

5 Methodik der durchgeführten GIS-Analyse

5.1 Definition und Aufbau eines GIS

Der Begriff GIS wurde zuerst im englischen Sprachraum geprägt und steht als Abkürzung für *Geographic Information System*. Die Betonung auf dem geographischen Charakter eines GIS verweist auf die ursprünglichen Anwendungsfelder, für die die ersten GIS entwickelt wurden, wie Landnutzungsdatenhaltung und agrar- und forstwirtschaftliche Anwendungsgebiete. Im deutschen Sprachraum wird der Begriff GIS jedoch allgemeiner als Abkürzung für **GeoInformationssystem** genutzt. Diese Übersetzung trägt der erweiterten Anwendungsmöglichkeiten eines modernen GIS Rechnung. Somit ist im deutschen Sprachraum ein GIS auch anwendbar bei der Verarbeitung anderer Geoinformation, wie etwa geophysikalischen, geologischen oder geochemischen Daten.

Die der vorliegenden Untersuchung zugrunde liegenden Definitionen und Funktionalitäten eines Geoinformationssystems (GIS) wurden von OTT (2001) dargestellt. Zum Thema GIS steht inzwischen eine umfangreiche Auswahl an einführender Literatur zur Auswahl. Genannt seien hier ARONOFF (1991), BARTELME (1995), EHLERS (1993), GÖPFERT (1991), LAURINI & THOMPSON (1992), PEUQUET & MARBLE (1990), TOMLIN (1990), und VOLK (1989). In Sinne der vorliegenden Arbeit stellt ein GIS nach BILL & FRITSCH (1991: 5) ein rechnergestütztes System dar: "Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfaßt und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden". Zur Charakterisierung eines GIS eignen sich mehrere Herangehensweisen. In einem konzeptionellen Sinne ist ein GIS jede Gesamtheit von raumbezogenen Daten, die im Sinne von BILL & FRITSCH (1991) wie oben erwähnt manipuliert werden können. Wenn dabei das Kriterium „digital“ fallengelassen wird, kann damit sogar ein Feldbuch mit Aufschlußbeschreibungen und Skizzen gemeint sein. In diesem Fall wird nur auf die Erfüllung der notwendigen Funktionalitäten Wert gelegt.

In einem viel verbreiteteren Sinne ist mit GIS ein zur Verfügung stehender Werkzeugkasten gemeint, bestehend aus Softwareprogrammen oder einem speziellen Programmpaket, der Hardware, den Daten und dem Anwender. Charakteristisch für ein GIS ist dabei die Verarbeitung von raumbezogener Information, mit der nicht nur Abfragen gestaltet werden können, sondern auch durch Verknüpfungs-, Verschneidungs-, Analyse- und Modellierungsfunktionen aus primären Daten Sekundär- oder gar Tertiärdaten erzeugt werden können. In dieser Sichtweise wird ein GIS häufig vom Anwender auf eine Software reduziert.

In einem dritten Sinne kann mit GIS eine spezifische Anwendungsumgebung für ein Geoinformationssystem gemeint sein. Diese Anwendungsumgebung umfaßt die üblichen oben erwähnten Komponenten eines GIS in einem methodischen Zusammenhang, der aus einer Aufgabenstellung zu einer raumbezogenen Untersuchung entwickelt worden ist. Aus dieser Sichtweise ist jedes GIS eine spezifische, vom Entwickler an die Aufgabenstellung angepaßte Gesamtheit vieler verschiedener Komponenten, die in einem Arbeitsfluß miteinander verknüpft werden. Wenn im folgenden auf das implementierte oder entwickelte GIS Bezug genommen wird, so ist immer diese letzte Sichtweise eines GIS gemeint. Der Arbeitsfluß ist im Diagramm 5-1 dargestellt.

Im Folgenden sollen die Methoden der Datenintegration und -interpretation in einem dreidimensionalen GIS erläutert werden. Die große Mehrzahl der GIS-Instrumente und damit der GIS-Analysen arbeitet in der Ebene. Besonders in der Fernerkundung und der digitalen Bildverarbeitung wird klassischerweise mit einem derartigen GIS gearbeitet. Die Art der Fragestellung der vorliegenden Arbeit macht jedoch eine dreidimensionale Erarbeitung eines geologischen Modells erforderlich. Zu diesem Zweck eignen sich CAD (*Computer Aided Design*) Systeme. Die einfließenden Daten sind allerdings größtenteils Oberflächendaten

(Fernerkundungsdaten und Geländebeobachtungen), so daß aus der Verschneidung der vorliegenden Daten sekundäre und tertiäre Informationen über den Untergrund gewonnen werden müssen. Wie schon in OTT (2001) dargestellt, ist die Gewinnung solcher abgeleiteter Information "der ursprüngliche Sinn bei der Arbeit mit GIS".

GIS unterscheiden sich von CAD-Systemen hinreichend und notwendig durch das Vorhandensein von Abfrageroutinen, sowie durch die oben schon angesprochenen Verknüpfungs-, Verschneidungs- und Analysewerkzeuge. Solche Funktionen bietet ein CAD-System typischerweise nicht. Gemeinsam haben CAD und GIS den Raumbezug und die Definierbarkeit der Topologie, die Editierbarkeit und die Visualisierungsfunktionen.

GIS können weiterhin unterschieden werden in:

- 2D-GIS
- sogenannte 2,5D-GIS
- 3D-GIS

Die ersten entwickelten GIS nutzten eine zweidimensionale Datenstruktur, die ihrer Aufgabenstellung für die Darstellung von Landnutzung gerecht wurden. In der digitalen Bildverarbeitung wird typischerweise mit solchen 2D-GIS gearbeitet. Daraus entwickelten sich sogenannte zweieinhalbdimensionale GIS, die im GIS enthaltene oder abgeleitete Informationen als pseudotopographisches Höhenmodell darzustellen in der Lage sind, und auf diesen Höhenmodellen auch andere Informationen visualisieren können. Speziell diese Funktion läßt den Laien solche 2,5D-GIS oft als echte 3D-GIS erscheinen. Von der Datenstruktur ist dies jedoch nicht korrekt, da die dargestellte Höheninformation nur eine Variable der Ebene ist (und nicht mit der topographischen Höhe identisch sein muß). Echte 3D-GIS besitzen eine räumliche Datenstruktur. Die Objekte, denen Variablen zugeordnet sind, zeichnen sich durch das Vorhandensein von drei Raumkoordinaten aus. Auch die GIS-spezifischen Funktionen wie Abfragen und Verschneidungen nutzen eine dreidimensionale Topologie.

Beim Aufbau und Einsatz eines GIS ist zunächst dessen Struktur aufzubauen und zu betrachten. Ein GIS ist gekennzeichnet durch die dreidimensional räumlich bezogene Darstellung von Einheiten der realen Welt, den Objekten. Solche Objekte werden durch mehrere Eigenschaften definiert, die sich als Datentypen unterschiedlicher Art präsentieren. Allgemein unterscheidet man hier Geometriedaten, Graphikdaten und Sachdaten, wie beschrieben z.B. bei BILL & FRITSCH (1991).

Geometriedaten legen die Form und Raumlage von Objekten fest. Die Beziehung zu den Einheiten der realen Welt wird durch Echtweltkoordinaten gegeben. Weiter unterteilt werden kann in Vektor- und Rasterdaten. Vektordaten sind dabei durch Punkte und Linien definiert, die auch zu Polygonen und damit Flächen kombiniert werden können. Jedes dieser Elemente ist Träger geometrischer Information, d.h. von Koordinaten. Die letztendliche Form der Objekte wird durch Nachbarschaftsgeometrie und Topologie festgelegt. Rasterdaten sind durch die flächenhafte Betrachtungsweise vorwiegend für zweidimensionale, insbesondere Bildinformation geeignet. Generell werden Rasterdaten in einem Feld identisch großer Bildelemente (Pixel) strukturiert. Hierbei wird die Raumlage durch Position im Feld und der Pixelgröße definiert. Die einheitliche Größe der Pixel beschränkt den nutzbaren Maßstabsbereich des Datensatzes. Dieses Problem kann jedoch durch den Aufbau von sogenannten *quadrees* entschärft werden. Rasterdaten wurden in dieser Arbeit als Grundlage für Interpretationen genutzt und sind damit im Gegensatz zu den aus ihnen gewonnenen Vektordaten nur ein Bestandteil des GIS.

Graphikdaten definieren die Darstellungsform der Ausgabe räumlicher Objekte. Dabei kann es sich um Angaben über Liniensymbole, Flächenfüllungen, Farben, Textattributen und mehr handeln. Hierzu zählen unter anderem Legendendarstellungen in Karten.

Bei den **Sachdaten** (auch semantische Daten genannt) handelt es sich um die Objektattribute, das heißt, um den Objekten zugeordnete Eigenschaften wie zum Beispiel die Zuordnung einer geologischen Einheit zu einem Polygon in einer geologischen Karte. Objektattribute haben eine der Struktur der Objektelemente entsprechende Gliederung. So werden zum Beispiel Flächen einerseits globale Attribute zugewiesen, andererseits besitzen sowohl Teile dieser Flächen,

sogenannte Regionen, als auch einzelne Punkte, eigene Attribute und Attributklassen. Als Flächen werden in diesem Zusammenhang zweidimensionale Untermannigfaltigkeiten des dreidimensionalen euklidischen Raums bezeichnet. In ihrer simpelsten Variante sind Flächen Ebenen, wie sie in gängigen zweidimensionalen GIS-Anwendungen wie z.B. ArcInfo durch Polygonzüge ausreichend definiert werden. Zur sinnvollen Zuweisung von Sachdaten besitzen alle herkömmlichen GIS-Anwendungen eine Anbindung an Datenbanken.

Im Sinne von BILL & FRITSCH (1991) wird bei der GIS-Modellierung ein kombinierter, geometrisch-topologischer Ansatz gewählt. Zum einen werden geologische Strukturen, also hier Flächen wie Schichtgrenzen und Störungen, geometrisch modelliert, wobei ausdrücklich sowohl analytische als auch approximierende Verfahren zur Anwendung kommen. Hierunter ist vor allem die Modellierung der geometrischen Form der geologischen Flächen zu verstehen. Der zweite Ansatz ist das topologische Modellieren, das sich mit der Geometrie der Lage räumlicher Objekte beschäftigt. Hierin fließen die geologischen Daten und Geländebeobachtungen wie Informationen über Schichtoberseite und -unterseite, stratigraphische Lage zueinander, Abfolge von Störungsereignissen, Faltungen usw. ein. Beispiele für topologisches Modellieren sind die Aufstellung von Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Punkten oder auch richtungsabhängige Abstandsrelationen zwischen Flächen. Im Sinne von BILL & FRITSCH (1991) wird CAD-Modellierung von der GIS-Modellierung unter anderem durch die fehlende topologische Modellierungskomponente abgegrenzt. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Richtung der Modellierung, die bei einem CAD-System vom digitalen Modell zur realen Welt, bei einem GIS umgekehrt gerichtet ist. Hier wird eine Kombination genutzt, die von der realen Welt über den Weg einer Konstruktion zurück zu Aussagen in der realen Welt geht. Insofern liegt hier ein aus mehreren Softwarebausteinen zusammengesetztes GIS vor, das sowohl Bildverarbeitungsanwendungen als auch CAD-Anwendungen nutzt. Obwohl jedes dieser Programmpakete streng genommen kein eigenständiges GIS darstellt, ist deren Kombination als solches anzusprechen. Die Verbindung mit Sachdaten ist im verwendeten GIS interoperabel gestaltet (Interoperables GIS, IOGIS) und objektorientiert. Die Struktur des GIS ist in der untenstehenden Abbildung 5-1 schematisch skizziert.

5.2 Extraktion dreidimensionaler geologischer Information

5.2.1 Allgemeines zur Modellierung

Der Begriff Modell erscheint im wissenschaftlichen Kontext erst im Laufe des 19. Jahrhunderts (JAMMER, 1965). Wenn man die zuvor gebräuchlichen Begriffe betrachtet, so kommt man um die Begriffe Analogie und Bild nicht herum. Damit wird schon eine wesentliche Eigenschaft eines Modells charakterisiert, das Verhältnis zwischen Modelloriginal und Modell. Zwischen ihnen herrscht Analogie. Ein Beginn in der Entwicklung des Modellbegriffs kann bei MACH (1883) gesehen werden, der Sprache als ein ökonomisches System von Erfahrungsübermittlung gesehen hat, das mit einer begrenzten Anzahl vereinfachender und häufig vorkommender Elemente auskommt, um eine Idee unter Preisgabe einer höheren Genauigkeit zu symbolisieren. Dies gilt ganz allgemein für jede Art von Erfahrungsvermittlung. So fordert er für die Beschreibung von Tatsachen eine möglichst übersichtliche Darstellung der funktionalen Zusammenhänge. Aufbauend darauf schrieb HERTZ (1894) über innere Scheinbilder und Symbole äußerer Gegenstände, die wiederum in einer funktionalen Analogbeziehung zueinander stehen. Das heißt, daß zwischen den Bildern eine funktional-strukturell Beziehung untereinander besteht, die identisch ist mit der zwischen den Originalen, die sie repräsentieren.

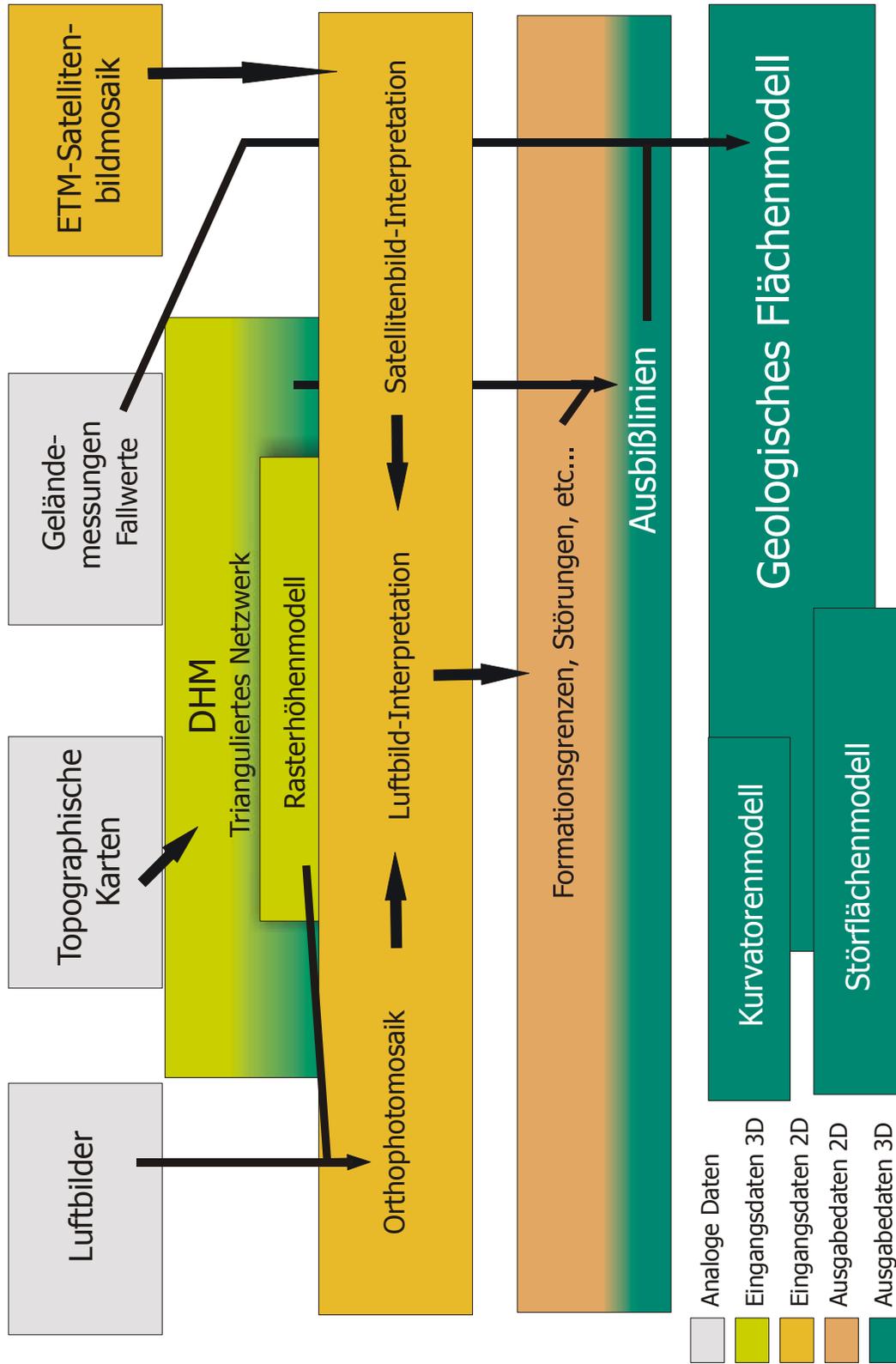


Abb. 5-1: Aufbau des entwickelten GIS als Flußdiagramm

Schon aus diesen Beziehungen werden weitere Eigenschaften eines Modells deutlich. Ein Modell besitzt demnach die Eigenschaft der Abstraktion einer Modellvorlage. Außerdem ist das Weglassen von Information, die Konzentration auf die typischen und wesentlichen Eigenschaften der Modellvorlage, eine wichtige Eigenschaft eines Modells. Darin unterscheidet sich das Modell wesentlich von der Simulation, die eine möglichst hohe Detailtreue anstrebt. Wie HERTZ (1894) schon bemerkt hat, ist bei einem Modell im Gegenteil jenes Modell vorzuziehen, das mit den wenigsten Annahmen auskommt. Darin erkennt man wiederum eine Abwandlung des Ockhamschen Rasiermessers ("Pluralitas non est ponenda sine necessitate", William von Ockham, ca. 1280-1349).

Hund (1965) hat eine Klassifikation der Modelle, abgestuft nach Abstraktionsgrad, aufgestellt:

- Modell als Denkschema (höchster Abstraktionsgrad)
- Modell als Vereinfachung durch Weglassen von Nicht-typischem
- Modell als Vorstufe einer noch nicht voll ausgebauten Theorie
- Modell in Form einer Analogie
- Modell einer abgeänderten Wirklichkeit (geringster Abstraktionsgrad)

Diese Unterteilung berücksichtigt jedoch nur den Abstraktionsgrad als klassifizierendes Merkmal, nicht jedoch die Art der Abbildung der Modellvorlage oder den Zweck des Modells, der die Kriterien für die Abstraktion bestimmt. In seiner Modelltheorie gibt STACHOWIAK (1973) eine befriedigendere Unterteilung (Tabelle 5-1).

Graphische Modelle	Bildmodelle	(anschaulich, z.B. Gemälde)
	Darstellungsmodelle	(kodiert, z.B. Karte)
Technische Modelle	Physiko-technische Modelle	(hergestellt, z.B. Flugmodell)
	Bio-, Psycho- oder Sozio-Modelle	(empirisch, z.B. Umfragen)
Semantische Modelle	Interne Modell	(kognitiv, z.B. Denkmuster)
	Externe Modelle	(Zeichen-Modelle, z.B. Sprache)

Tab. 5-1: Gliederung der Modelle nach STACHOWIAK (1973).

Damit ist jedoch noch keine Definition des Modellbegriffs gegeben. STACHOWIAK (1973) gibt drei notwendige und hinreichende Eigenschaftsmerkmale zur Definition des Modellbegriffs an:

- Das Abbildungsmerkmal
- Das Verkürzungsmerkmal
- Das pragmatische Merkmal

Das Abbildungsmerkmal kennzeichnet die Eigenschaft eines Modells, seine Modellvorlage in irgendeiner Form abzubilden, sie zu repräsentieren. Der Begriff Abbildung meint hierbei nicht die Visualisierung des Modells, denn bei dieser Definition geht es um die Abbildung der strukturellen Eigenschaften der Modellvorlage.

Es wird klar, daß auch mathematische Modelle dieses Abbildungsmerkmal besitzen, wenn man bedenkt, daß in der Mathematik ein Modell als eine Interpretation eines Axiomensystems bestehend aus wahren Axiomen gesehen wird (TARSKI, 1954). Somit steht ein mathematisches Modell für die Struktur des Axiomensystems, das es repräsentieren soll. Außerdem ist zu bedenken, daß die Modellvorlage selbst auch ein Modell sein kann. Anstatt diese Tatsache zum Anlaß für eine ausufernde Klassifizierung von Meta-Modellen zu nehmen, die auf letzten Wahrheiten (den „Dingen an sich“ im Sinne Kants) aufsetzen, hat STACHOWIAK (1973) die These vertreten, daß sämtliche Erkenntnis in Modellen stattfindet. Man vergleiche in Tabelle 5-1 nur die Bedeutung, die den semantischen Modellen eingeräumt wird.

Das Verkürzungsmerkmal benennt die Einschränkung des Modells auf die Erfassung einer begrenzten Anzahl von Attributen oder Eigenschaften der Modellvorlage, somit die Vereinfachung, die durch das Modell geleistet werden soll. Hier muß wieder die Unterscheidung von Simulationen und Modellen in Erinnerung gerufen werden. Modelle dienen ausdrücklich nicht der Simulation eines Zustandes oder Prozesses in seiner größtmöglichen Detailtreue, sondern der Erkenntnis über die Zusammenhänge innerhalb eines zu untersuchenden Objektes. Es kommt jedoch immer wieder vor, daß die Simulation als Ziel einer Modellierung (der Erstellung eines Modells) mit der Modellierung gleichgesetzt wird. Diese Aussage ist verwirrend und somit abzulehnen. In der Tat muß ein Modell an der Realität überprüfbar und somit auch falsifizierbar sein. Diese Überprüfbarkeit bezieht sich jedoch auf die Beziehungen, die durch das Modell erfaßt werden und nicht auf die Abbildung jedes zur Verfügung stehenden Teilaspektes. Anders gesagt ist ein Modell nicht deshalb falsch, weil es diesen oder jenen Aspekt nicht berücksichtigt. Entscheidend ist, ob die für die durch das Modell zu beschreibenden Beziehungen *relevanten* Informationen enthalten sind und in einer korrekten Beziehung zueinander stehen. Hieraus ergibt sich die Frage, welche Informationen relevant sind und nach welchen Kriterien sie ausgewählt werden. Aus dieser Frage ergibt sich die Wichtigkeit des pragmatischen Merkmals in einem Modell.

Das pragmatische Merkmal legt die Randbedingungen der Aussagefähigkeit des Modells fest. Dieses Merkmal hängt entscheidend von der Aufgabenstellung und den Anforderungen und Fähigkeiten des Benutzers ab. Damit gemeint ist die Orientierung des Modells zu seinem Nutzer auf bestimmte ihn interessierende Zeit- und Raumintervalle, sowie auf die Art der Funktionen und Prozesse, genauer gesagt deren Einschränkung, die mit dem Modell dargestellt werden sollen. Zu dieser Nutzerorientierung gehört auch die Festlegung eines Darstellungsmaßstabes. Abbildende Modelle sind selten in der gleichen Größe wie ihr Modellvorbild vom Menschen erfaßbar. In der Geologie sind zum Beispiel typischerweise mehrere Kilometer große Strukturen auf einem Blatt Papier abzubilden. Sobald ein Maßstabsbereich ausgewählt ist, können auch die darzustellenden Inhalte des Modells ermittelt werden. Es ist deutlich, daß nicht in jedem Maßstab die gleiche Information dargestellt werden kann, ohne daß die Anschaulichkeit der Darstellung darunter leidet. Die Anschaulichkeit ist das Kriterium dafür, welche Informationen, bzw. Teile des Modells tatsächlich darstellbar sind.

Aus diesen drei wesentlichen Merkmalen eines Modells ergibt sich, daß ein Modell dann gültig ist, wenn die zur Generierung des Modells zur Verfügung stehenden Daten in einem logisch gültigen Zusammenhang stehen und nicht untereinander im Widerspruch stehen (man spricht auch von der Konsistenz eines Modells), wie dies zum Beispiel in geophysikalischen Potentialfeldmodellen der Fall ist. Die Schlüssigkeit eines Modells hängt jedoch von anderen Dingen ab, nämlich vom Wahrheitsgehalt der im Modell enthaltenen Prämissen. Die Schlüssigkeit eines Modells ist demnach ebenso schwer zu beweisen wie die Wahrheit der ihm zugrunde liegenden Prämissen. Aus diesem Grund wird von vielen Konsumenten eines Modells eine erfolgreiche Simulation der Realität als Kriterium für die Schlüssigkeit eines Modells verstanden. Durch eine nicht hinreichende Simulation wird jedoch keine Aussage über die Gültigkeit des Modells gemacht. Allenfalls kann gesagt werden, daß der Vergleich der Realität mit den aus dem Modell ableitbaren Beobachtungen dazu dienen kann, das Modell hinsichtlich seiner Relevanz zu falsifizieren. Hierfür muß wieder auf das pragmatische Merkmal zurückverwiesen werden, denn es legt die Anforderungen an das Modell fest, und damit auch den Abstraktionsgrad des Modells.

Gleichwohl kann gesagt werden, daß ein Modell nur dann für die Lösung einer Fragestellung relevante Aussagen geben kann, wenn es die zur Verfügung stehenden Daten logisch gültig verknüpft und die Resultate der Modellierung mit den Beobachtungen im gewählten Abstraktionsgrad übereinstimmen. Sollten sie dies nicht tun, besteht für das Modell ein Überarbeitungsbedarf.

5.2.2 Die geologische Modellierung

Die heute verfügbaren Modellansätze zur Beschreibung geologischer Verhältnisse im Untergrund basieren hauptsächlich auf Entwicklungen und Methoden aus der Lagerstättenmodellierung. Ein geologisches Modell sei hier definiert als das Produkt eines Prozesses der Charakterisierung aus der Gesamtheit allen geologischen Wissens über einen Ort im Raum, näher definiert durch den geologischen Charakterisierungsprozess (*geological characterization process*, HOULDING, 1994), bestehend aus:

- Geologischer Interpretation (von Eigenschaften oder *characteristics*)
- Geostatistischer Prädiktion (von Variablen)
- Graphischer Visualisierung (von Raumdaten)

Nach HOULDING (1994) wird solch ein geologischer Charakterisierungsprozess in einer dreidimensionalen Datenstruktur *geoscience modeling* genannt, wobei das Arbeiten in einer echten 3D-Umgebung für diese Benennung hinreichende und notwendige Voraussetzung ist. Dieser Begriff soll im Folgenden mit „Geologischer Modellierung“ übersetzt werden.

Die konventionelle Herangehensweise an solch ein Modell besteht in der manuellen Auswertung und graphischen Darstellung von Karten und Profilen. Dargestellt wird der geologische Charakterisierungsprozess in Abb. 5-2.

Unter den Punkt lokale Datenerhebung fällt die Verwaltung, Korrelation und Integration der verfügbaren geologischen Informationen. Dies ist meist der zeitaufwendigste Teil einer Modellierung. Der Punkt der Variablendarstellung ist naturgemäß besonders für die Untersuchung von Lagerstätten von Bedeutung, wenn Zielgrößen wie z.B. Erzgehalte ermittelt werden müssen. Auch wenn in dieser Arbeit keine Lagerstättenmodellierung geleistet werden soll, so ist doch die Modellierung von einigen Variablen wie Schichtmächtigkeit oder Flächenorientierung von Interesse. So ist die Analyse und Vorhersage dieser Variablen basierend auf Probennahmen bzw. lokalen Messwerten ein wichtiger Schritt. Auf der anderen Seite steht die Interpretation der stratigraphischen, strukturgeologischen und anderen relevanten geologischen Faktoren aus Geländebeobachtungen. Der Arbeitsbegriff ist hier die Interpretation, da nur über begrenzte geologische Information, speziell über den Untergrund, verfügt werden kann und so der geologische Sachverstand angewendet werden muß. Interpretation umfaßt hauptsächlich die Diskretisierung und qualitative Auswertung bestimmter Eigenschaften geologischer Körper im weitesten Sinne. In diesem Zusammenhang wird deutlich, daß bei Interpretation durch unterschiedliche Qualität der Eingangsdaten und subjektive Einflüsse des Interpretierenden immer Unsicherheiten entstehen, die in das Resultat des geologischen Charakterisierungsprozesses, also das geologische Modell, eingehen. Die Darstellung der geologischen Eigenschaften bestimmt die Parameter für die Darstellung der Variablen, stellt somit eine Randbedingung dar. Die Randbedingungen der Stratigraphie und Struktur sowie andere geologisch relevanter Diskontinuitäten (z.B. Diskordanzen, etc..) bestimmen in einem weiteren Schritt die Form des zu erstellenden Raummodells. Von der anderen Seite her wird dieses Raummodell mit den darzustellenden Variablen ergänzt, die ihrerseits wiederum über die geologische Kontrolle von den geologischen Eigenschaften beeinflusst werden. Das Ergebnis dieses geologischen Charakterisierungsprozesses ist also ein Raummodell mit geologischem Inhalt, ein Geologisches Modell.

Dabei wird auf der Ebene des geologischen Modells zwischen Variablenmodell (*property model*), entsprechend der Variablendarstellung, und dem geometrischem Modell, entsprechend der Eigenschaftsdarstellung, unterschieden (BAK, CRAM & PRISSANG, 1992). CAD spielt in den zu diesem Zweck verwendeten Programmlösungen eine entscheidende Rolle. Im Gegensatz zu geographischen Anwendungen steht in der geologischen Modellbildung die Dreidimensionalität der zu modellierenden Strukturen im Vordergrund. Deshalb werden auf diesem Gebiet hauptsächlich 3D-CAD Systeme genutzt. Zur Erstellung von rechnerunterstützten geologischen

Modellen stehen mehrere geometrische Darstellungsmethoden zur Verfügung. Dies sind die Gruppen der Drahtmodelle, Flächenmodelle und Volumenmodelle.

Die Drahtmodelle sind dabei nur durch die Punktkettenmodelle vertreten, dies sind Abfolgen aus aufeinanderfolgenden Punkten mit angeschlossenen Attributen. Drahtmodelle finden ihre Anwendung sowohl in GIS-Produkten als auch in interaktiven Eingabemasken von CAD-Programmen. Sie sind zur Darstellung von linienhaften Strukturen und Polygonen geeignet, ebenso wie für dreidimensionale Objekte.

Flächenmodelle gliedern sich wiederum in Raster- und TIN-Modelle (Trianguliertes Irreguläres Netzwerk). Wie schon in Kapitel 5.2 erläutert, liegt der Vorteil von TIN gegenüber Rastermodellen in dem geringeren Speicherbedarf und der Möglichkeit der Modellierung von Flächen mit mehr als einem Wert für die z-Koordinate pro Raumlage in x und y.

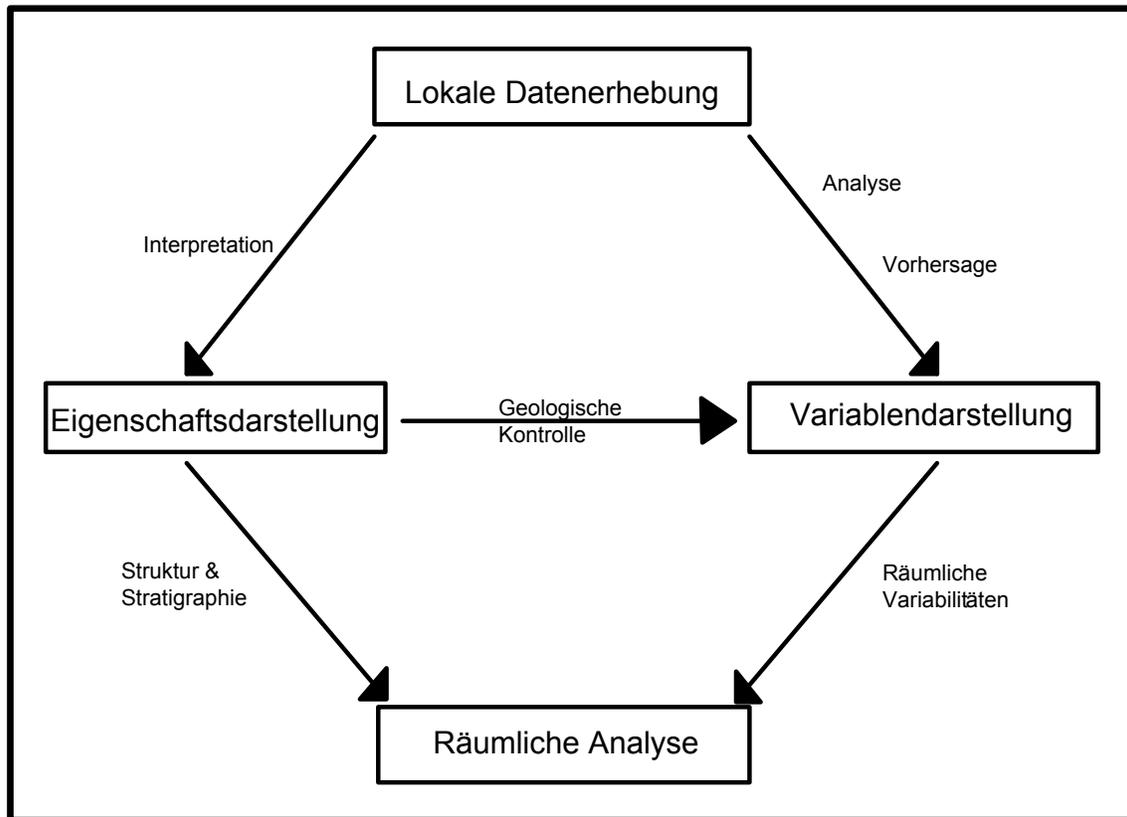


Abb. 5-2: Zusammenfassung des geologischen Charakterisierungsprozesses nach HOULDING (1994).

REQUICHA & VOELCKER (1983) untergliedern Volumenmodelle nach der Topologie, die von der angewendeten Modellierungstechnik bestimmt wird. Diese Techniken wurden hauptsächlich zur geometrischen Darstellung von Lagerstätten mit einer angeschlossenen Modellierung von Eigenschaften innerhalb der Volumenelemente entwickelt. Die meisten dieser Techniken verwenden Zusammenstellungen und/oder Kombinationen von regelmäßigen Körpern, wie bei der *Constructive Solid Geometry* (CSG), der Räumlichen Aufzählungsmethode oder der Zelldekomposition (z. B. Finite Elemente Methode). Nachteil dieser Methoden ist neben dem hohen Speicherbedarf die Schwierigkeit, mit ihnen komplexe Geometrien von Flächen im Raum darzustellen. Da der Modellierungsraum mit diesen Methoden komplett ausgefüllt wird, sind Visualisierungen von innen liegenden Strukturen nicht ohne höheren Arbeitsaufwand zu erstellen. Eine andere Technik ist die der *boundary representation*, die Volumen als geschlossene Flächen mit einem topologischen Unterschied zwischen innen und außen definiert. Hierfür werden in den meisten Fällen TIN eingesetzt, so daß es leicht möglich ist, aus Flächenmodellen in TIN-Form ein Volumenmodell dieser Art zu generieren.

Da im zu erstellenden geologischen Modell hauptsächlich Flächen (Schicht- und Formationsflächen) dargestellt werden sollten, bot die Flächenmodellierungsmethode hier Vorteile gegenüber der Volumenmodellierung. Beim Einsatz von TIN zur Generierung von Flächen ist dabei ein Übergang zu Volumenmodellen leicht durchführbar. Aus diesem Grund wurde mit GoCAD eine Softwarelösung verwendet, die in der Lage ist, 3D-TIN zu verarbeiten.

Die Nutzung dreidimensionaler Modelle in der Geologie ist, wie oben schon erwähnt, hauptsächlich durch die Entwicklung der Lagerstättenmodellierung gefördert worden. Parallel dazu hat die Nutzung dreidimensionaler Visualisierungs- und Modelliermethoden für Anwendungen in der Exploration ebenfalls eine Entwicklung erfahren. Im Maßstab der regionalen Untersuchung über mehrere tausend km² und mehr sind jedoch wenige Arbeiten durchgeführt worden. Auf diesem Arbeitsfeld lassen sich zwei Entwicklungsphasen erkennen. Die erste ist in der ersten Hälfte der neunziger Jahre zu beobachten. Während dieser Zeit werden zur regionalen Untersuchung von Morphologien und zur Visualisierung von Landoberflächen die Kombination von Satellitenbilddaten und digitalen Geländemodellen genutzt. In diesem Sinne handelt es sich also eher um 2,5-dimensionale Modelle, da mit dieser Methode lediglich perspektivische Ansichten der Oberfläche mit überlagerten Satellitenbilddaten erzeugt werden können. Aus diesen Ansichten können jedoch geomorphologische und auch tektonische Interpretationen gewonnen werden, wie am Beispiel der Explorationsarbeiten am Ostafrikanischen Riftgraben gezeigt werden konnte (REYNES *et al.*, 1993; GRIMAUD *et al.*, 1994; LE TURDU *et al.*, 1995). Resultat dieser Arbeiten sind unter anderem geomorphologisch-tektonische Blockbilder, jedoch immer noch in analoger Form.

Erste Ansätze zur Ermittlung von Streich- und Fallrichtungen aus der Kombination von Satellitenbilddaten und digitalen Geländemodellen sind auch schon um das Jahr 1990 zu erkennen. Das Einfallen von planaren und kurviplanaren (analog zu linearen und kurvilinearen Elementen) Flächen wie Schichtgrenzen und Störungen kann an den Ausbissen dieser Strukturen im Gelände gemessen werden. Auch im Luftbildpaar sind zum Beispiel direkte Messungen des Einfallens einer freiliegenden Fläche möglich. Auch die Form und Orientierung des Ausbisses an Hängen und Flußtälern ermöglicht eine Angabe über Fall- und Streichrichtung der zu untersuchenden Fläche. All diese letzteren Methoden nutzen den durch das Relief gegebenen Höhenunterschied zur Ermittlung von Streichen und Fallen. Analog dazu kann in einem Modell ein dreidimensionaler Ausbiß zur Ermittlung einer Fläche genutzt werden (z. B. MORRIS, 1990; MCMAHON & NORTH, 1993; PISOT *et al.*, 1993; KOIKE, NAGANO & KAWABA, 1998). Auch diese Arbeiten entstanden aus Anforderungen der Explorationstätigkeit, hauptsächlich zur Erdölexploration in sedimentären Becken. Die mit diesen Methoden konstruierten Flächen sind jedoch nur planar und nicht gekrümmt. Parallel dazu werden in einigen dieser Arbeiten (z. B. MORRIS, 1990; KOIKE, NAGANO & KAWABA, 1998) Anstrengungen unternommen, Lineamente automatisiert aus den Bilddaten zu generieren, das heißt ohne visuelle Interpretation. Die Resultate dieser Arbeiten sind hauptsächlich statistische Verteilungen von Störungs- oder Kluftflächen, die zur Erkennung tektonischer Orientierungen oder bevorzugter geologischer Richtungen genutzt werden. Geometrische Modelle werden dabei nicht erstellt.

Analog zu diesen dargestellten Arbeiten wurden in der vorliegenden Arbeit auf die Geländeoberfläche in Form eines TIN die aus Fernerkundungsdaten und Kartenwerken interpretierten Lineamente projiziert, und so ihren Einzelpunkten eine Höhe zugewiesen. Als CAD kam dabei SurpacVision zum Einsatz. Bei der Projektion wurden an den Bruchkanten des TIN Höhenpunkte in den Lineamenten hinzugefügt.

Die Ermittlung von Flächeneinfallen und -streichen aus Ausbissen, d.h. Linien im Raum ist jedoch auch von geometrischen Eigenschaften der zu untersuchenden Fläche abhängig. So kann dieselbe Ausbißlinie aus völlig unterschiedlichen geologischen Strukturen entstehen.

Um hier eine eindeutige dreidimensionale Geometrie modellieren zu können, sind topologische Informationen nötig. In diesem Fall werden sie abgeleitet aus eigenständigen

strukturgeologischen Aufnahmen im Bereich des zu untersuchenden Lineaments. Dies können sowohl Geländemessungen des Streichens und Fallens sein, als auch eine Reihe detaillierter Luftbildmessungen oder einfach Abschätzungen aufgrund der Kenntnisse der geologischen Lagerungsverhältnisse. Je mehr Informationen unterschiedlicher Art vorliegen, um so eindeutiger kann das Ergebnis sein. Dabei sind die Übergänge zwischen verschiedenen Modellen nicht kontinuierlich, sondern bruchhaft.

Ein Problem stellt dabei die Begrenzung der verfügbaren Daten auf die Oberfläche dar. Somit ist eine Modellierung mit immer größeren Ungenauigkeiten behaftet, je weiter die modellierten Objekte in den Untergrund reichen, da in die Entfernung von den Stützpunkten an der Oberfläche zunimmt. Dabei sind die Ungenauigkeiten in der Nähe der Stützpunkte eher geometrischer Art, während sie mit zunehmender Entfernung topologischer Art sind.

Dieses Problem hat jedoch jeder Geologe, der eine Modellvorstellung (kognitives Modell, STACHOWIAK, 1973) des Untergrundes entwickelt. Eine Eigenschaft der vorgestellten Methode ist es, daß durch die Visualisierung der modellierten Untergrundstrukturen gut erkennbar wird, wo zusätzliche Daten benötigt werden.

Arbeiten, die aus diesen Oberflächendaten den Untergrund konsequent dreidimensional modellieren, sind bis jetzt sehr spärlich. THOUÉ, VIDAL & GRATIER (1997) haben gezeigt, daß die geologische Modellierung von deformierten Flächen mit aus Satelliten- und Topographiedaten abgeleiteten Fall- und Streichrichtungen dazu genutzt werden kann, die finite Deformation und Versatzvektoren in einem Gebiet zu ermitteln. In ihrer Arbeit wird ein großer regionaler Schichtflächenverbund modelliert. Die von ihnen modellierten Flächen sind aber hauptsächlich geneigte Ebenen, mit einzelnen gekrümmten Flächen, und beschränken sich auf einen einzigen oberflächennahen Markerhorizont. Die in dieser Arbeit vorgestellte Modellierung nutzt diesen Ansatz und baut ihn aus. Zusätzlich zur Ermittlung der finiten Deformation wird in der vorliegenden Arbeit eine möglichst umfassende geometrische Modellierung von Schicht- und Störungsflächen und deren Visualisierung am Rechner geleistet. Darüber hinaus werden in dieser Arbeit sämtliche Flächen als gekrümmte Flächen modelliert und ihre lokalen Eigenschaften, etwa Krümmungen, betrachtet (siehe Kapitel 6.2.2). Erst in jüngster Zeit beginnt sich diese Einbeziehung der dritten Dimension und des Untergrundes in geometrischen Modellierungen durchzusetzen (z.B. VAN DIJK *et al.*, 2000).

5.2.3 Auswahl der Daten

Eingangsdaten in das aufgebaute GIS sind die folgenden:

- **DHM (Digitales Höhenmodell)**. Es besteht aus einem Triangulierten Irregulären Netzwerk (TIN) im dreidimensionalen kartesischen Raum und stellt somit ein echtes Flächenmodell dar;
- **Lineamente und Schichtgrenzen** werden aus Luft- und Satellitenbilddaten gewonnen und liegen in der Ebene vor. Zusätzlich wurden Karteninformationen der YPFB (*Yacimientos Petroliferos Fiscales de Bolivia*) genutzt;
- **Schichteinfallswerte** aus Geländemessungen;
- **geologische Information** ganz **allgemein** in der Form von Gefügekriterien (geopetales Gefüge), Störungsindikatoren wie der Bewegungssinn und der beobachteten Schichtmächtigkeiten;

Um die Modellierung effizient zu gestalten, muß eine Auswahl aus den zur Verfügung stehenden Daten getroffen werden. Ziel der Modellierung war es, den Faltenbau und die Auf- und Überschiebungsstrukturen sowohl qualitativ als auch, soweit wie möglich, quantitativ zu erfassen. Die Dimension dieser Strukturen liegt dabei im Bereich von wenigen Kilometern bis zu mehreren Zehnern Kilometern. Dementsprechend wurden nur Daten in das Modell aufgenommen, die zumindest eine der folgenden Bedingungen erfüllten:

- Eindeutige Identifizierung im Ortholuftbild und im Gelände;
- Zuordnung zu einer über das gesamte Arbeitsgebiet verfolgbaren stratigraphischen Grenze;

- Teilhabe an der Struktur/ Eignung als Indikator für die Deformation entlang der UKSZ;
- Vorhandensein von Altersdatierungen, die eine Datierung der aufzunehmenden Strukturen und Lineamente erlauben;
- Kenntnis der stratigraphischen Abfolge und der Diskordanzen im Gebiet der aufzunehmenden Strukturen und Lineamente;

Darüber hinaus wurden im Hinblick auf die spätere Visualisierung des Modells bewußt auch alle kleineren Lineamente und Strukturen unter 2500 m Ausdehnung unberücksichtigt gelassen, die keinen signifikanten Erkenntnisgewinn zur Problemstellung liefern, um das bei der graphischen Ausgabe durch die Dreidimensionalität der Struktur strapazierte Vorstellungsvermögen nicht über Gebühr zu beanspruchen.

5.3 Implementierung des GIS-Modells

5.3.1 Datenvorverarbeitung in Surpac und anschließende GoCAD-Modellierung

Die Eingabe der Daten erfolgte je nach deren Art unterschiedlich. Die Schichtlinien wurden abgescannt und die Höheninformation wurde, wie schon erwähnt, daraus vektorisiert und georeferenziert. Zur Erstellung eines ersten DHM wurden diese Linien in der CAD-Anwendung Surpac weiterverarbeitet. Die Fernerkundungsinterpretation fand direkt am Bildschirm in einem georeferenzierten Bild statt, so daß durch eine einheitliche Georeferenzierung diese Lineamente und andere linienförmige Strukturen direkt in Surpac importiert werden konnten. Die Projektion dieser Linien auf das DHM fand ebenfalls in Surpac statt, da diese Software es erlaubt, zusätzliche Intersektionspunkte an Bruchkanten des DHM einzufügen (Abb. 5-3). Die so entstandenen, mit drei Raumkoordinaten versehenen Linien wurden nun in ein von GoCAD lesbares Datenformat überführt.

Bei der Flächenmodellierung mit GoCAD wird auf einen diskret glättenden Interpolator (*Discrete Smoothing Interpolator*, DSI) zurückgegriffen. Der DSI-Algorithmus (MALLET, 1989, 1992, 2001) ist eine patentierte (US Patent-Nr. 6,300,958 B1) Entwicklung der Firma T-Surf. Er arbeitet iterativ und erlaubt es, Randbedingungen in beliebiger Anzahl einzufügen und zu berücksichtigen. Aufbauend auf der Datenstruktur eines TIN mit einer Topologie nach LAWSON (1977) werden den Knotenpunkten Randbedingungen und Variablen zugewiesen. Die Randbedingungen können sowohl geometrischer Art sein, wie zum Beispiel die aus Gelände- oder Luftbildmessungen bekannte Lage von Knotenpunkten des TIN. Die Randbedingungen können auch die Topologie betreffen, wie etwa die Richtung, in die Knotenpunkte des TIN verschoben werden dürfen, um die Geometrie der zu bearbeitenden Fläche zu verändern. Sinngemäß kann der Algorithmus also ebenso auf geometrische wie topologische Eigenschaften und Variablen (Punktattribute) angewandt werden (LEVY & MALLET, 1998). Zwischen dem TIN und dem Variablenfeld besteht ein Zusammenhang in Form einer umkehrbaren Funktion, so daß aus Punktattributen und räumlicher Lage von Punkten ein Parameterfeld generiert werden kann, als auch umgekehrt Daten aus einem Parameterfeld auf eine TIN-Struktur im Raum appliziert werden können. Sämtliche Randbedingungen sind regionenbasiert, d.h. in Teilmengen der zu bearbeitenden Fläche, anwendbar. Das zu optimierende Kriterium des Algorithmus ist die Krümmung einer Fläche oder eines Variablenfeldes, die minimiert wird. Damit wird auch die Oberfläche einer Fläche minimiert. In der Natur tendieren viele Grenzflächen dazu, ebenfalls eine minimale Fläche einzunehmen, somit scheint dieses Optimierungsziel auf geologische Flächen anwendbar zu sein. Die Minimierung einer Fläche steht im Zusammenhang mit der Minimierung der lokalen Flächenkrümmung. Daher werden für die Bearbeitung dieser Probleme häufig Kurvatoren herangezogen.

Für den Zweck der geologischen Modellierung ist dieser Algorithmus in Verbindung mit der Möglichkeit, mehrere Arten von Randbedingungen sowohl geometrischer als auch topologischer Art zu definieren, als auch die Möglichkeit des topologischen Modellierens, ausschlaggebend für die Wahl dieser CAD-Anwendung mit GIS-Funktionalität gewesen.

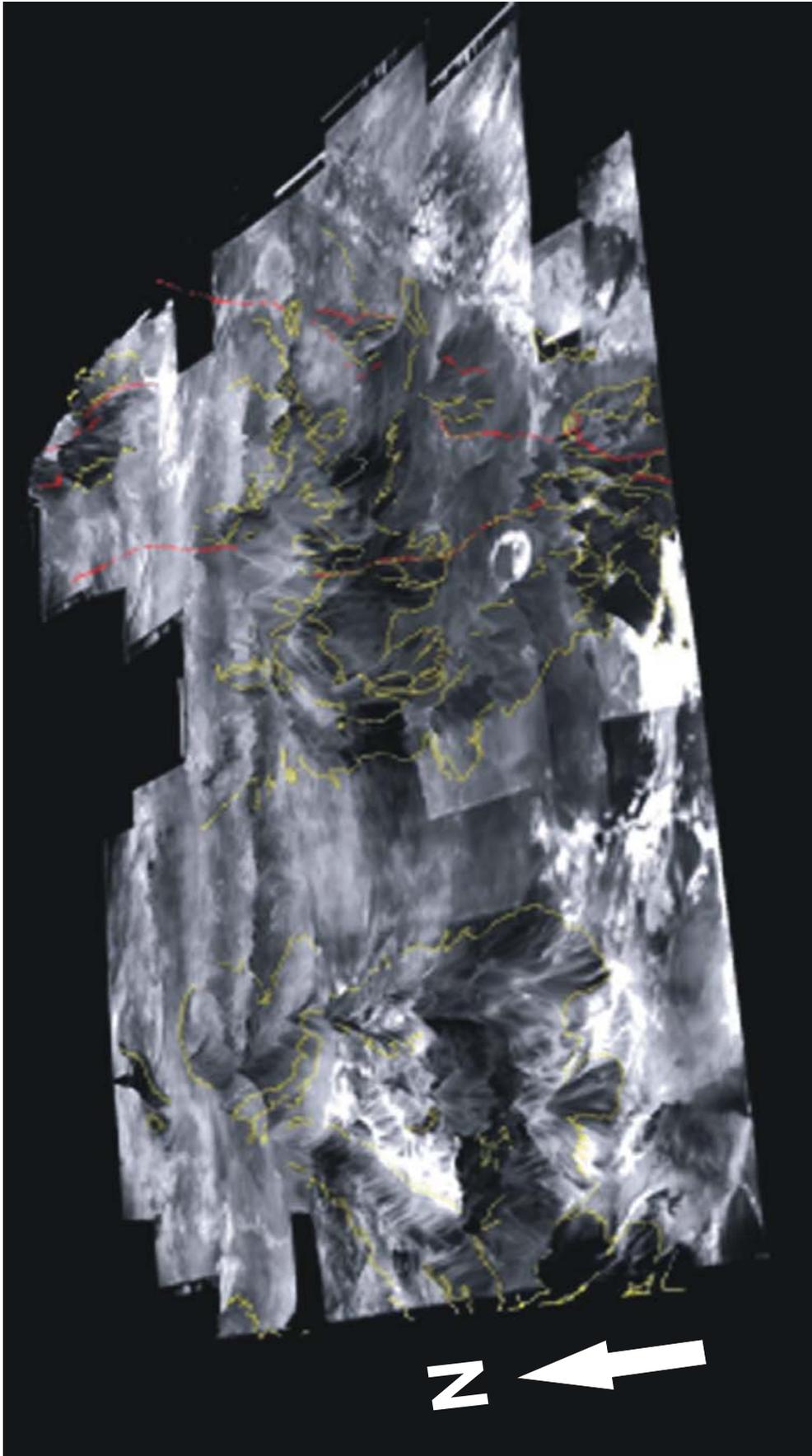


Abb. 5-3: Blick von SSW auf das 5fach überhöhte Geländemodell des Arbeitsgebietes mit überlagertem Orthophotomosaik und interpretierten Formationsgrenzen (gelb) und Störungen (rot).

5.3.2 Anpassung der Flächen

Die Modellierung der Flächen bestand im Wesentlichen in der Anpassung einer vorgegebenen, einfachen Urfläche an die Ausbißlinien unter Berücksichtigung des Streichens und Fallens. Dies hat gegenüber der alleinigen Dreiecksvermaschung aus schon bestehenden Datenpunkten den Vorteil, daß ein homogenes Trianguliertes Irreguläres Netzwerk (TIN) entsteht, in dem Artefakte, die von spitzen Dreiecken herrühren, minimiert werden. Desgleichen kann eine Fläche auch leicht über den Bereich der Datenpunkte hinaus gedehnt werden, was eine Extrapolation der Fläche über den Rand des Datenmodells hinaus ermöglicht und somit die Modellierung vereinfacht. Die beschriebenen Modellierungsschritte werden im Folgenden in den Abbildungen 5-4 bis 5-9 durch eine beispielhafte Bildfolge illustriert, die eine hypothetische Schichtfläche und mehrere Ausbißlinien in einer Ansicht von schräg oben umfaßt.

Im Zuge der Modellierung wird zuerst ein horizontaler Rahmen um die Ausbißlinie der darzustellenden geologischen Fläche erstellt, der einen großzügigen Bereich um diesen Ausbiss herum umfaßt. Anschließend wird innerhalb dieses Rahmens ein homogenes TIN erstellt (Abb. 5-4). Die Maschendichte dieses TIN ist jeweils von der Dichte der Ausbissdaten, als auch von der Größe der zu modellierenden Fläche abhängig. Größeren Strukturen werden dabei größere Maschenweiten zugeordnet, um im ersten Schritt die Berechnungen des CAD-Programms zu beschleunigen. Im Bereich der Oberflächendaten wird die Weite der Vermaschung zum Zwecke einer besseren Anpassung an die Stützungsunkte verdichtet. Die Maschenweite variiert je nach Fläche zwischen etwa 1000 m und etwa 100 m.

Die nun vorliegende TIN-Fläche ist immer noch horizontal. Eine Anpassung an die Ausbißpunkte in diesem Stadium der Modellierung würde eine nahezu flachlagernde Schichtfolge vorspiegeln. Deshalb werden anschließend die Flächen in die ungefähr zu erwartende Position so gedreht oder gedehnt, daß die Vektoren der Modellflächennormalen sich denen der Normalen der im Gelände eingemessenen Flächen annähern. Die im Gelände gemessenen Streich- und Fallwerte werden nun in das TIN aufgenommen, indem sie dem nächstliegenden TIN-Knotenpunkt als Attribut in Vektorform (als Normalenvektor der Fläche) zugeordnet werden (Abb. 5-5).

Streng genommen dürften nur Einfallswerte übernommen werden, die direkt auf der zu modellierenden Struktur gemessen wurden. Die Werte des Einfallens, die an einer konkordanten Schichtgrenze liegen, können jedoch auch aus der unmittelbaren Nachbarschaft der Struktur, hier der Schichtgrenze, näherungsweise übernommen werden.

In diesem Fall werden jedoch nur die der Grenze am nächsten liegenden Messungen in dem Modell berücksichtigt. Bei der Modellierung von Störungen ergibt sich die Schwierigkeit, daß ein genaues Einmessen des Einfallens im Gelände nur vereinzelt und lokal möglich ist, und für manche Störungsflächen gar nicht. Daher basieren die geometrischen Modellierungen in diesen Fällen zum Teil auf schon vorhandenen geologischen Modellvorstellungen. Dies geschieht im konkreten Fall dadurch, daß ein Einfallen angenommen wird und dessen Vektorinformationen nicht als konstante Randbedingungen vorgegeben werden, sondern als Ausgangswert der Iterationen des DSI-Algorithmus dienen.

Im nächsten Schritt werden die Flächenorientierungen über die gesamte Fläche interpoliert (Abb. 5-6). Dazu werden die Beobachtungspunkte der Variable als Randbedingungen definiert und diese Variable mit dem DSI Algorithmus bis zu einem zufriedenstellenden Resultat interpoliert. Der Grad, bis zu dem die vorhandenen Informationen interpoliert werden, ist ein subjektiver Parameter. Um trotzdem einen Eindruck von dem Wert des Normalvektors des Flächeneinfallens zu bekommen, wird dieser zwischen den Interpolationsschritten immer wieder visualisiert.

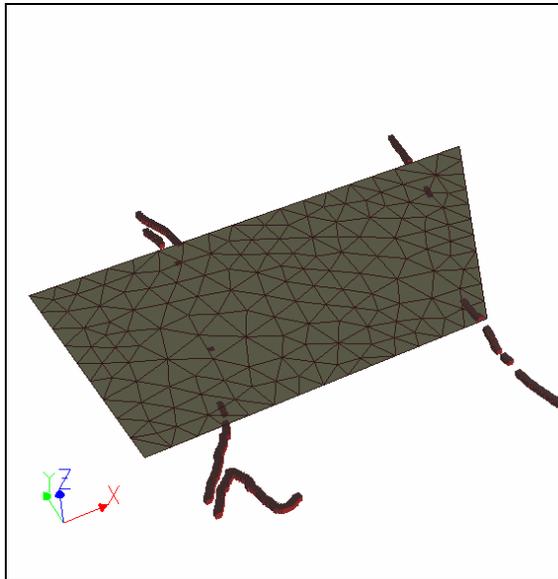


Abb. 5-4: Die zu modellierenden Schichtfläche als homogenes TIN mit Ausbisslinie einer Formation in dunkelrot.

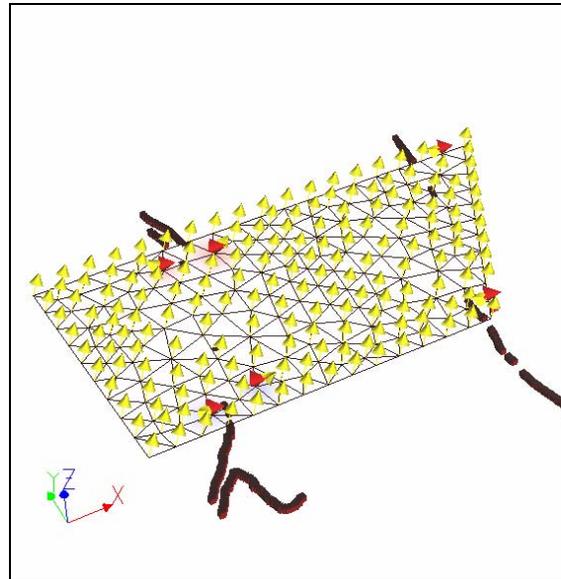


Abb. 5-5: Richtungsinformation der Fläche als Flächennormale mit gelben Pfeilen dargestellt. Geländemesspunkte in rot.

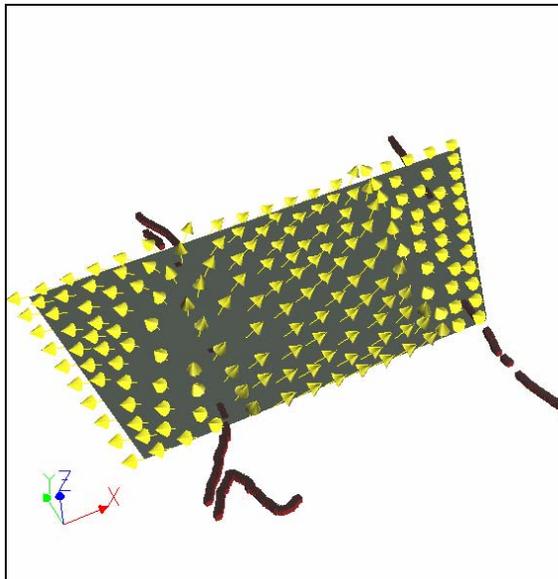


Abb. 5-6: Durch DSI interpolierter Zielwert der Flächennormalen in Darstellung als Normalenvektor.

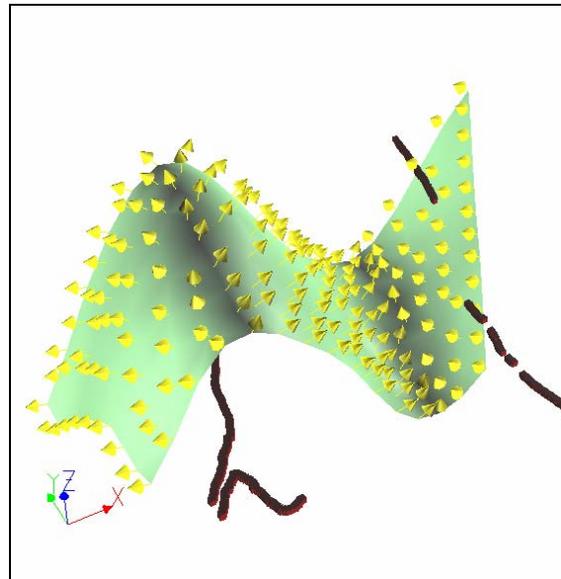


Abb. 5-7: Im nächsten Schritt wird die Fläche so deformiert, daß die tatsächlichen Flächennormalen an diesen Zielwert angepaßt sind.

Die nun folgenden geometrischen Modellierungsschritte werden iterativ und interaktiv immer wieder bis zu einem zufriedenstellenden Ergebnis durchgeführt. Häufig zeigt sich auch, daß eine zu hohe Anzahl an Iterationen des DSI-Algorithmus das Resultat dramatisch verschlechtert. Das Interpolationsresultat kurz vor diesem Umschlagpunkt kann als das bestmögliche angesprochen werden.

Zunächst wird die Flächenorientierung in der Form eines Normalenvektors als Randbedingung für das Einfallen der Fläche und gleichzeitig als vorgeschriebene Bewegungsrichtung der die Fläche aufbauenden Punkte gesetzt. Anschließend werden die Flächen mit Hilfe des DSI-Algorithmus geglättet (Abb. 5-7) und dabei gleichzeitig an die Ausbisspunkte angepaßt (Abb. 5-

8). Erst jetzt können die TIN-Knotenpunkte, die der Ausbisslinie am nächsten kommen, als Randbedingung gesetzt werden, und dies auch nur dann, wenn die Flächenorientierung an der Ausbisslinie nach der Interpolation noch korrekt ist, daß heißt, wenn die vorgegebenen Flächenorientierungen aus Geländemessungen denen der Flächennormalen weitgehend entsprechen.

Bei diesen Modellierungsschritten muß immer wieder auf die richtige Topologie der zu modellierenden Flächen geachtet und diese gegebenenfalls korrigiert werden. Dies betrifft vor allem das Oben/Unten-Kriterium der Fläche in Verbindung mit den Normalenvektoren, das bei falschen Werten zu Artefakten in der Fläche führen kann. Ein weiteres Kriterium ist die Beachtung der stratigraphischen Abfolge. Hier müssen sich durchdringende Formationsgrenzen vermieden werden, indem den ihnen zugeordneten Flächen ein gegenseitiger Mindestabstand zugewiesen wird. Dieser Mindestabstand zwischen Flächen diene dazu, im Gelände gemessene stratigraphische Mächtigkeiten zu berücksichtigen.

Nach der Erstellung eines mit den geologischen Randbedingungen konsistenten Modells werden die überstehenden Flächen entfernt. Diese sind in speziellen Flächen, die über den Rand des Arbeitsgebietes herausragen, sowie Flächen, die über die Geländeoberkante reichen.

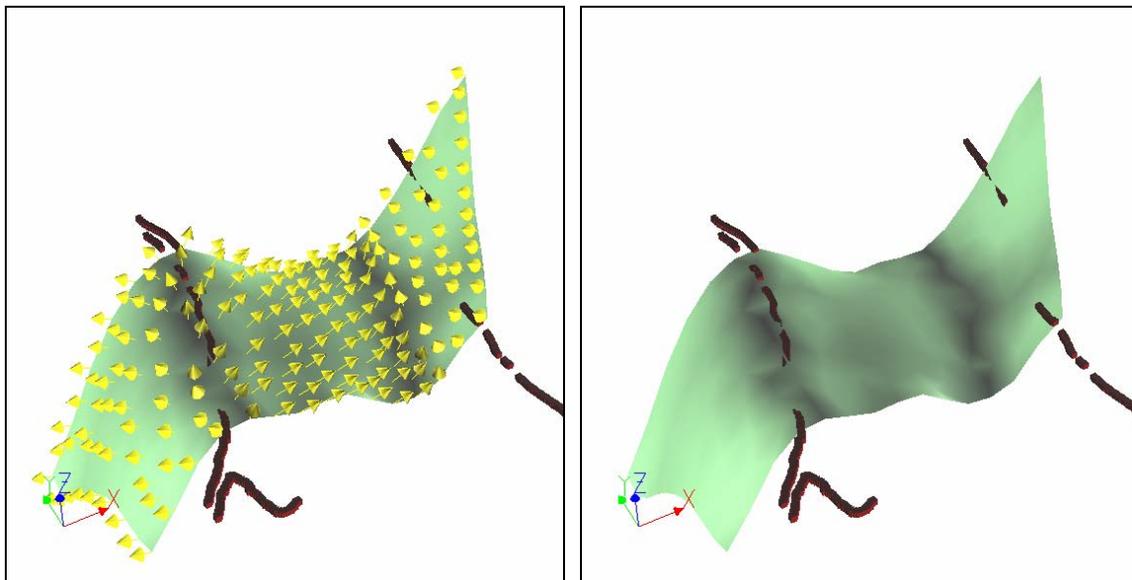


Abb. 5-8: Mit dem Zielwert der Flächennormale als Randbedingung wird die Fläche an die Ausbisslinie angepaßt und dabei geglättet. Abb. 5-9: Fertige Fläche nach Anpassung an die Ausbisslinie

In diesem Stadium handelt es sich bei dem Modell immer noch um ein Flächenmodell und nicht etwa um ein DHM im Sinne von BILL & FRITSCH (1991), da es über eine Topologie verfügt, die sich nicht auf einen simplen Versatz entlang der z-Achse beschränkt. Für die strukturelle Fragestellung nach dem Einengungsfaktor und dessen Verteilung und der Orientierung der Einengung ist ein Flächenmodell ausreichend. Durch die Einführung von Begrenzungsflächen an den Seiten und nach unten hin kann dieses Modell jedoch in ein Volumenmodell umgewandelt werden. Dabei werden allseitig durch Flächen begrenzte Blöcke definiert, denen wiederum Eigenschaften wie Dichte oder Zugehörigkeit zu einer stratigraphischen Einheit zugewiesen werden können. Ein solches Vorgehen leitet methodisch in die Anwendung von finiten Elementen über. Dies ist im Sinne von BILL & FRITSCH (1991) eine echte GIS-Anwendung. In einer weiterführenden Untersuchungen ist ein Volumenmodell in einem weiteren Modellierungsschritt jedoch anzustreben, um dieses Modell in ein Dichtemodell zu überführen und daraus ein Schwerfeldmodell zu erstellen, das anschließend mit den zur Verfügung stehenden Daten aus Geländemessungen des SFB 267 verglichen werden kann.

5.4 GIS-Abfragen

Eine charakteristische Eigenschaft eines GIS ist die Möglichkeit von raumbezogenen thematischen Abfragen. Ein geologisches Flächenmodell in Form eines oder mehrerer TIN erlaubt in GoCAD unter anderem die Ermittlung folgender Attribute von Punkteigenschaften:

- Flächennormale am Punkt P in Vektorform
- Richtung und Betrag der größten Krümmung κ_1 am Punkt P
- Richtung und Betrag der geringsten Krümmung κ_2 am Punkt P
- Gaußsche Krümmung H am Punkt P
- Mittlere Krümmung K am Punkt P
- Distanz in Richtung der Flächennormale zur nächsten Fläche (entspricht der Mächtigkeit)

Außer den Punkteigenschaften können auch andere lokale Eigenschaften des TIN ermittelt werden, wie zum Beispiel die Ausdehnung eines auf dem TIN projizierten Lineaments bekannter Richtung und horizontaler Länge.

Globale Abfragen hingegen beziehen sich auf die Gesamtheit eines geometrischen Körpers, hier einer Fläche. Ein Beispiel für eine globale Abfrage ist die Ermittlung des Flächeninhalts eines TIN. Geologische Volumenmodelle erlauben außerdem noch die Ermittlung von Volumeninhalten zwischen Flächen und in Blöcken.

Die aus diesen GIS-Abfragen gewonnenen Daten können struktureologisch interpretiert werden. Die Flächennormale gibt die Information des Einfallswinkels und der Einfallrichtung einer Fläche wieder, sei es eine Schichtfläche oder eine Störungs-, Schieferungs-, Kluft- oder Harnischfläche. Sie ist senkrecht zu der Tangentialfläche am Punkt P orientiert.

Die Richtungen der größten und der kleinsten normalen Krümmung sind definiert als Richtungen der Hauptkrümmungen an einer regulären Fläche. Die Kehrwerte der Hauptkrümmungswerte stellen den Radius des entsprechenden oskulierenden Kreises dar. Ihre Orientierung zeigen jeweils die a- und b- Achse einer Faltenstruktur an diesem einen Punkt P an. Die Richtung der größten Krümmung wird als Richtung der größten Einengung interpretiert, wobei diese Eigenschaften immer nur lokal an einem Punkt P gelten. Der Betrag der Krümmung ist ein Maß für die Einengung ϵ an diesem Punkt. Aus der Verbindung der Punkte größter Krümmung kann für Falten die Faltenachse ermittelt werden. Zur Konstruktion einer Faltenachsenfläche gibt es mehrere Möglichkeiten. Zuerst kann die Faltenachsenfläche aus der Verbindung mehrerer Faltenachsen von konkordant übereinander lagernden Schichtflächen konstruiert werden. Eine andere Möglichkeit ist die approximierende Konstruktion aus den Fallwerten und -richtungen an den Faltschenkeln mit Hilfe von Arbeitsmethoden im Schmidtschen Netz.

Die Gaußsche Krümmung H an einem Punkt P ist das Produkt aus den beiden Hauptkrümmungswerten, d.h. den Werten maximaler und minimaler Verbiegung oder Krümmung an diesem Punkt P:

$$H = \kappa_1 \kappa_2$$

Die Darstellung von Krümmungen erfolgt zweckmäßiger durch K als durch die mittlere Krümmung H, da H als Mittelwert aus κ_1 und κ_2 einen sehr viel größeren Wertebereich als K einnimmt und deshalb schwer darzustellen ist. Desweiteren können durch K geometrische Aussagen über die Punkte P der Fläche gemacht werden, die geologisch von Belang sind. So liegt bei $K = 0$ ein parabolischer (bei κ_1 oder $\kappa_2 = 0$) oder planarer (bei κ_1 und $\kappa_2 = 0$) Punkt vor, der an Umschlagpunkten zwischen negativer (Sattelstrukturen oder antiklastische Flächen) und positiver (Muldenstrukturen oder synklastische Flächen) Krümmung der Fläche liegt. Diese Umschlagpunkte sind Indikatoren für Inflexionslinien von Falten oder aber auch von Störungen, die durch Interpolation der gegeneinander versetzten Schichtflächen als Flexur dargestellt werden.

Die horizontale finite Einengung e kann direkt durch den Vergleich von horizontalen Lineamenten und deren Projektion auf die Schichtfläche errechnet werden. Dabei kennzeichnet die horizontale Länge den deformierten Zustand und die Länge der gekrümmten Linien den undeformierten Ursprungszustand gemäß der Formel:

$$e = (l'_A - l_A) / l_A$$

Dabei ist l_A die ursprüngliche Länge des horizontalen Lineaments und l'_A die Länge nach erfolgter Deformation.

Demnach kann e Werte zwischen -1 und $+\infty$ annehmen. Der Längenparameter kann aber auch folgende Ausdrucksweise annehmen, den sogenannten natürlichen strain ϵ :

$$\epsilon = \ln(l'_A / l_A)$$

Dabei kann ϵ zwischen $-\infty$ und $+\infty$ liegen.

Für die Ermittlung der Einengung gibt es mehrere Möglichkeiten, die sowohl lokal als auch auf Gesamtflächen global anwendbar sein können. Zuerst kann wie erwähnt ein Lineament bekannter, bereits als deformiert anzusprechender Länge auf eine geologische Fläche aufgebracht und dessen Länge als Ursprungslänge verglichen werden. Das Ergebnis dieser Operation ist richtungsabhängig und kann an jedem beliebigen Punkt einer Fläche angewendet werden. Durch die Anwendung in verschiedenen Richtungen kann die Richtung der minimalen und der maximalen horizontalen Einengung bestimmt werden. Diese beiden Richtungen können ebenfalls über fest eingebaute Funktionen in GoCAD ermittelt werden. Dies ist auch das Mittel der Wahl, da der entsprechende Wert schon als Vektor mit Intensitätskomponente an jedem Punkt errechnet wird. Eine andere Möglichkeit, die Richtungen maximaler und minimaler Einengung zu berechnen, ist die Berechnung von Eigenvektoren und Eigenwerten aus den Flächennormalen der zu untersuchenden Fläche. Diese Methoden sind auf Einflußgebiete oder ganze Flächen anwendbar. Bei der Berechnung von Eigenvektoren wird das Koordinatensystem einer Vektorpopulation so rotiert, daß es den Richtungen maximaler Varianzen folgt. Dabei stehen die Eigenvektoren orthogonal zueinander. Die erste Hauptkomponente folgt dabei dem Eigenvektor der größten Varianz, dargestellt durch einen Eigenwert. Die weiteren Vektoren werden nach den Residuen aus dem rotierten Datensatz berechnet. Diese Methode ist theoretisch auf beliebig viele Variablen ausdehnbar. Eine Population von Richtungsvektoren, die aus drei Komponenten bestehen, besitzt demnach drei Eigenvektoren mit Eigenwerten. Die erste Hauptkomponente entspricht dabei der Richtung der maximalen Einengung mit dem Eigenwert, der dem Wert λ der maximalen Einengung entspricht (ϵ_1). Die zweite und dritte Hauptkomponente entsprechen jeweils den Eigenwerten des Eigenvektors von ϵ_2 und ϵ_3 (Richtung der minimalen Einengung). Damit ist die Form und Lage eines finiten Einengungsellipsoids bekannt.

Daß diese Methode durchführbar ist, wird schon dadurch gestützt, daß die Visualisierung der Richtungen größter und kleinster Krümmung (entsprechend der Einengung) eine Orthogonalität der beiden Vektoren zeigt (Abb. 5-10). Außerdem ist der Eigenvektor der dritten Hauptkomponente der Richtung maximaler Einengung identisch mit dem Eigenvektor der ersten Hauptkomponente der Richtung minimaler Einengung. Die Vektoren der zweiten Hauptkomponente sind identisch.

Eine weitere Methode ist die der in GoCAD vorgegebenen Berechnung der Normalen einer Fläche am Punkt P. Da die Flächennormale sowohl zur Richtung minimaler als auch maximaler Krümmung orthogonal orientiert ist, ist die z-Komponente des Einheitsvektors der Flächennormale ein Maß für den Fallwinkel der Tangentialfläche an P. Bei Vorliegen eines Einheitsvektors vereinfacht sich obenstehende Formel zur Ermittlung von e wie folgt:

Bei $l'_A = 1$

$$e = l'_A - 1$$

Dabei entspricht l_A dem Wert der z-Komponente des Einheitsvektors der Flächennormale. Damit wird klar, daß die dritte (z-)Komponente des Normalenvektors der Fläche in linearem Zusammenhang zur lokalen Einengung e am Punkt P der Fläche steht. Da diese Funktion in GoCAD integriert angeboten wird, und die Resultate auch leicht visualisierbar sind, erschien dies als das Mittel der Wahl zur Beschreibung der lokalen Einengung e .

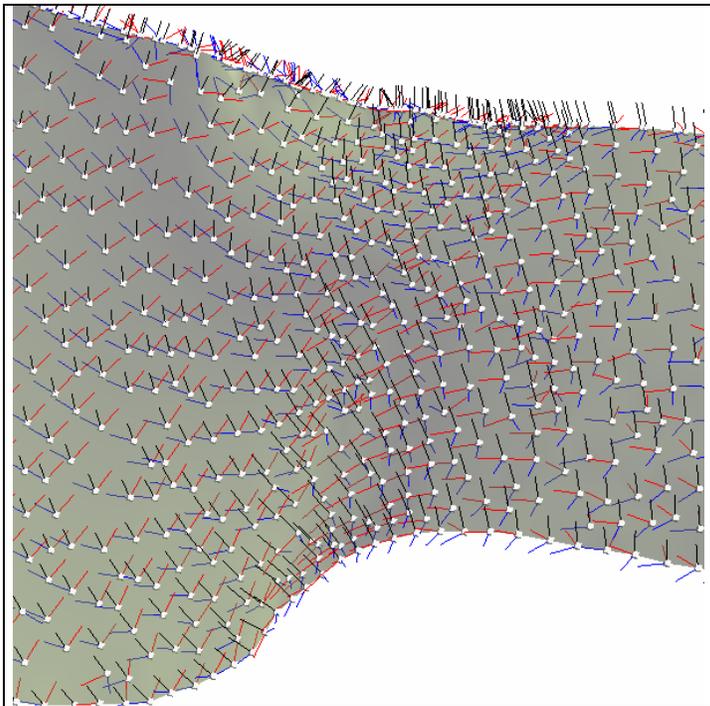


Abb. 5-10: Beispiel einer gekrümmten TIN-Fläche mit Darstellung in Vektorform der Flächennormalen (schwarz), Richtungen geringster Krümmung (blau) und größter Krümmung (rot) für jeden Knotenpunkt des TIN (weiß). Zu erkennen ist die Orthogonalität dieser Vektoren im Raum, sowie Randeffekte am Flächenrand.

Bei der Betrachtung dieser Punktattribute ist es wichtig, sich die räumliche Verteilung der Daten vor Augen zu führen. Da mit den Daten eine statistische Auswertung im Schmidtschen Netz erfolgen sollte, war es notwendig, daß diese Daten einer Zufallsverteilung entsprechend geometrisch verteilt vorlagen. Wie oben jedoch erwähnt, wurde die Vermaschungsdichte der Modellflächen und damit die Punktdichte dort, wo es möglich und nötig war, erhöht. Eine undifferenzierte Einbeziehung dieser Bereiche hoher Datendichte würde eine Übergewichtung der Daten in diesen Gebieten verursachen. Dieser unerwünschte Effekt kann durch mehrere Methoden unterdrückt werden. Es können Flächenbereiche zum Beispiel so definiert werden, daß sie jeweils Punktdichten gleichen Wertes aufweisen. Das heißt, daß Gebiete mit verdichteter Vermaschung gesondert betrachtet werden. Dieses Verfahren ist mit interaktivem Aufwand verbunden und somit nur für Detailbetrachtungen sinnvoll, und es kam deswegen nicht zum Einsatz. Ein anderes Verfahren besteht darin, die Vermaschungsdichte einer Fläche global zu homogenisieren. Diese Aufgabe ist durch die Angabe einer minimalen Dreiecksseitenlänge in GoCAD gelöst. Dabei werden Detailstrukturen geglättet, was für großräumige Bereiche jedoch von geringem Einfluß ist.

Eine erste Analyse der Richtungen der größten Einengungen, abgeleitet aus k_1 und k_2 , führte jedoch schnell zu der Feststellung, daß aus den reinen zur Verfügung stehenden Daten keine eindeutigen Resultate abzuleiten sind, was sich in einer nahezu gleichförmigen Verteilung der Richtungen äußert. Dies liegt offensichtlich daran, daß solch eine Verteilung nur die absolute Anzahl der Richtungen darstellt, nicht jedoch den Krümmungswert K bzw. H , und dies führt dazu, daß Punkte mit geringer Krümmung gleich gewichtet werden wie Punkte mit einer großen Krümmung K oder H . Aus diesem Grund sollte zu einer richtungsstatistischen Auswertung von Richtungen geringster oder größter Krümmung zuerst eine Gewichtung nach dem absoluten Wert der Krümmung vorgenommen werden. Im untersuchten Fall erscheint es deshalb einfacher

und zweckmäßiger, die Interpretation der Strukturlinien aus den mittleren und Gaußschen Krümmungen direkt in Verbindung mit der Geometrie des Modells visuell durchzuführen.

5.5 Geologische Aussagekraft des GIS-Modells

Die Erwartungen an computergestützte Modelle sind seitens der Anwender und Endnutzer sehr hoch. Beim Umgang mit digitalen Daten und Computern kann häufig eine unkritische Haltung gegenüber den Modellierungsergebnissen beobachtet werden. Diese "Datenblindheit" stellt ein Gefahrenpotential bei der Interpretierung von GIS-Daten dar (ARONOFF, 1991). Es ist daher nötig, sich mit den Modellierungskonzepten, sowie dem Typ und der Verfügbarkeit der zu interpretierenden Eingangsdaten auseinanderzusetzen.

Die Erstellung eines geologischen Modells ausschließlich aus Oberflächendaten birgt systematische Fehler in sich, da Informationen über die durch Sediment bedeckten Strukturen fehlen. Diese Strukturen können deshalb nicht ohne zusätzliche seismische oder Bohrungsdaten modelliert werden. Die Erstellung eines geologischen Flächenmodells setzt weiterhin voraus, daß die für die Modellierung einer Fläche verwendeten Daten auch tatsächlich ein und derselben Struktur angehören. Dies sicherzustellen ist das Ziel von Geländebegehungen. Trotzdem kann solch eine Struktur nicht immer kontinuierlich im Gelände oder Luftbild verfolgt werden, so daß unter Sedimentbedeckung Falten, Störungen, Diskordanzen und andere Strukturen verborgen bleiben können. Ebenso können selbst gut erkennbare Markerhorizonte zeitlich versetzt abgelagert worden sein.

Die strukturelle Auflösung eines geologischen Flächenmodells kann deshalb nur begrenzt sein. Dies heißt nicht, daß es ohne Nutzen für den Anwender ist. Es bedeutet jedoch, daß ein solches Modell nur die Strukturen und Prozesse auflösen kann, die an der Oberfläche erkennbar sind. Daher ist das Modell als ein konzeptionelles Minimalmodell anzusehen, das durch zusätzliche Informationen um Strukturen im Untergrund erweitert werden kann und soll. Eine weitere Unbekannte ist bei Auf- und Überschiebungen sowie Antiklinalen die Ausdehnung des erodierten Materials (siehe Abb. 5-11) und der Versatz an der Aufschiebung. Zur Abschätzung der finiten Einengung muß dieser Wert miteinbezogen werden, was jedoch oft schlechthin nicht möglich ist. Die Interpretation der Verkürzung aus den Flächeninhalten des Modells ist deshalb exklusive der unter Sedimentbedeckung verborgenen extensionalen oder kontraktionalen Strukturen zu verstehen, und daher in einer kontraktionalen Struktur wie der vorliegenden als Minimalwert. Dies setzt jedoch die Hypothese voraus, daß im Arbeitsgebiet im Zeitraum der beobachteten Deformation nur einengende Strukturen aktiv gewesen sind.

All diese Randbedingungen gelten nicht nur für Computermodelle, sondern für jedes geologische Modell. Gegenüber analogen modellbildenden Verfahren hat jedoch die dargestellte Methode Vorteile. So ist das erstellte Modell im Raum kontinuierlich und nicht auf einzelne Profil- oder Kartenebenen begrenzt. Dies ist wohl der wichtigste Unterschied. Außerdem ist eine sehr flexible Visualisierung am Bildschirm möglich, so flexibel wie es eine nicht animierte Darstellung auf Papier nicht leisten kann.

Flächenmodelle im besonderen weisen noch weitere spezifische Vorteile auf. Die Betrachtung der Kurvaturen in einem Flächenmodell kann wertvolle Hinweise auf verborgene Strukturen im Untergrund geben. Diese pausen sich häufig in großräumigen Oberflächenlineamenten durch, so daß deren Einbeziehung zusammen mit Kurvaturenlineamenten Hinweise auf Strukturen im Untergrund geben kann. Diese Hinweise sind jedoch bestenfalls als Vermutungen anzusehen und unbedingt mit anderen Befunden zu validieren. Solch eine Auswertung von Kurvaturen wird in Kapitel 6.3.2 dargestellt. Eine andere Quelle für Hinweise auf Untergrundstrukturen ist das gravimetrische Restfeld. Dieses wird naturgemäß an der Geländeoberfläche gemessen. Auch aus den Gradienten dieses Potentialfelds können Lineamente interpretiert werden, ein Verlauf dieser Lineamente im Untergrund ist jedoch ebenfalls nur schwer zu interpretieren und deshalb besser Gegenstand einer eigenen Untersuchung.



Abb. 5-11: Skizze zur Verdeutlichung des unbekanntem Anteils an erodiertem *hangingwall*.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die Erstellung bilanzierter Profile zur Ermittlung weiterer Randbedingungen für das geologische Flächenmodell. Hierbei kann rekurrent auf das schon vorhandene Modell zurückgegriffen werden, um beispielsweise die Ebene der größten finiten Einengung als Profilebene aus den Kurvatoren zu ermitteln.