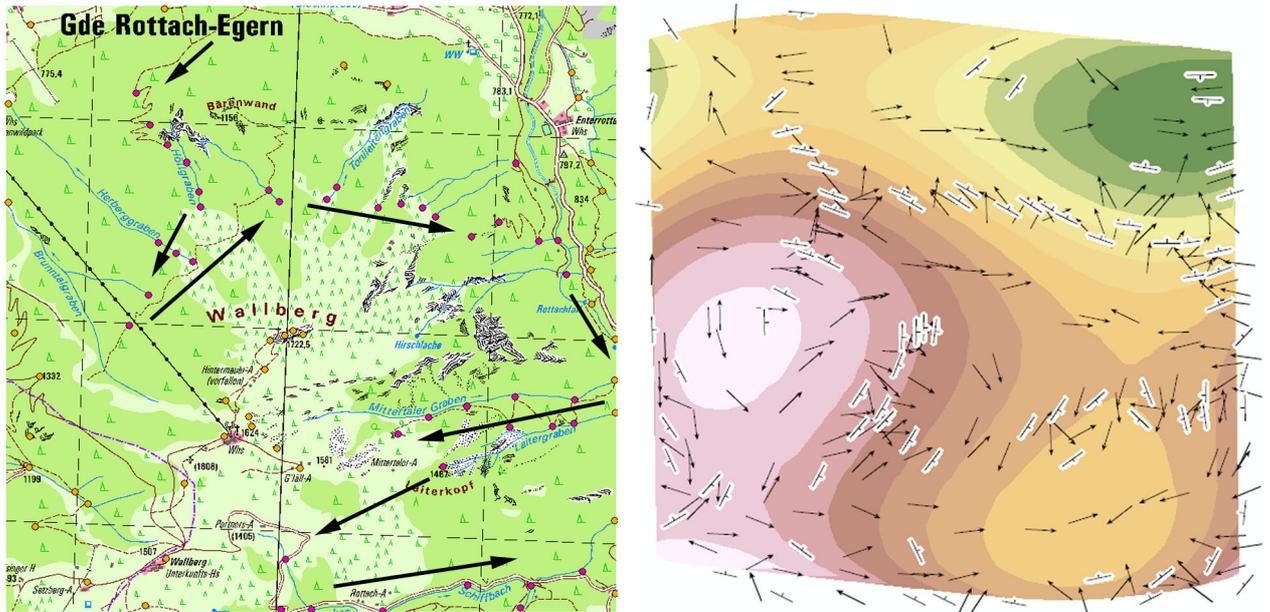


Abbildung 4.33 Route und Datenbasis, Tag 2 **a)** Routenplanung entsprechend der schwarzen Pfeile, um alle sechs wichtigen Bereiche zu beproben. **b)** Datenbasis und synthetische Faltenachsen nach Beprobung am Tag 2.

Die Ergebnisse der Berechnungen der Anwendung_I zeigen eine gute Näherung der Raster der Fallrichtung und des Schichtfallens an die Modellwirklichkeit (Abbildung 4.34). In Abbildung 4.35 bestätigt das Raster für die Winkelabweichung diese, schon sehr gute, Passgenauigkeit.

Auffällig, vor allem im Raster der Fallrichtung, ist eine Störung der allgemeinen Geometrien etwa in der Mitte des westlichen Randes. Diese Störungen zeugen von unangepassten Stützpunktwerten, entweder durch fehlerhafte Messung im Gelände, durch fehlerhaftes Ansprechen von Felsblöcken als Anstehendes (Verkipfung, Drehung), oder weil entsprechende Werte durch unentdeckte Störungen oder sehr kleinräumiger, lokaler Faltung von den anderen Stützpunkten konzeptionell getrennt sind. Im Falle des Beispiels stammen die unangepassten Werte zweier Stützpunkte von fehlerhaften Berechnungen der Streich- und Fallwerte im Randbereich der Modellfläche im Feld der Vorbereitungen (Projektion der Schichtflächenwerte auf die Geländeoberfläche). Beschneidet man die

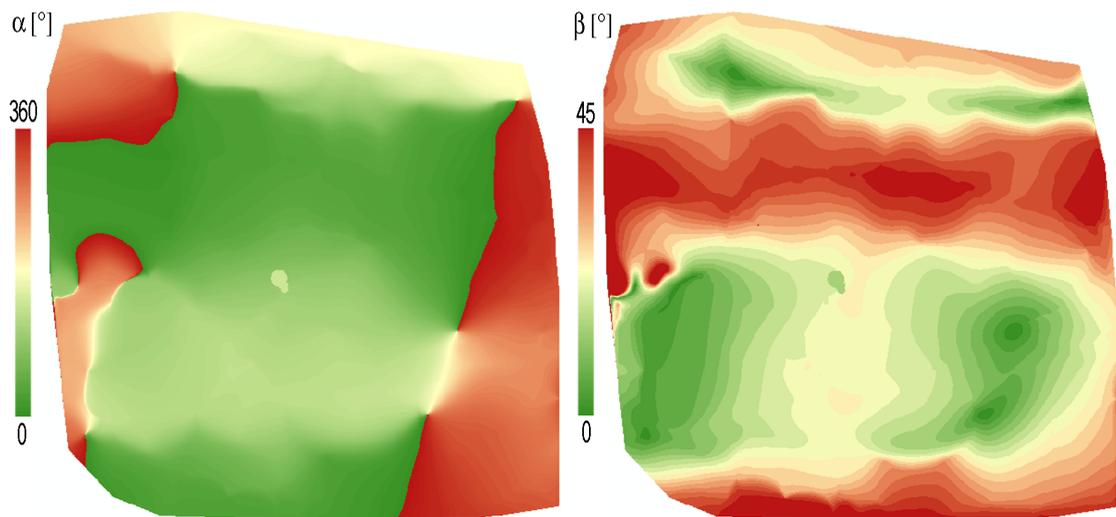


Abbildung 4.34 α, β Raster, Route 2, zweiter Tag (real)

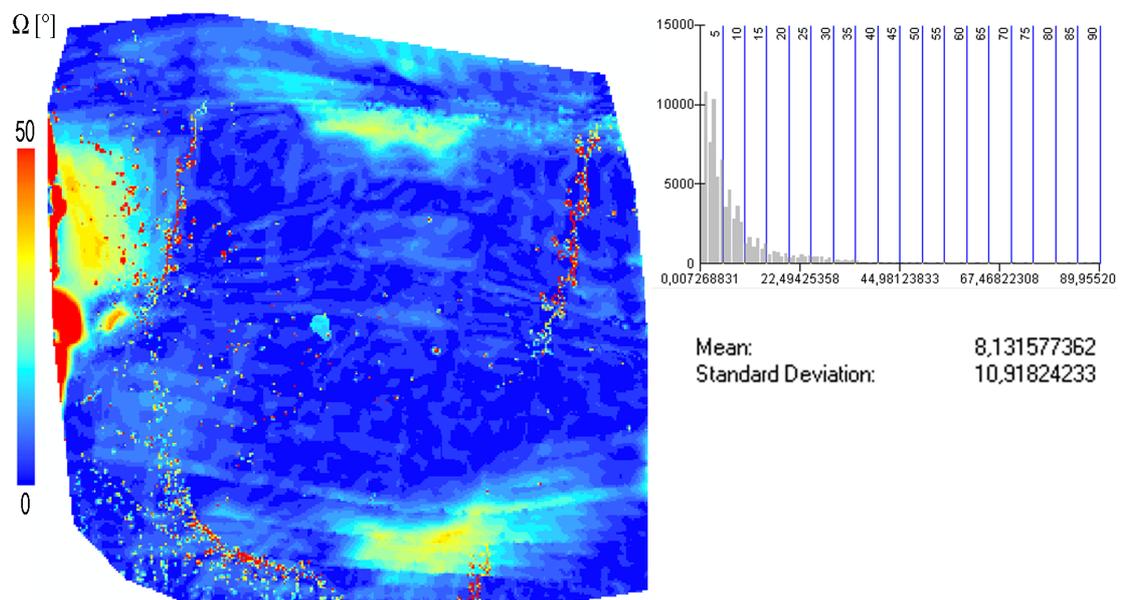


Abbildung 4.35 Winkelfehler, Route 2, zweiter Tag (real)

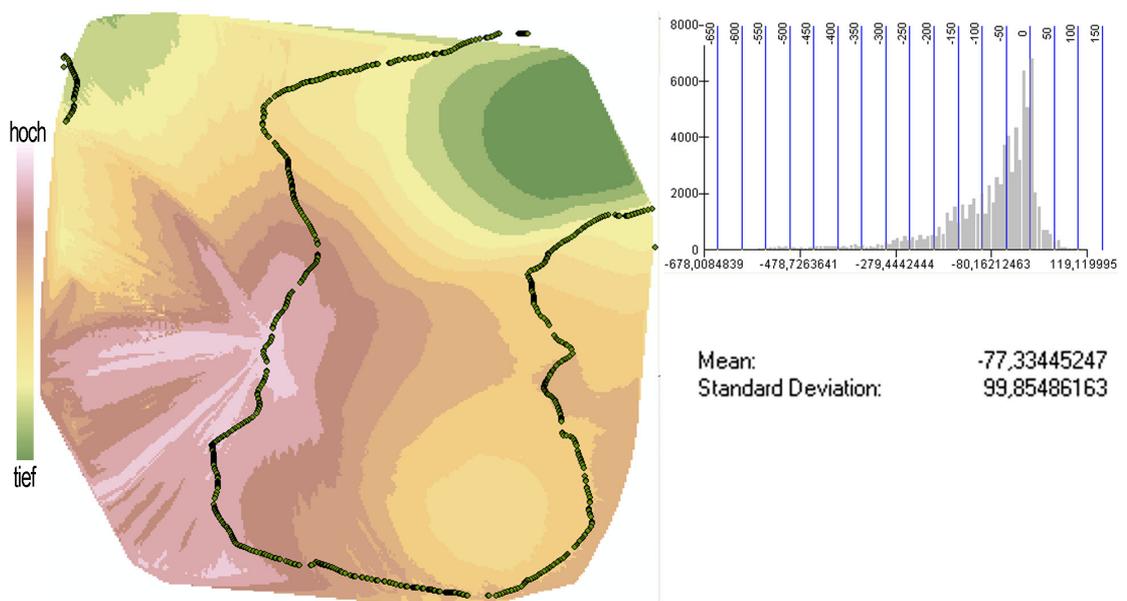


Abbildung 4.36 Idealfläche, Route 2, zweiter Tag (real). Die Punkte stellen die, zur Korrektur, verwendete Ausbisslinie dar.

Ergebnisraster der Berechnungen um den Einflussbereich dieser zwei Stützpunkte (Abbildung 4.37), so zeigen die Statistiken naturgemäß nochmals bessere Anpassung.

Bei der Winkelabweichung Ω liegen zehn Prozent der Rasterzellen unter 1° und knapp 33% unter $2,5^\circ$, was etwa der Messgenauigkeit bei glatten Flächen entspricht. Rund 60% der Rasterzellen zeigen eine Abweichung unter 5° (in etwa Messgenauigkeit bei raueren Schichtflächen).

Die vertikale Abweichung der berechneten Oberfläche der Schichtgleichen von der Modellrealität, die maximale Ausdehnung der Z-Achse des Modells beträgt 1220 Meter, liegt bei etwa 26% der Werte unter einem Prozent (12,2 Meter), bei 43% unter 2,5%, bei 64% unter 5% und bei 83% der Rasterwerte unter 10% Abweichung!

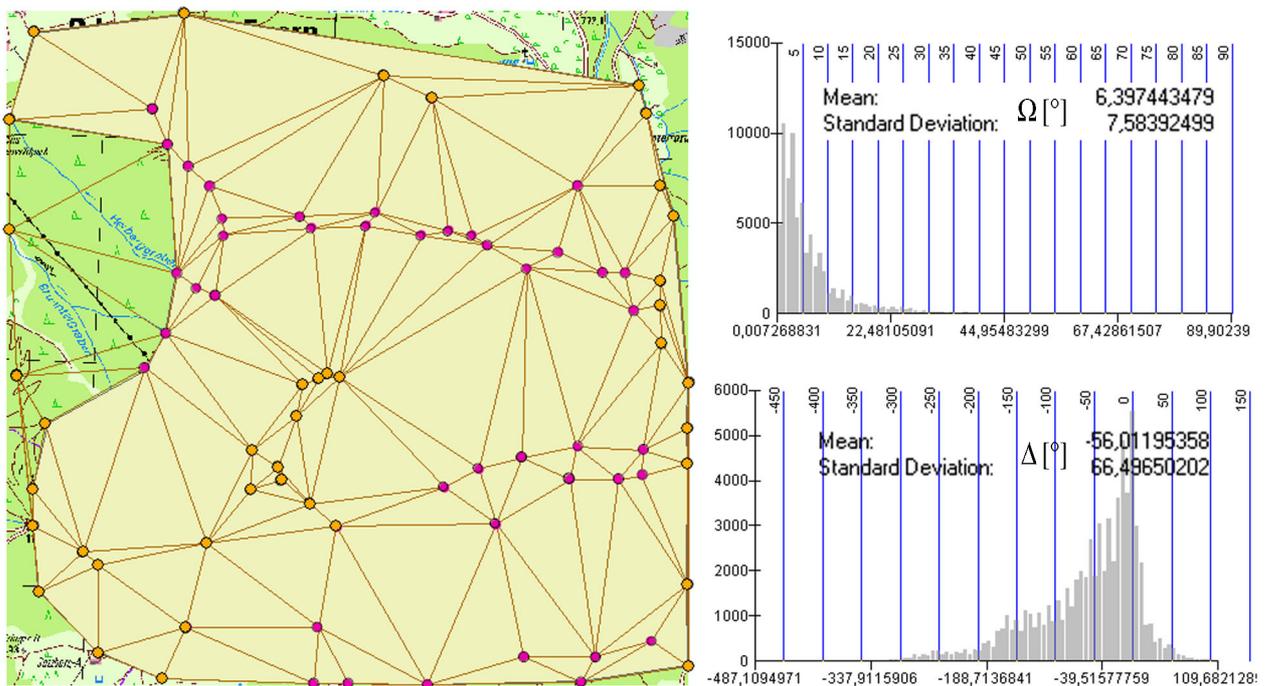
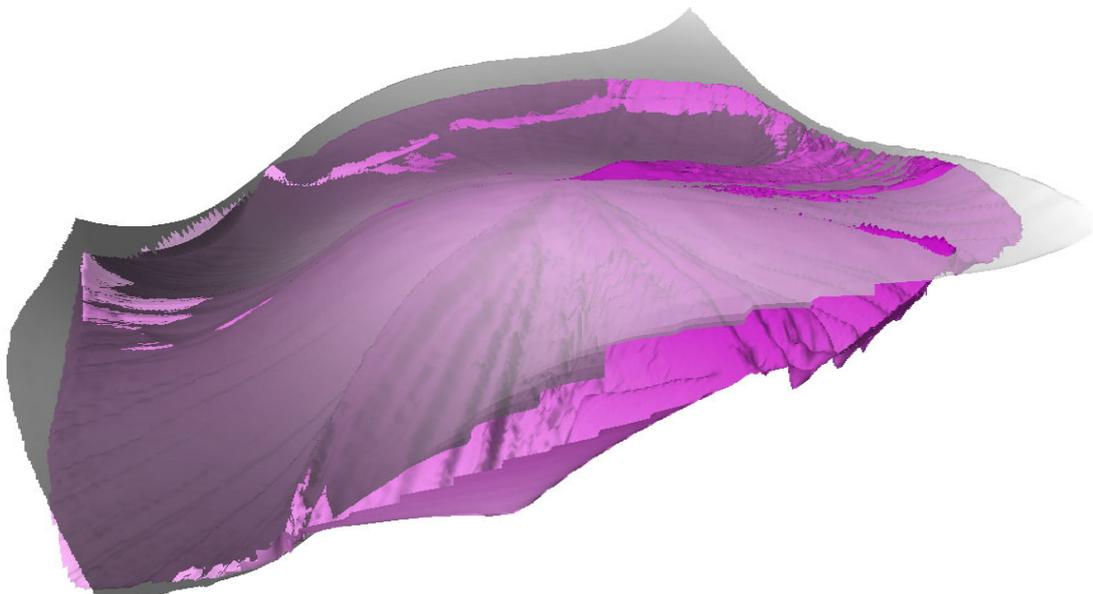


Abbildung 4.37 Beschnittmaske und Statistiken der beschnittenen Flächen.

Abbildung 4.38 3D-Darstellung der berechneten Idealfäche im Vergleich mit der Modellrealität (graue Fläche).





Kapitel 5 Diskussion der Ergebnisse

Die Interpolation und nachfolgende Interpretation der Geländedaten soll eine fortschreitende Planung der Geländearbeit während strukturgeologischer Feldkampagnen optimieren helfen. Die Berechnungen sollen hierzu schon im frühen Stadium des Datensammelns zu einer Interpretation der grundlegenden Faltengeometrie führen, und durch Ausweisung sensibler Bereiche innerhalb der Falten zur Optimierung der weiteren Datenaquise beitragen. Hierbei ist von Bedeutung, dass die Interpretation der gewonnenen Daten nicht selbst einen wesentlichen Zeitfaktor darstellt.

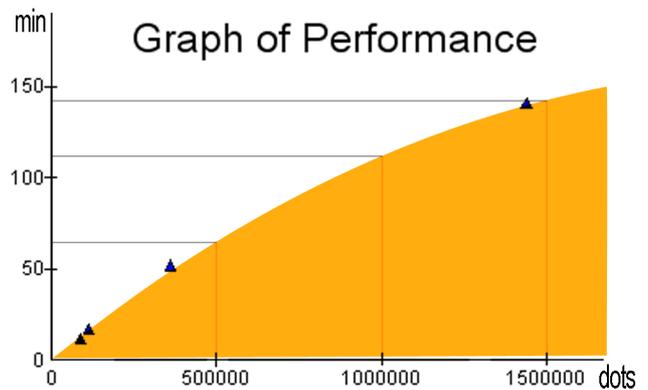
Natürlich müssen die, im Gelände gewonnenen, Stützpunkte zunächst in ein computerlesbares Format gebracht werden, benötigt werden die Raumkoordinaten (X , Y , Z) und die Werte für die Fallrichtung (α) und das Schichtfallen (β). Erstere sind vielleicht direkt aus GPS-Geräten in den Computer zu überspielen oder aber müssen erst aus den Geländekarten ausgelesen werden. Abhängig von der Geländeform, den Aufschlussverhältnissen und der Komplexität der Datennahme ist mit einer Tagesleistung von 30 bis vielleicht maximal 150 Stützpunktdaten pro Feldgeologen zu rechnen. Im Extremfall kann also die Dateneingabe schon gut eine Stunde Zeit in Anspruch nehmen, dies aber wohl in eher seltenen Fällen. Arbeiten mehrere Geologen koordiniert zusammen, dann kommen freilich sehr schnell große Datenmengen zusammen. Und die Berechnungen benötigen auch ihre Rechenzeit.

Deshalb soll an dieser Stelle ein kurzer Überblick über die *Performance* der einzelnen Werkzeuge gegeben werden. Genutzt wurde für vorliegende Arbeit ein Notebook, getaktet mit 2,2 GHz und ausgestattet mit einem Arbeitsspeicher von 512 MB RAM.

Die Werkzeuge teilen sich in drei Subgruppen auf. In der ersten Anwendung arbeiten die Werkzeuge *InnerGrowth_composit* und *ConCalculation* nur mit Vektordaten, wie auch die Werkzeuge *ConvexHull* und *OuterGrowth(b)* der zweiten Anwendung. Obwohl die Berechnungen von Vektordaten durch kompliziertere Topologie langsamer laufen,

brauchen diese Werkzeuge wegen der geringen Punktmengen (<1000 Datentupel) nur wenige Sekunden bis Minuten. Die zweite Gruppe besteht aus Werkzeugen, die nur Rasterdaten verarbeiten. Hierzu zählen die Programme der zweiten Anwendung *SE/delta_dAM_composit* und *Summenraster*. Obwohl hier zuweilen mit sehr großen Rastern gerechnet wird (>1000000 Zellen), hält sich die Verarbeitungszeit mit wenigen Minuten doch noch sehr in Grenzen. Deutlich langsamer arbeiten die Programme, die mit beiden Datenformaten zurechtkommen müssen. Dies liegt hauptsächlich an der hohen Anzahl von Vektordaten, die von den Werkzeugen *Schichtflächen(a)*, *Projection* und *ProjectionIteration* erstellt werden (entsprechend der Anzahl an Rasterzellen!!). Wie aus Abbildung 5.1 zu entnehmen ist, liegen die Rechenzeiten bei einer Menge von etwa einer halben Million Datentupel bei einer Stunde (siehe auch Tabelle 2).

Abbildung 5.1 Abhängigkeit von Rechenzeit und Gebietsgröße, dargestellt anhand des Werkzeugs *Schichtflächen(a)*. Bei zunehmender Größe des Gebietes ist mit Linearität des Zusammenhangs zu rechnen.



Entsprechend der, zur Verfügung stehenden, Rechenzeit und der Gebietsgröße, bestimmt sich die darstellbare minimale Wellenlänge der Falten. Jede Falte besteht quer zu ihrem Streichen aus vier Teilbereichen, begrenzt durch die Mulden- und Sattellinien und die Inflexionslinien. Rechnet man mindestens fünf Pixel zur vernünftigen Darstellung einer dieser Teilbereiche, so werden 20 Zellen pro Wellenlänge benötigt. Eine sehr gute Qualität der Darstellung erhält man bei komplexeren Falten frühestens bei 100 Zellen pro Wellenlänge.

Anzahl der Pixel	Pixel pro Kante	max. n Falten pro Kante	max. n Falten in optimaler Qualität	Rechenzeit der Anwendung I	Rechenzeit der Anwendung II
40.000	200	10	2	2 min	25 min
360.000	600	30	6	3,5 min	80 min
1.440.000	1200	60	12	6 min	250 min

Tabelle 2 Anzahl darstellbarer Falten in Abhängigkeit von Gebietsgröße und verfügbarer Rechenzeit

Sind die Stützpunktdaten im Format X,Y,Z, α , β eingegeben kann mit dem Ablauf der ersten Anwendung begonnen werden.

Für die zweite Anwendung sind weitere Datensätze notwendig. So braucht es für das Werkzeug *Summenraster* ein geeignet großes *flowDirection*-Raster. Dies kann bereits im Vorfeld der Geländetätigkeit angelegt werden. Gleiches gilt für die Datensätze der Ausbisslinien. Diese sind in den geologischen Karten meist schon mit akzeptabler Genauigkeit abgebildet. Die Stützpunkte für die Schichtgleichenkorrektur müssen nur die Raumkoordinaten beinhalten (Format: X, Y, Z). Dabei trägt die Z-Koordinate die Abweichung, um die korrigiert werden soll. Sinnvollerweise erstellt man diesen Datensatz daher mit einem festen Wert (1 oder 0) für die Z-Koordinate und füllt diese dann mit den Werten des Ergebnisrasters des Werkzeugs *Summenraster* auf. Im Gelände gefundene, weitere Stützpunkte der zu modellierenden Schichtfläche können einfach an den Datensatz angehängt werden. Wichtig ist, dass alle Punkte der Schichtgleichenkorrektur auch in die Geländekorrektur der ersten Anwendung mit einfließen, da sonst größere Fehler in den Ausgaberrastern zu erwarten sind.

Der Programmablauf mit all seinen Zwischenschritten ist in Tabelle 3 noch einmal zusammengefasst.

Anwendung I:	Interpolation der Werte für die Fallrichtung und das Schichtfallen	
Inner_Growth_composit	Input: Stützpunktdaten	Output: Tabelle der Vernetzung
Vorbereitung	Stützpunktdaten im Format: X, Y, Z, α , β als Tabelle in GIS einbetten	
Alternativ	<i>Inner_Growth</i> und <i>Inner_Growth_II</i> zur möglichen TIN-Korrektur	
ConCalculation	Input: Tabelle der Vernetzung	Output: Tabelle der berechneten Grundwerte
Vorbereitung	Die anzugebende, gewünschte Zellgröße ist aus programmtechnischen Gründen mit dem Faktor zehn zu multiplizieren.	
Nachbereitung	Visualisieren und Interpretieren der synthetisch berechneten Faltenachsen (! Es treten negative Fallwerte auf; die Werte für α , β sind in RAD angegeben !).	
PostCalculation	Input: Tabelle der berechneten Grundwerte	Output: Raster für die Fallrichtung α und das Schichtfallen β
Vorbereitung	Zur Geländehöhenkorrektur bedarf es ein Raster, das mindestens alle Stützpunkte (auch die Ausbisslinien !) beinhaltet.	
Nachbereitung	Visualisieren und Interpretieren der Ausgaberraster	

Anwendung II	Modellierung der Oberflächen von Schichtgleichen (Idealfäche)	
SE/delta_dAM_composit	Input: Basisdaten, α , β -Raster	Output: vier Δ -Raster für die Richtungen N, O, NO, SO
Vorbereitung	Verwendung des Geländehöhen-korrigierten β -Rasters Z-value Field ist MZ	
Summenraster	Input: Δ -Raster, flow_direction_Raster	Output: Summenraster
Vorbereitung	Der eingesetzte Mittelpunkt muss derselben Schichtfläche angehören, wie nachfolgend zur Korrektur eingesetzte Ausbisslinie; Das flow_direction_Raster muss bereit liegen	
Nachbereitung	Alternative Berechnung weiterer Summenraster mit verschiedenen Mittelpunkten zur genaueren Bestimmung	
ConvexHull	Input: Tabelle mit Korrekturpunkten	Output: Tabelle der Vernetzung, Polygon der convex hull
Vorbereitung	Bereitstellung der Stützpunkte der Schichtgleichenkorrektur im Format: X, Y, Z (das Attribut Z hält den Korrekturwert)	
OuterGrowth(b)	Input: Tabelle der Vernetzung, Polygon, Summenraster	Output: korrigiertes Summenraster
Schichtflächen(a)	Input: α, β -Raster, korrigiertes Summenraster, Raster der Geländehöhenkorrektur	Output: Idealfäche als Raster und Point-Shape
Nachbereitung	Visualisierung und Interpretation der modellierten Oberfläche, auch in 3D	
Anwendung III	Projektion der Ergebniswerte auf gewünschte Oberfläche	
Projektionsfläche	Input: Basisdaten, Projektionsfläche	Output: vorbereitete Projektionsdaten
Anmerkung	Dieses Werkzeug dient zur Vorbereitung von Projektionen auf eine beliebige Fläche. Soll auf das Gelände projiziert werden, braucht es dieses nicht!	
Projection	Input: Idealfäche als Point shape und Raster, Projektionsfläche	Output: vorbereitetes Point shape
Anmerkung	Das Werkzeug im eigenen Ordner starten !	
ProjectionIteration	Input: vorbereitetes Point shape	Output: neues Point shape
Anmerkung	Iterativer Durchlauf, bis das Ergebnis der gewünschten Oberfläche dem Toleranzbereich nahe kommt; jeweils im eigenen Ordner starten; für bessere Performance Ausgaberraster auf Interessensgebiet beschneiden	

Tabelle 3 Ablauf der Interpretation



5.1 Bewertung

Die Berechnungen der vorgestellten Interpretationshilfe gliedern sich in drei Anwendungen. In Erster werden die Werte für die Fallrichtung und das Schichtfallen der gesammelten Stützpunkte flächig interpoliert. Aus den entstehenden Rastern sollen die wichtigen, beschreibenden Bereiche der Faltengeometrie (Sattel- und Muldenlinien und Inflexionslinien) extrahiert werden können, um so den weiteren Verlauf der Feldarbeit zu optimieren.

Sind die Stützpunktdaten gut im Raum verteilt, reichen schon wenige für eine passable Darstellung der Faltengeometrie aus. In den Modellen I und II liegt eine einfache zylindrische Faltung vor. Sie gliedert sich in vier Bereiche (zwei Synformen = Mulden und zwei Antiformen = Sättel). Zur Bestimmung wurden 16 Stützpunkte relativ gleichmäßig im Raum verteilt, also durchschnittlich vier pro Faltendomäne.

In den Modellen III und IV liegt eine kompliziertere, überlagerte Faltung vor. So gibt es etwa Ost-West streichend eine dominante Faltung mit nur einer Sattelstruktur (im Westen) und einer Muldenstruktur (im Osten). Das zweite Faltungsergebnis streicht Nord-Süd und besitzt drei Domänen (Mulde – Sattel – Mulde). Im Wechselspiel entstehen dadurch sechs abgrenzbare Faltungsbereiche. Dort wo jeweils Mulden aufeinandertreffen entsteht eine Senke und dort wo jeweils zwei Sättel aufeinandertreffen entstehen domartige Strukturen. In den Mischbereichen liegt je nach Dominanz der Falten eine verbogene Mulden- oder Sattelstruktur vor. Im Modell III wurde ebenfalls mit durchschnittlich vier Stützpunkten pro Faltungsbereich gearbeitet.

Idealerweise liegen die Stützpunkte entweder auf den Sattel- oder Muldenlinien oder auf den Inflexionslinien. Für ein optimales Modellierungsergebnis braucht es für das Modell I und II also im Profil acht Stützpunkte, jeweils abwechselnd einen auf einer Sattel- oder Muldenlinien und einen auf den dazwischenliegenden Inflexionslinien. Um flächig interpolieren zu können, müssen diese im Raum verschoben verdoppelt werden.

In der komplexen Faltung des Modell III und IV gibt es sechs Schnittpunkte zwischen Sattel- und/oder Muldenlinien und sechs Schnittpunkte unter den Inflexionslinien. Weiterhin gibt es 12 gemischte Schnittpunkte. Bei optimaler Lage sind also 24 Stützpunkte für eine optimale Modellierung notwendig.

Die Bestimmung der Mindestdichte der Stützpunkte erfolgt also aus der Wellenlänge der zu modellierenden Falten. Liegt man aber mit der Beprobung jeweils neben den wichtigen Bereichen der Faltengeometrien, so wird die Modellierung bedeutend schlechter ausfallen.

Hierin liegt die Bedeutung der Anwendung_I. Nach einer ersten Aufnahme von Stützpunkten, die möglichst gut über die Geländefläche verteilt sein sollen, folgt eine Interpretation der Daten zur Planung der weiteren Begehungen. Oftmals sind die Faltenstrukturen nur schwer (wenn überhaupt) aus den Streich- und Fallwerten direkt zu ersehen. Die Anwendung_I unterstützt die Interpretation mit der möglichen Darstellung der synthetischen Faltenachsen und der interpolierten Raster für die Fallrichtung und das Schichtfallen. Die Planung der weiteren Feldarbeit kann präzisiert werden und infolge dessen ist mit einer Optimierung des Zeitbedarf und der Qualität zu rechnen. Die Anwendung_I reagiert jedoch sehr empfindlich auf fehlerhafte Stützpunktdaten. Ebenso schwindet der Nutzen sehr schnell für Bereiche, in denen die Datendichte unter den, oben bestimmten, vier Stützpunkten pro Faltendomäne fällt. Im Vorfeld kann es deswegen nützlich sein, bereits eine Modellierung mit den wenigen Datenwerten aus den geologischen Karten (meist sind Fallrichtungen grobverteilt über die Gebiete angegeben) zu probieren, um bereits die erste Datennahme im Gelände zu optimieren. Hierzu wird die Fallrichtung grob aus den Karten gemessen und für das, meist nicht explizit angegebene, Schichtfallen ein Schätzwert (mit Maximum von vielleicht 45°) angenommen.

Je genauer die Darstellung der Faltengeometrien erfolgen soll, umso öfter sollte als Schritt zwischen den Begehungen eine Interpolation mit der Anwendung_I erfolgen, denn mit jedem neuen Stützpunkt können die wichtigen Bereiche der Faltengeometrien genauer lokalisiert werden.

Neben fehlerhaften Stützpunktdaten sind das Einbringen von Werten überkippter Falten-schenkel (Einschränkung durch 2,5D GIS) oder das Interpolieren über Störungen hinweg weitere Fehlerquellen.

Werden diese Einschränkungen jedoch beachtet, so kann die Anwendung_I einen hilfreichen Beitrag bei der Interpretation der Daten leisten. So können Zusammenhänge

schneller erkannt und fehlerhafte Werte, so wie Diskontinuitäten aufgedeckt werden. Zudem dauert die Berechnung, abgesehen von der Dateneingabe, nur wenige Minuten.

Die Anwendung_II ist konzipiert zur Modellierung einer beliebigen Grenzfläche in der Faltengeometrie aus den Ergebnisdaten der Anwendung_I. Die berechnete Idealfläche kann eine weitere Interpretationshilfe darstellen, so wie auch eine 3D-Darstellung dieses Höhenmodells.

Die Berechnungen dauern allerdings bedeutend länger als die der ersten Anwendung und bedürfen zudem der Bereitstellung von Korrekturdaten. Sind diese jedoch bereits im Vorfeld angelegt worden, so kann die Modellierung einer solchen Idealfläche eine sinnvolle Ergänzung zur Interpolation der Werte für die Fallrichtung und das Schichtfallen sein.

Eigentlich sollte diese Anwendung auch der Visualisierung zur Kommunikation schwieriger Sachverhalte dienen, doch fällt das Ergebnis meist sehr unruhig aus, so dass es weiterer Nachbearbeitung bedarf, bevor eine klare Faltenfläche dargestellt werden kann.

Die Anwendung_III soll die modellierte Fläche einer Faltengeometrie wieder auf die Kartengrundlage (oder eine andere beliebige Fläche) projizieren. Da das Höhenmodell der Idealfläche aber durch fehlerhafte Interpolation extrem viele lokale Abweichungen enthält, fallen die berechneten Werte für die Fallrichtung und das Schichtfallen trotz der Korrektur durch die Ausbisslinien oft schlecht aus, so dass die projizierten Werte die Realität ungenauer abbilden, als die ursprüngliche Interpolation durch die erste Anwendung.

Die Anwendung der Projektionswerkzeuge ist deswegen nur zu empfehlen, wenn mehrere horizontale Geländeschnitte erstellt werden sollen, mit welchen der räumliche Verlauf der Faltengeometrie untersucht werden soll. Aber auch hierfür sollte die Idealfläche vorher geglättet werden.

Zusammenfassend ist die Anwendung_I als Hilfestellung zur Interpretation komplexerer Faltengeometrien durchaus zu empfehlen. Die einfache Handhabung und geringen Rechenzeiten ermöglichen einen mobilen Einsatz im Gelände. Während die Darstellung der synthetischen Faltenachsen und der Stützpunkte bei der Interpretation dem Geologen noch strukturgeologischen Sachverstand abverlangen, sind die Ergebnisraster für die Fallrichtung und das Schichtfallen sehr einfach zu lesen. Ist die ursprüngliche Datenlage gut, so können leicht die Schwerpunkte der noch erforderlichen Datennahme ausgemacht

werden. Besonders die Möglichkeit fehlerhafte Stützpunkte oder verborgene Störungen auszumachen, rechtfertigt den Zusatzaufwand. Reichen diese Interpretationshilfen nicht aus, so kann mit mäßigem, weiteren Zeitaufwand ein modelliertes Höhenmodell der Faltengeometrien durch die Anwendung_II erstellt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Raumlage der, später zur Korrektur herangezogenen, Stützpunkte der Schichtgleichen (Ausbiss) bereits in der ersten Anwendung im Werkzeug *PostCalculation* als Geländehöhenkorrektur Einzug halten. Sonst ist diese Geländehöhenkorrektur, außer bei extremer Abweichung des Geländes von der interpolierten Z-Fläche der Stützpunkte in Schluchten oder Steilwänden, vernachlässigbar.

Als Ergebnis der Anwendung_II entsteht ein Raster mit den Z-Werten der modellierten Schichtfläche. Diese zeigt in der einfachen, planaren Darstellung die Geometrien der Falten und ist genauso intuitiv zu lesen wie eine normale Geländeoberfläche. Zudem kann sie in ArcScene dreidimensional dargestellt werden.

Die Anwendung_III ist für die, der Arbeit zugrunde liegenden, Aufgabenstellung in der derzeit vorliegenden Form weitgehend unbrauchbar.

Bei entsprechender Vorarbeit (Bereitstellung der Stützpunkte der Schichtgleichen und eines *flowDirection*-Rasters für Anwendung_II) sind die ersten beiden Anwendungen nach der Geländetätigkeit je nach Geländegröße und gewünschter Auflösung (Tabelle 2) in etwa ein bis zwei Stunden durchführbar. Durch gezielte Planung der weiteren Begehung im Gelände kann dieser Aufwand sich durch Zeiteinsparungen oder Qualitätssteigerung jedoch hoch bezahlt machen.



5.2 Ausblick

Ein kritischer Faktor bei der Nutzung der ersten Anwendung ist die notwendige Datendichte. Primär fließen in die Berechnungen immer nur zwei Stützpunkte ein, die auf den Kanten der Dreiecksvermaschung liegen. Zwischen den Kanten kommen indirekt drei Stützpunkte zur Geltung. Wie man aber leicht an einer zylindrischen Falte erkennen kann, besitzen die Streich- und Fallwerte eine hohe Korrelation in Richtung der Faltenachse. In diesem synthetischen Fall ist diese Korrelationslänge sogar unendlich. Ein jeder Stützpunkt kann somit entlang der Faltenachse in alle Berechnungen mit einfließen. Natürlich sind die Falten in der Natur zumeist nicht zylindrisch und ändern ihre Form in Streichrichtung der Faltenachse, doch ist diese Veränderung kontinuierlich und in unmittelbarer Umgebung kann eine Korrelation der Faltung in Richtung der Faltenachse angenommen werden. Wäre es möglich, korrelierte Wertepaare in die Berechnungen einzugliedern, so vervielfachte sich die Anzahl der zur Verfügung stehenden Stützpunkte.

Nach der Dreiecksvermaschung des Werkzeugs *InnerGrowth_composit* und die Berechnung der synthetischen Faltenachsen zwischen den kantenbesetzenden Datenpaaren, müsste zunächst eine Interpolation der Werte für die Fallrichtung und das Fallen der berechneten Faltenachsen erfolgen. Jeder Stützpunkt erhielte hierauf eine Polylinie, die dem Lauf der Faltenachsen für eine bestimmte Korrelationslänge folgte. Einfache Verschneidung mit den Kanten der Dreiecksvermaschung entdeckte die zur Berechnung zusätzlich heranzuziehenden Stützpunkte (Abbildung 5.2). Die Korrelationslänge könnte sowohl als Fixwert oder abhängig vom orthogonalen Abstand der kantenbesetzenden Stützpunkte (Abstand im Profil!) in die Berechnung einfließen. Dabei müsste der sekundäre Stützpunkt in die Profilebene der primären Stützpunkte überführt werden. Sind solcherart die Kanten neu besetzt, könnte die Anwendung *_I* mit dem herkömmlichen Verlauf erneut gestartet werden. Schätzungsweise ist mit einer Verfünffachung des Zeitaufwands zu rechnen.

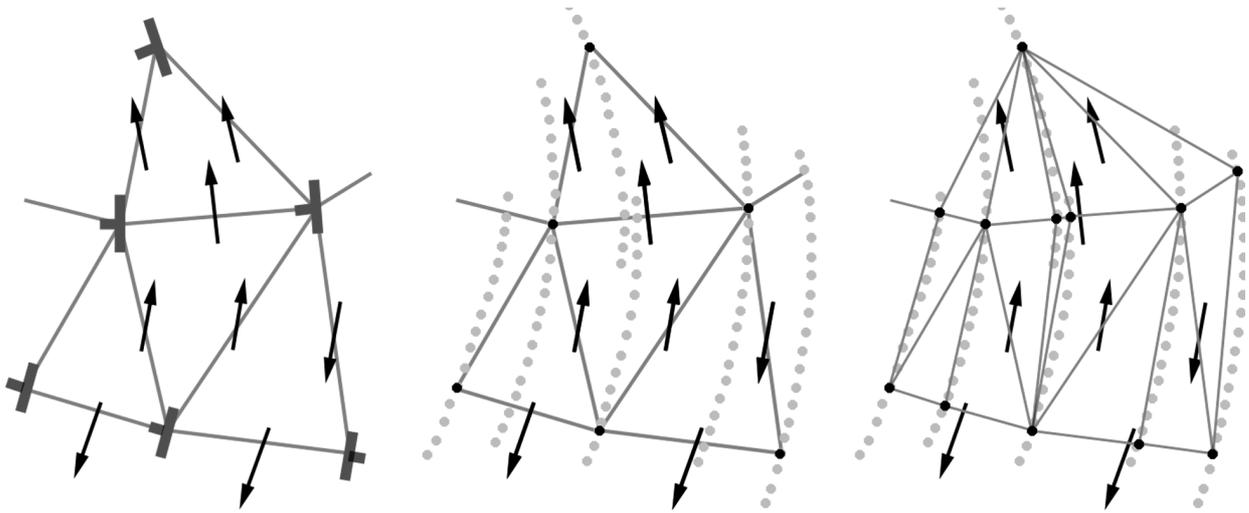


Abbildung 5.2 Sekundäre Stützpunkte durch Berücksichtigung der Korrelationslänge **a)** Datenbasis, Dreiecksvermaschung und synthetische Faltenachsen. **b)** Migration der Datenbasis entlang des Streichens der Faltenachsen maximal um die Korrelationslänge. **c)** Bei Schnitt mit der Dreiecksvermaschung entstehen neue, sekundäre Stützpunkte. Die erweiterte Datenbasis führt zu einer neuen Vermaschung.

Eine weitere Möglichkeit die Ergebnisse der ersten Anwendung zu verbessern, ist die Einbeziehung eines Prüfkriteriums, das die Orthogonalität von Streichen und Fallen während der Berechnungen der α - und β - Raster überprüft und korrigiert.

Auf einer natürlichen Oberfläche stehen die Richtungen der Horizontalen und des maximalen Gefälles immer senkrecht zueinander. Bei der Berechnung der Raster für die Fallrichtung und das Schichtfallen gilt dies jedoch nur für den jeweiligen Rasterpunkt. Die Nachbarschaft fließt nicht in die Berechnung ein. So kann es geschehen, dass die Werte für das Schichtfallen entlang ihres Streichens (Horizontale auf einer Oberfläche) variieren. Eine Korrektur schon in diesem Stadium der Berechnungen würde die Qualität der entstehenden α - und β - Raster bedeutend verbessern.

Der kritische Werte des Schichtfallens könnte im MovingWindow durch seine Nachbarn angepasst werden. Hierzu müsste zunächst ein *flowDirection*-Raster aus den Werten für die Fallrichtung gewonnen werden. Anschließendes selektives, positives und negatives Verschieben der β -Raster orthogonal zu der angegebenen Richtung um jeweils eine Rasterzelle ergäbe die gesuchte Nachbarschaft. Ob nun der Durchschnittswert oder das Maximum der, zur Auswahl stehenden, Werte das beste Ergebnis liefert, und welcher Kernel, müsste ausprobiert werden.

Wird dieser Fehler nicht ausgeglichen, so pflanzt er sich in die Anwendung_II fort. Über die Berechnung der Δ -Raster im Werkzeug *SE/delta_dAM_composit* und deren Summation im Werkzeug *Summenraster* führt er zu dem Phänomen, dass die zurückzulegenden Höhen auf einer Oberfläche vom Weg abhängen! Dies kann natürlich nicht

sein, da unabhängig vom Weg die Höhendifferenz zwischen dem Start- und Endpunkt immer gleich zu sein hat. Bemerkbar macht sich dies in der Form der berechneten Idealfläche. Ausgehend vom Mittelpunkt der Summation (Werkzeug *Summenraster*) laufen radial verschiedene Höhenpfade nach außen. Dabei verstärken sich vorkommende Unterschiede zu muschelförmigen Rippen (Abbildung 5.3). Diese verzerren die tatsächliche Faltengeometrie und erschweren eine Interpretation. Zur Glättung gibt es mehrere mögliche Ansätze.

Zum Einen kann natürlich das Z-Raster mit dem Werkzeug *FocalStatistic* (Spatial Analyst Tools → Neighborhood → Focal Statistics) im MovingWindow durch eine Mittelwertsbildung geglättet werden. Auch die Bestimmung der jeweiligen Minimal- oder Maximalwerte ist möglich. Die Art der Berechnung sollte sich nach der dargestellten Faltendomäne (Mulde = Minimalwert oder Sattel = Maximalwert) richten. So werden die lokal größer ausgefallenen Werte für das Schichtfallen unterstützt, was dem systematischen Fehler bei der Berechnung in Anwendung_I entgegenwirkt.

Eine weitere Möglichkeit die Unebenheiten möglichst gering zu halten ist die statistische Zusammenführung von Summenraster verschiedener Mittelpunkte. Weiterhin kann man versuchen eine Trendfläche oder einen *Spline* durch die Höhenpunkte der Fläche zu legen. Erst wenn eine vernünftige Darstellung des Höhenmodells der Idealfläche erreicht wird, kann eine Rückprojektion auf die Geländeoberfläche zusätzliche Qualität in der Darstellung der Raster für die Fallrichtung und das Schichtfallen bringen.

Die Anwendung_III entfällt somit für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit.

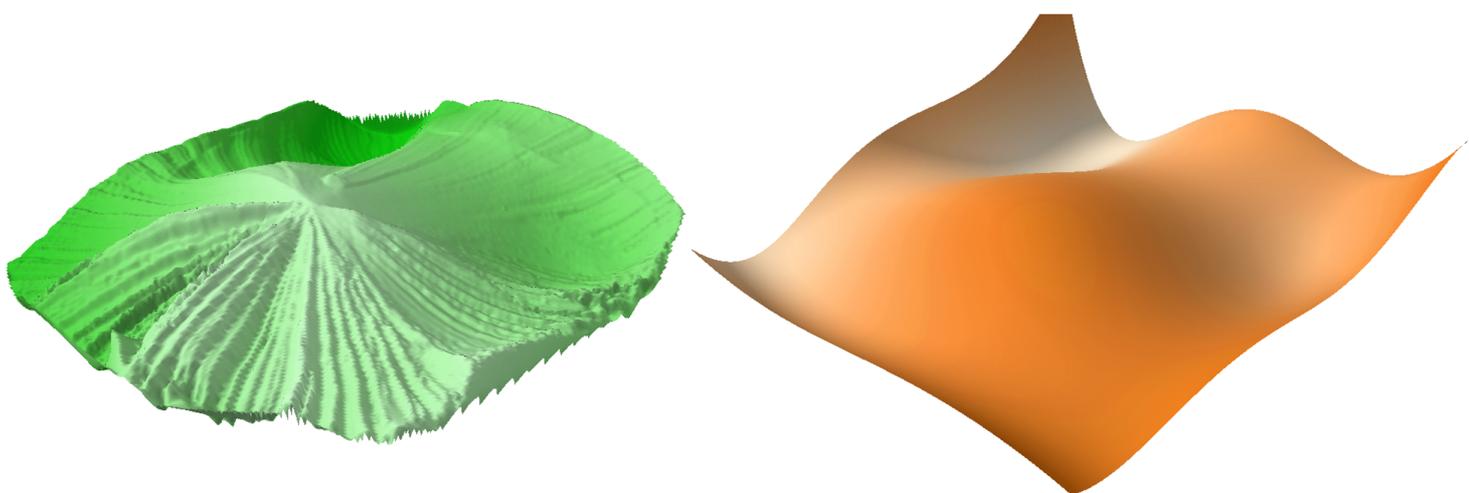


Abbildung 5.3 Glättung der Idealfläche a) Endergebnisraster des Modell IV. Deutlich sichtbar sind die radialen Strahlen unterschiedlicher Summierung durch fehlerhafte Interpolation der α, β -Raster der Anwendung I b) Die Idealfläche des Modell IV geglättet durch Abbildung des Trends fünften Polynoms. Das Ergebnis scheint optimal geglättet, doch liegt die unbearbeitete Idealfläche, vor allem mit den erhöhten Rippen, näher an der Modellrealität (Abbildung 4.38).

Abgesehen von den hier genannten Verbesserungsvorschläge sollte untersucht werden, welche Muster auftreten, wenn unkorrelierte Daten, wie zum Beispiel von verschiedenen Seiten einer unentdeckten Störung, modelliert werden. Sollten die ergebenden Fehlermuster über bestimmte Kriterien sicher interpretierbar sein, so könnten störende Einflüsse schon während der Geländearbeit beseitigt werden, beziehungsweise die Art und Geometrie möglicher Störungen aufgedeckt werden, die sonst nicht oder erst bei der Nachbearbeitung der Daten auffallen.

Weitere Erleichterung in der Anwendung kann sicherlich noch erreicht werden, wenn die verschiedenen Werkzeuge zusammengefasst und so mit einmaligem Start alle Berechnungen durchgeführt werden würden.

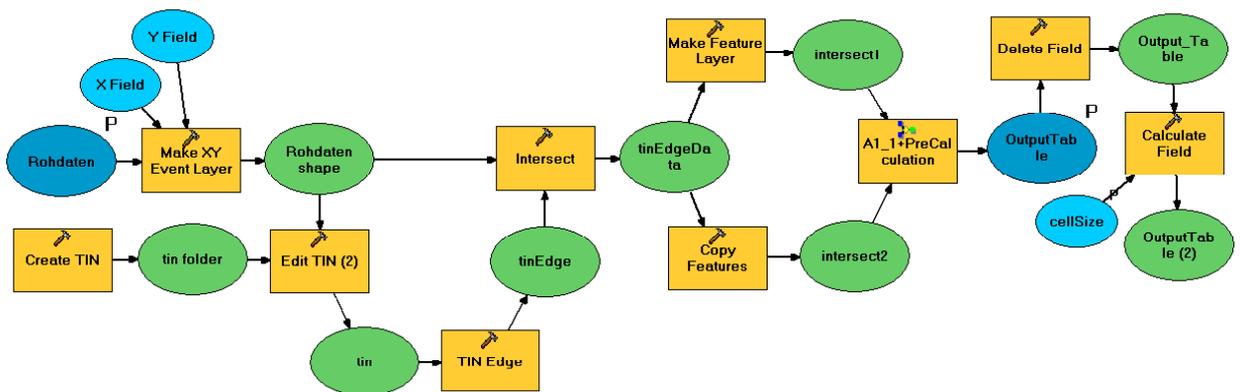
Da die vorliegenden Werkzeuge und Anwendungen nur für die Unterstützung während der Geländetätigkeit gedacht sind und nicht für eine spätere, genauere Datenanalyse und deswegen bewusst einfach gehalten sind, spielen weitere Verbesserungen keine bedeutende Rolle. Hauptaugenmerk wurde auf eine gute Performance und leichte Interpretierbarkeit der Ergebnistraster gelegt, so dass eine Anwendung während der Geländetätigkeit schnell und möglichst unkompliziert ablaufen kann. Dafür muss man viele schwerwiegende Einschränkungen in Kauf nehmen, wie zum Beispiel die Beschränktheit auf 2,5D und somit Ausschluss der Modellierung überkippter Falten, die Beschränkung auf Modellierung direkt korrelierter Daten und damit Verlust von Informationen über Störungen hinweg und einem einfachen mathematischen Ansatz, der natürlich nur sehr grob die Natur abbilden kann.

Literatur- und Quellenverzeichnis

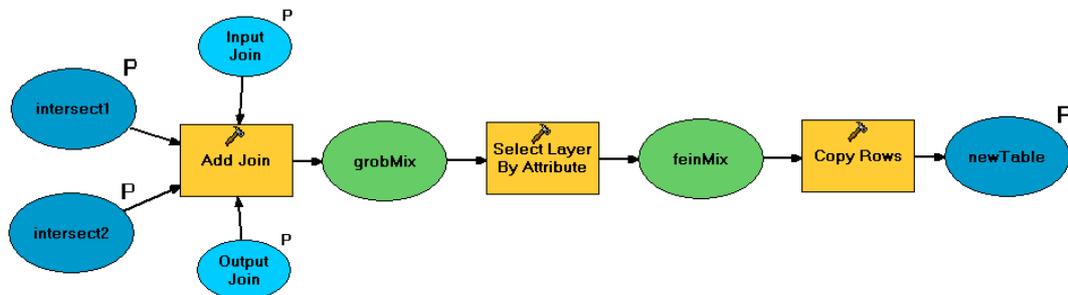
- Atsushi, K. et al. (2004) : Three-dimensional Geological Modeling by FOSS GRASS GIS – Using Some Field Survey Data -, Proceedings of the FOSS/ GRASS Users Conference, Bangkok 2004,
<http://gisws.media.osaka-cu.ac.jp/grass04/viewpaper.php?id=13>,
16.05.2007
- Bartelme, N. (1995): Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen, Springer-Verlag, Berlin, 414 S.
- Bombien, H. et al. (Personenkreis 3D der BIS-Steuerungsgruppe) (2004) : Wege zur 3D-Geologie,
http://www.infogeo.de/infogeo/pdf_pool/PK3D_Veroeff_v2_2.pdf,
16.05.2007
- Caumon, G., Mallet, J.L. (2006): 3D Stratigraphic models: representation and stochastic modelling, Int. Assoc. for Mathematical Geology, XIth International Congress, Belgium 2006 (IAMG'06),
http://www.gocad.org/www/research/articles/2006/Caumon_2/IAMG06_S14_08.pdf,
16.05.2007
- deKemp, E.A. (2000): Three Dimensional Projection of Curvilinear Geological Features through Direction Cosine Interpolation of Structural Field Observations, Computers and Geosciences, V.24, S.269-284
- deKemp, E.A. et al. (2004): Interpretive Geology with Structural Constraints: An introduction to the SPARSE[®] plug-in,
http://www.earthdecision.com/news/white_papers/SPARSE_houston_2004.pdf,
16.05.2007
- Eisbacher, G.H. (1996): Einführung in die Tektonik, -Enke, Stuttgart, 374 S.
- Fernández, O. et al. (2004): Three-dimensional reconstruction of geological surfaces : An example of growth strata and turbidite systems from the Ainsa basin (Pyrenees, Spain), AAPG Bulletin, V.88, Nr. 8 (August 2004), S. 1049-1068
- Fisher, T.R., Wales, R.Q. (1992): Three Dimensional Solid Modeling of Geo-Objects Using Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS), in: Turner, A.K. (Hrsg.): Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, -NATO ASI 354, Dordrecht, S. 85-105
- Geodes, Computational Geology, <http://www.cgeology.com/>, 16.05.2007
- GoCAD, Association Scientifique pour la Geologie et ses Applications (ASGA),
<http://www.gocad.org/www/>, 16.05.2007,
kommerzieller Vertrieb durch Earth Decision Science company,
<http://www.earthdecision.com/>, 16.05.2007

- Görösi, I. (2001): Interpretation and 3D CAD visualisation of subsurface geology, <http://www.uni-tuebingen.de/geo/msc-aeg/pdf/1999/gyorosi.pdf>, 16.05.2007
- GRAPE – Graphics Programming Environment, Sonderforschungsbereich 256 der Universität Bonn, <http://www.iam.uni-bonn.de/grape/>, 16.05.2007
- Kelk, B. (1992): 3-D Modeling with Geoscientific Information Systems: The Problem, in: Turner, A.K. (Hrsg.): Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, -NATO ASI 354, Dordrecht, S. 29-37
- LithoTect, Geo-Logic Systems, <http://www.geologicsystems.com/products.litho.overview.html>, 16.05.2007
- Mallet, J.L. (1992): GoCAD: A Computer Aided Design Program for Geological Applications, in: Turner, A.K. (Hrsg.): Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, -NATO ASI 354, Dordrecht, S. 123-141
- Mallet, J.L. (2002): Geomodeling, Oxford University Press, 599 S.
- McClay, K.R. (1987): The Mapping of Geological Structures, Geological Society of London Handbook, -John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 161 S.
- Meschede, M. (1994): Methoden der Strukturgeologie, -Enke, Stuttgart, 169 S.
- Möbus, G. (1989): Tektonik – Eine methodische Einführung für Studium und Praxis, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 472 S.
- Murawski, H. (1992): Geologisches Wörterbuch, -Enke, Stuttgart, 254 S.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I. (1983): Modern Structural Geology, Volume1: Strain Analysis, -Academic Press, London, 307 S.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I. (1987): Modern Structural Geology, Volume2: Folds and Fractures, -Academic Press, London, S. 308-700
- Siehl, A. (1993): Interaktive geometrische Modellierung geologischer Flächen und Körper, in: Die Geowissenschaften, Heft 10-11, S. 342-346
- Yamamoto, K., Nishiwaki, N. (1993): Automatic Analysis of Geological Structure from Dip-Strike Data, in: Mathematical Geology, V.25, S.819-832

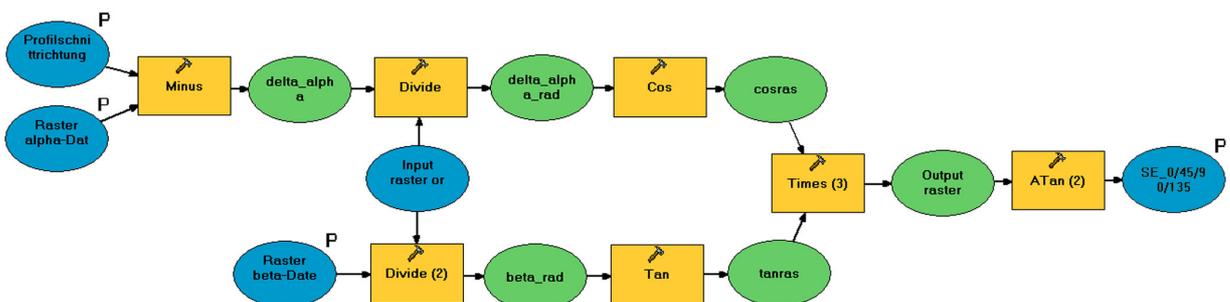
Anhang Ablaufdiagramm der Werkzeuge



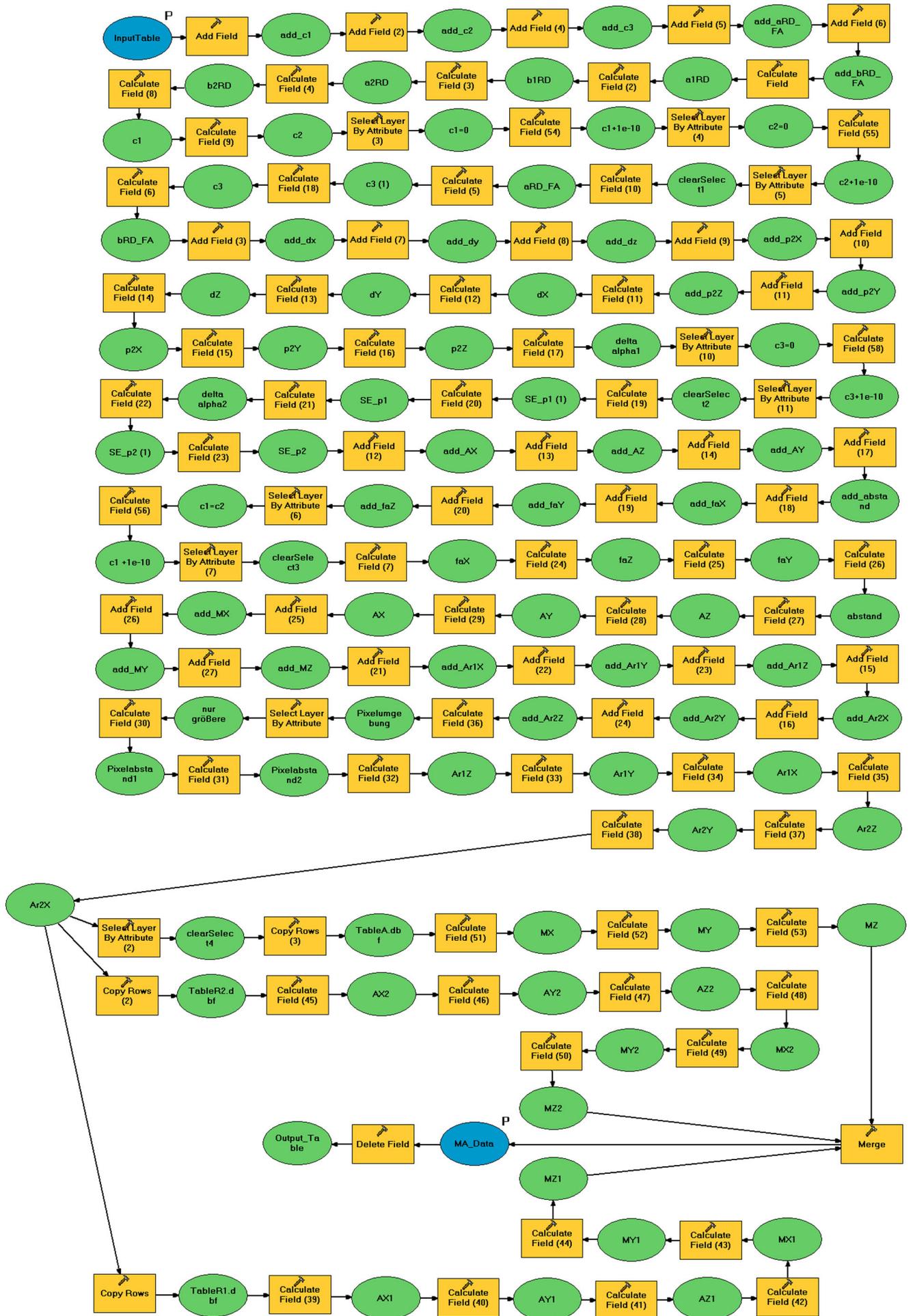
InnerGrowth_composit Im linken Teil sorgt Verschneidung der TIN-Kanten mit den Basisdaten der Dreiecksvermaschung zur Identifikation der Punkte mit anliegender Vernetzung. Im rechten Teil wird der verdoppelte Datensatz gefiltert (*PreCalculation*) und die entstehende Tabelle bereinigt.



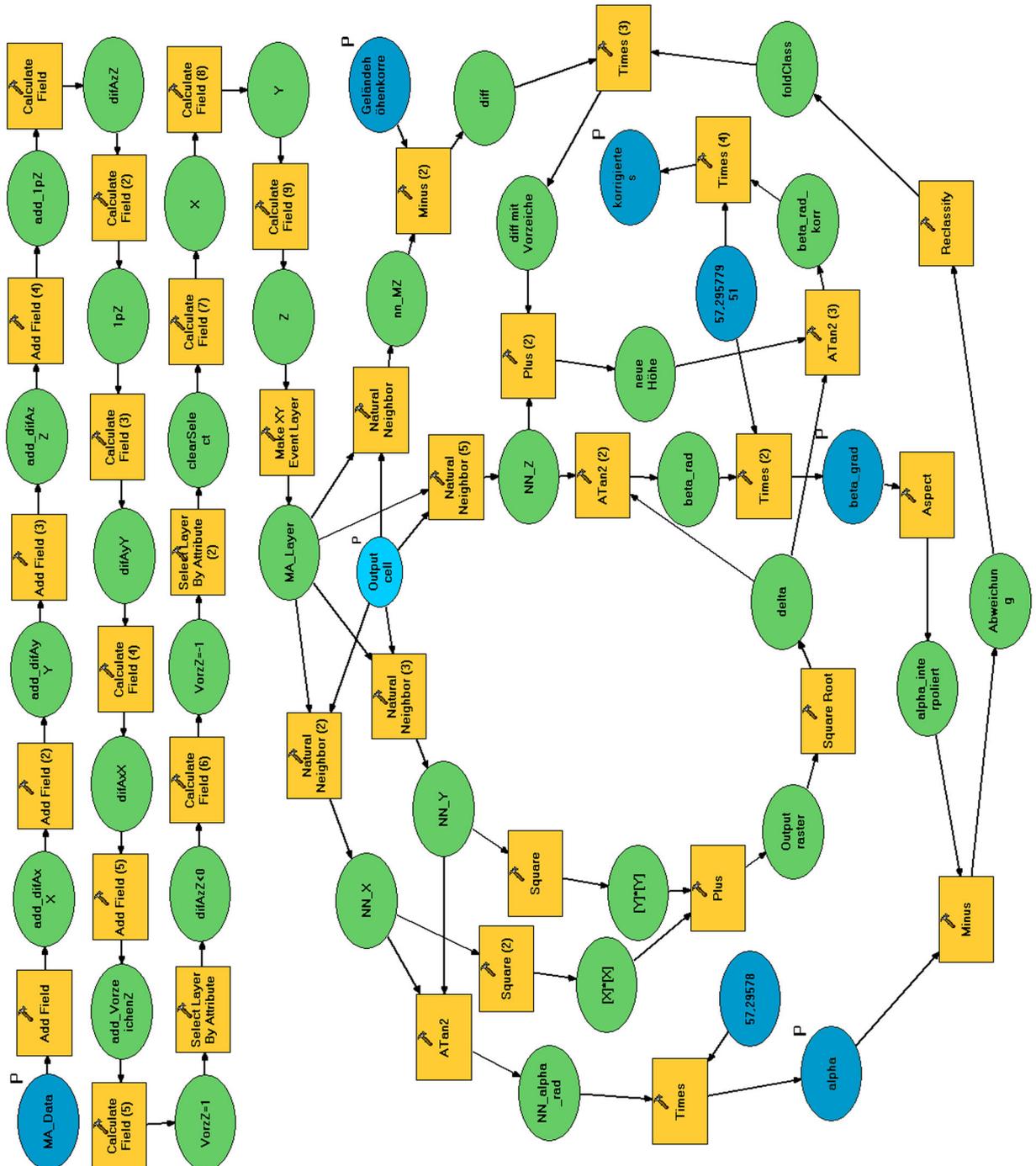
PreCalculation (aufgerufen aus *InnerGrowth_composit*) Die Datensätze werden so zusammengeführt, dass jeweils die Endpunkte der TIN-Kanten ein Datentupel bilden.



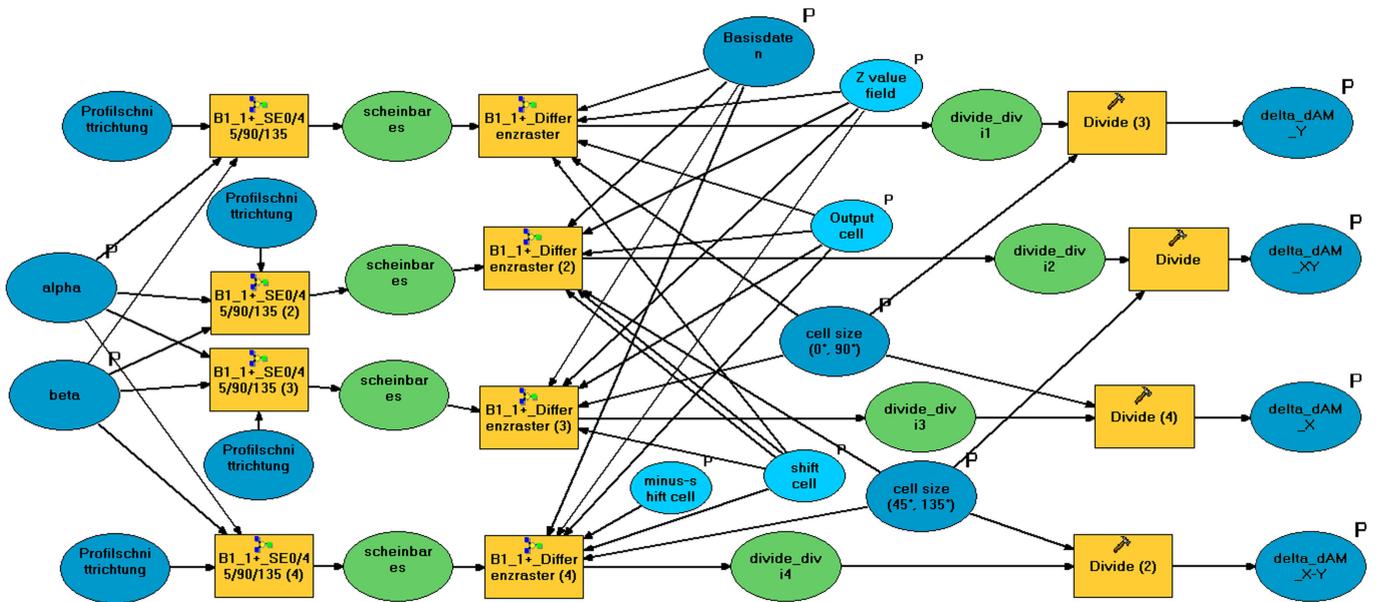
SE0/45/90/135 (aufgerufen aus *SE/delta_dAM_composit*) Trigonometrische Berechnung des scheinbaren Einfallens (SE) für vertikale Geländeschnitte.



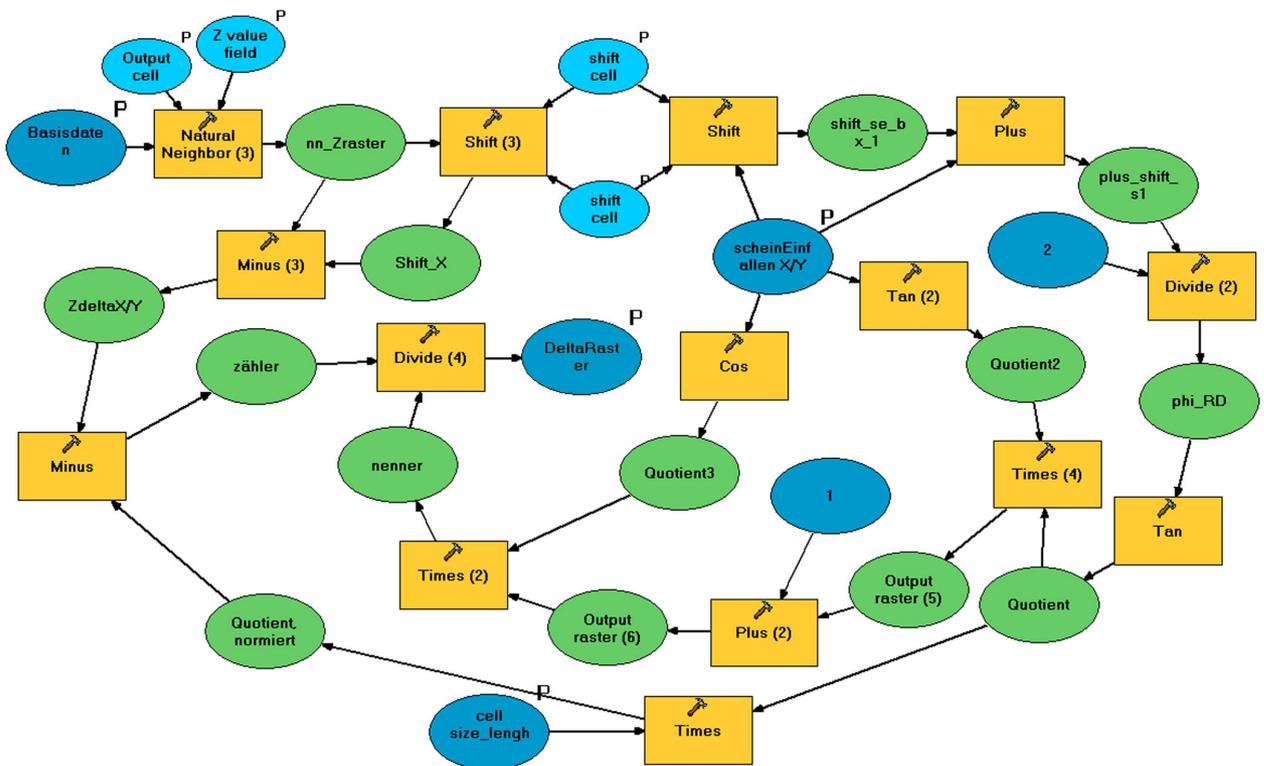
Vorherige Seite: ConCalculation Im oberen Teil erfolgt die Berechnung der notwendigen Grundwerte für die Interpolation der Anwendung I. Im unteren Teil werden pro TIN-Kante drei Stützpunkte generiert (Mitte und randlich), deren Attribute genormt und zu einer Tabelle zusammengeführt und diese bereinigt.



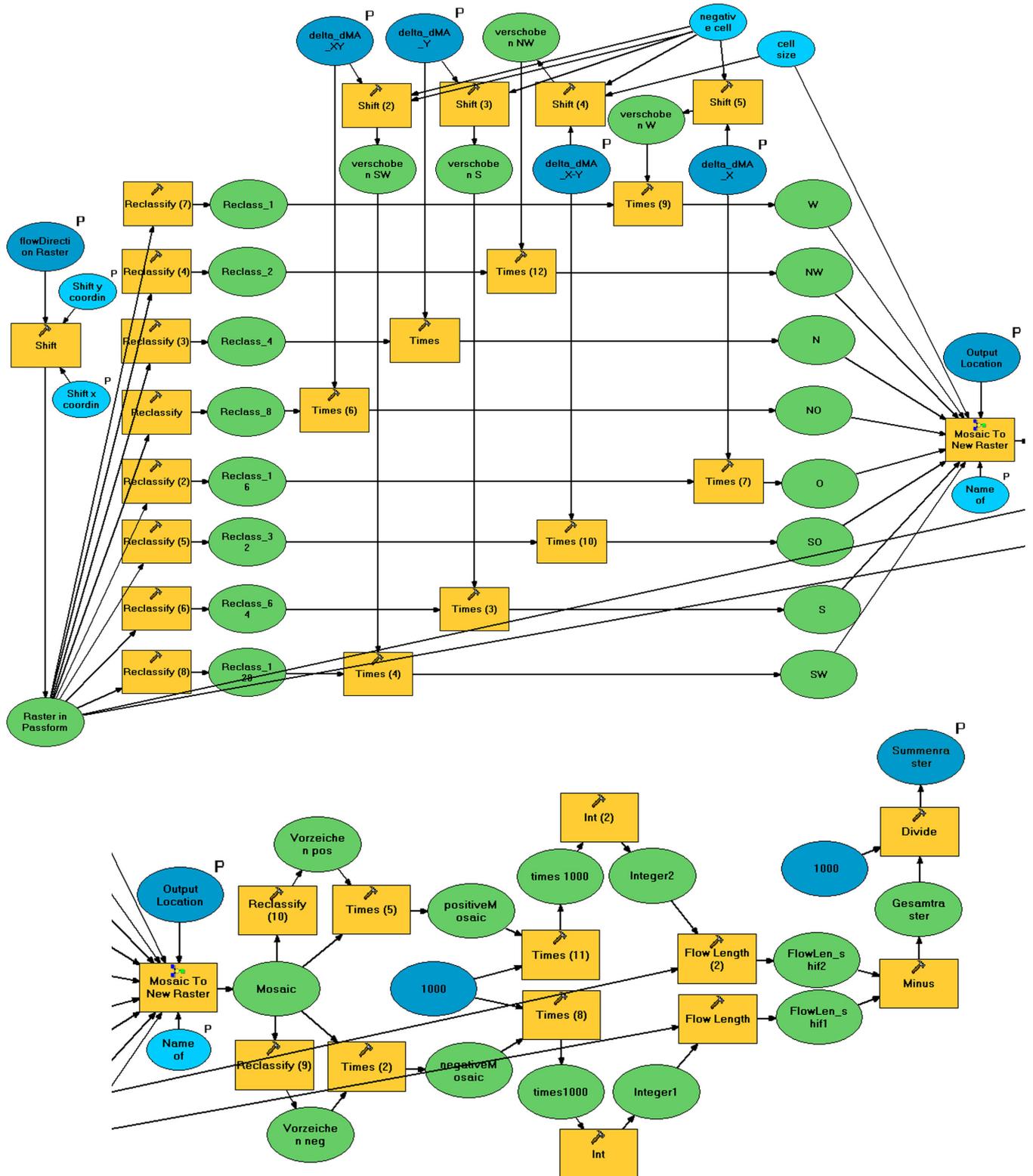
PostCalculation Nach abschließenden Berechnungen im oberen Teil beginnt die Interpolation der Fallrichtung und des Schichtfallens mit Übergang in die Domäne der Rasterdaten. Trigonometrische Berechnungen ergeben die α, β -Raster, aus denen flächig eine Faltenklassifikation abgeleitet wird, die als Basis der Geländehöhenkorrektur dient und ein korrigiertes Raster für das Schichtfallens ergibt.



SE/delta_dAM_composit Im ersten Abschnitt wird durch Aufruf des Werkzeugs SE0/45/90/135 das scheinbare Einfallen in vier Himmelsrichtungen bestimmt (O, SO, S, SW). Mit Aufruf von *Differenzraster* werden in diesen Richtungen die Unterschiede benachbarter Pixel bezüglich ihrer Schichtzugehörigkeit (Mächtigkeitsabstand) bestimmt. Abschließend werden die Raster durch Division mit der Zellgröße in Profiltrichtung auf nachfolgende Summation vorbereitet.

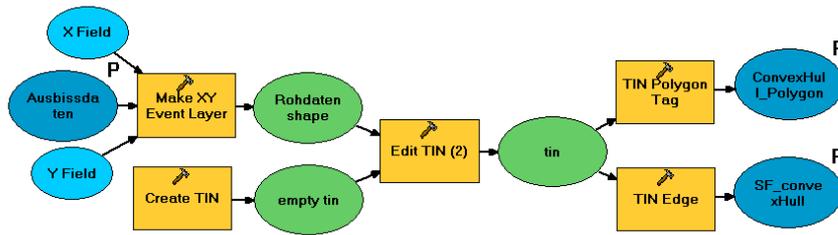


Differenzraster (aufgerufen aus SE/delta_dAM_composit) Durch shift der Raster in die Richtung der Profilschnitte werden die jeweils nächsten Nachbarzellen der Berechnungen zugänglich gemacht.

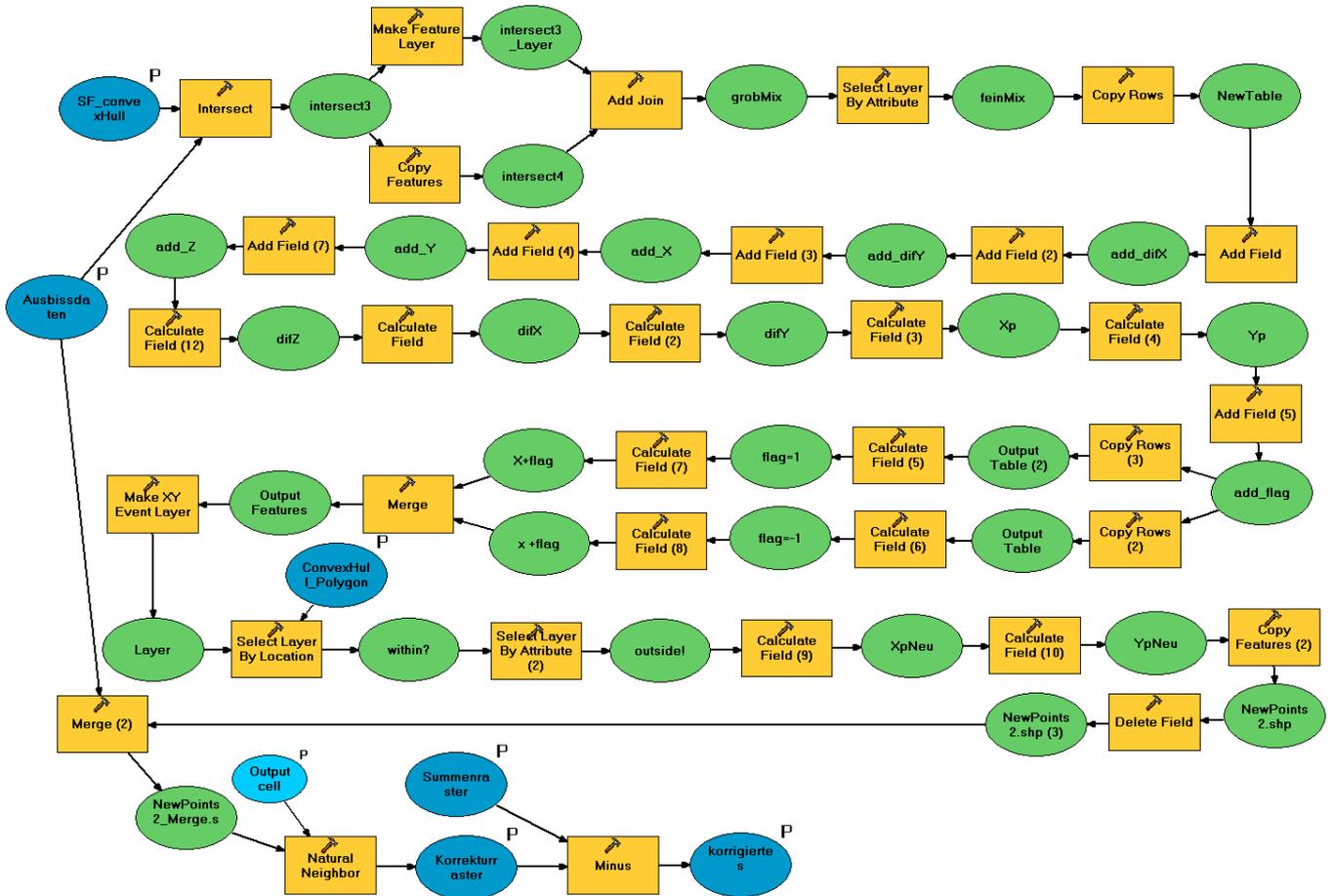


Summenraster Im ersten Teil wird die Summationsvorschrift (flowDirectionRaster) entsprechend ihrer Werte in acht Teilbereiche zerlegt, die anschließend mit den Daten der zugehörigen delta-Raster gefüllt werden. Nach Wiedervereinigung wird mit Grenze des Nullpunktes erneut zerlegt (keine negativen Kosten zugelassen), die Summation durchgeführt und zu einem Summenraster zusammengeführt.

Seite xxi: Schichtflächen(a) Abhängig vom berechneten Summenraster werden die einzelnen Zellen des Untersuchungsgebietes entlang ihrer Flächennormalen (α, β -Raster) verschoben. Aus den neuen Datentupeln wird ein Shapefile generiert, das auch die ursprünglichen Koordinaten enthält. Zur besseren Darstellung wird auch ein Raster interpoliert, das die Höhen der berechneten Fläche hält.



ConvexHull Aus den Basisdaten werden durch Vernetzung das Gesamtflächenpolygon und die TIN-Kanten ermittelt.



OuterGrowth(b) Ähnlich dem Werkzeug *InnerGrowth* werden die Punkte gesucht, die jeweils am Ende einer TIN-Kante sitzen. Folgend wird daraus der Mittelpunkt berechnet und der Datensatz verdoppelt. Durch Verschieben der identen Punkte in gegensätzliche Richtung wird erreicht, dass einer außerhalb des oben bestimmten Gesamtflächenpolygons zu liegen kommt. Dieser wird gesucht und somit die Richtung für ‚außen‘ bestimmt. Die neugewonnenen Punkte werden den Basisdaten angehängt und durch Interpolation ein Korrekturraster erstellt.

Seite xxii, xxiii: Projection Aus der berechneten Idealfäche wird die Fallrichtung und das Schichtfallen extrahiert und mit den Werten aus dem Shapefile eine erste Näherung an die gewünschte Projektionsfläche berechnet. Im unteren Teil werden die gewonnenen Daten zu einem neuen Shapefile zusammengesetzt und deren Attribute normiert und die Tabelle bereinigt.

Seite xxiv: Winkelfehler Ausgehend von den Fallrichtungen und dem Schichtfallen des zugrunde liegenden Modells und der Interpolationen wird die Winkelabweichung der Schichtflächennormalen bestimmt. Diese stellt den absoluten Fehler der Abweichung dar.

