

6 Interpretation der Daten

6.1 Interpretation aus Bildverarbeitung der ETM-Satellitendaten

6.1.1 RGB-Falschfarbenkompositenbilder

Wie schon in Kapitel 3.2.2 erläutert, werden Satellitenbilddaten bevorzugt in RGB-Falschfarbenkompositen dargestellt. KENEA (1997) hat für die Duredeb-Region im Sudan einen Vergleich verschiedener Kompositkombinationen wie OIF (Optimum Index Factor, CHAVEZ *et al.* 1982), Determinant (SHEFFIELD, 1985), Korrelationsindex (CRIPPEN, 1988) und IOBS (Index of Optimum Band Selection, LIU & MCM. MOORE, 1989) durchgeführt. Dabei stellte er fest, daß die meisten Methoden eine geringe Korrelation und damit erhöhten Informationsgehalt bei Kombination von Nahem Infrarot (NIR), *Short Wave Infrared* (SWIR) und visuellen Bereich (VIS) darstellenden Kanälen aufweisen. Besonders gute Werte erhält dabei das Bandtriplet 7 4 1 in RGB. Andere Autoren verweisen ebenfalls auf diese Kombination, wie KAUFMANN & PFEIFFER (1986), die diese für die geologische Auswertung lithologischer und struktureller Eigenschaften in ariden Gebieten favorisieren.

In den gesamten ariden Gebieten der Anden zeigt diese Kanalkombination ebenfalls einen hohen lithologischen Kontrast und hat zudem den Vorteil, Objekte in dem Auge vertrauten Farbtönen wiederzugeben, d.h. Wasser in Blau, Vegetation in Grün und Gesteine in Rot-, Gelb- und Brauntönen. ETM Kanal 7 (SWIR) deckt dabei die Absorptionsbänder von Hydroxylionen und Karbonaten ab und ist somit ein Indikator für Tonminerale und ermöglicht damit eine Diskriminierung zwischen sandigen und tonigen Flächen. Die Strahlung im ETM Kanal 4 wird durch Vegetation stark reflektiert und durch Wasser absorbiert und ist damit ein Indikator für Bodenfeuchte und Vegetation. ETM Kanal 1 hingegen wird durch Vegetation und Fe-Oxide absorbiert und ruft damit einen hohen Kontrast zu ETM Kanal 4 hervor.

Deutlich erkennbar im Bild (z. B. in Abbildung 3-8 oder auch in Tafel V am rechten Bildrand) sind die Schichtköpfe der parallel bis subparallel zur UKS streichenden, mehr oder weniger verstellten, tertiären Sedimente. Die generelle Streichrichtung ist NNE-SSW. Verschiedene sigmoidale Strukturen weichen in ihrer Orientierung um 20° bis 30° von dieser Streichrichtung ab. Im Westen des Arbeitsgebietes ist eine weitspannige Antiklinale, die Ines-Antiklinale, erkennbar (Tafel IV). Sie geht nach Osten in eine synforme Struktur über. Direkt westlich des San-Cristóbal-Vulkankomplexes sind die Schichten an einer Aufschubung saiger gestellt, zu erkennen an dem linearen Verlauf der Schichtgrenzen bei hohem Relief. Die Vulkanite und Subvulkanite des Vulkankomplexes bedecken diese Schichten im Zentrum des Arbeitsgebietes (siehe Tafel II). Entlang der sanften Hänge der Faltschenkel hat sich ein paralleles Entwässerungsnetz in die weichen Sedimente eingeschnitten (Tafeln IV und V linker Bildrand).

Die Sedimente des Tertiärs sind in dieser Kanalkombination nicht besonders gut zu unterscheiden, paläozoische Sedimente sind im Bild nur etwas heller, jedoch auch von ähnlicher Farbgebung. Dies mag an der allgegenwärtigen Bedeckung mit Hangschutt liegen. Lockersedimente, besonders die salzhaltigen, sind jedoch gut vom anstehenden Gestein zu trennen. Schon geringe Feuchtigkeitsunterschiede werden abgebildet, so daß entlang der Flußläufe des Rio Grande und Rio Alota sogar Schotterterrassen erkennbar werden.

6.1.2 Quotientenbilder (Ratios)

Verschiedene Quotientenbilder (siehe auch Kapitel 3.3.1) wurden erstellt und verglichen. Bei vielen dieser Bilder konnte eine Redundanz der Information beobachtet werden, etwa bei den Ratios 3/4 und 5/4*5/3. Andere RGB-Kompositen von Ratios zeigten nur geringen Kontrast wie etwa die Kombination 3/1, 4/1, 4/3 RGB oder 1/5, 3/4 und 5/7 RGB. Von der Aufgabenstellung her war eine Darstellung anzustreben, die einerseits eine gute Trennung

zwischen anstehenden Gesteinen und Lockersedimenten gibt, die andererseits jedoch auch lithologische Unterschiede in den einzelnen Formationen hervorhebt. Bessere Resultate zeigen hier die Ratios 4/5, 3/2, 5/7 RGB sowie 7/5, 5/4 und 3/1 RGB.

Die Quotientenbilder 3/1, 5/7 und 3/5 in RGB heben im Arbeitsgebiet Unterschiede zwischen Formationen am besten hervor (Abb. 6-2). Salz und versalzene Flächen erscheinen türkisgrün, Wasser dunkellila bis blau. Junge Sedimente des Holozäns erscheinen rosa bis rosarot (Abb. 6-2 a), bisweilen auch lila. Ebenso gefärbt sind die Pelite der Potoco-Formation (Abb. 6-2 b). Der Höhenzug entlang der UKS i. e. S. und der Höhenzug Corregidores sind in grün und gelbgrün erkennbar. Diese Höhenzüge setzen sich aus paläozoischen Gesteinen zusammen (Abb. 6-2 c). Die tertiäre San-Vicente-Formation zeichnet sich durch dunkelblaue bis blaugrüne Farben aus (Abb. 6-2 d). Ins Hangende überwiegen Grün- und Brauntöne. Die Vulkanite des Cerro San Cristóbal sind ähnlich gefärbt, nur mit einer Betonung auf den Grüntönen (Abb. 6-2 e).

6.1.3 Hauptkomponentenbilder

Unter den Hauptkomponentenbildern (siehe auch Kapitel 3.3.3) zeigt das RGB-Triplet der Hauptkomponenten 2, 3 und 4 aus den 6 ETM Kanälen im VIS, SWIR und NIR sowohl die beste Erkennbarkeit der morphologischen Strukturen als auch der lithologischen Unterschiede (Abb. 6-3). Die erste Hauptkomponente wurde nicht genutzt, da sie nur das Relief als Hauptursache für die Variabilität im Bild darstellt (Schattenwurf durch Exposition). Generell kann das Bild dreigeteilt werden. Die zweite Hauptkomponente in Rot gibt vor allem die tertiären Sedimente und die darin enthaltenen morphologisch-lithologischen Unterschiede wieder (Abb. 6-3 a). Die dritte Hauptkomponente in Grün gibt hauptsächlich Strukturen in den holozänen jüngsten Sedimenten wieder, unter anderem Schwemmfächer und alte Strandlinien des Lago Minchin (Abb. 6-3 b). Die vierte Hauptkomponente in Blau gibt neben holozänen Sedimenten und den darin enthaltenen Entwässerungsstrukturen (Abb. 6-3 c) die jüngeren Vulkanite des San-Cristóbal-Vulkankomplexes wieder (Abb. 6-3 d).

Abb. 6-3 zeigt deutliche Unterschiede zwischen paläozoischen Sedimenten, je nach Alter in Blautönen das Silur und Ordovizium (Abb. 6-3 e), und den tertiären Siltsteinen und Feinsandsteinen. Einzelne Formationen wie die Potoco-Formation in Rot in der Bildmitte Nord-Süd streichend (Abb. 6-3 a) und die San-Vicente-Formation westlich davon in hellrosa (Abb. 6-3 f) sowie darüber noch weiter westlich die San-Cristóbal-Formation in blaugrün können unterschieden werden (Abb. 6-3 d). Quartäre Sedimente sind durch leuchtend helle apfelgrüne und preußischblaue Farben gekennzeichnet (Abb. 6-3 b und c). Paläozän (El-Molino ?) hebt sich durch helles Altrosa von den im Osten angrenzenden silurischen Gesteinen ab. Salzflächen sind durch Rot ins Auge stechend und werden in ihren feuchten Randbereichen weiß. Vulkanite sind durch Blau mit Rosa den tertiären Sedimenten am ähnlichsten.

6.1.4 Resultate der Strukturinterpretation

Die verschiedenen Bildverarbeitungsoperationen heben jeweils unterschiedliche Strukturen und Lineamente hervor. Die Interpretation von Lineamenten wurde daher sukzessive auf den verschiedenen Bildverarbeitungsprodukten durchgeführt. Die so erzielte Lineamentkarte zeigt die Summe aller Einzelinterpretationen auf den einzelnen Bildverarbeitungsprodukten (Abb. 6-4). Ein wichtiges Kriterium für die Entscheidung zu weiteren Bildverarbeitungsoperationen bildete der zu erwartende Informationsgewinn. Als geeignet für die Interpretation von Lineamenten im Arbeitsgebiet hat sich die Kombination von Hauptkomponentenbildern mit durch *IHS-merge* verbesserten Farbkompositbildern erwiesen. Ratiobilder konnten einen erheblichen Beitrag zur Interpretation von Lineamenten leisten. Richtungs- und Texturfilter spielten eine ergänzende Rolle (siehe dazu Kapitel 3.3.5 und 3.3.6).

Unter den Hauptkomponentenbildern hat sich die Kombination aus den HK 2, 3 und 4 in R G B bewährt.

Anschließend wurde eine Analyse der Lineamentrichtungen durchgeführt. Dazu wurden die einzelnen Lineamentsegmente der Länge nach gewichtet. Dadurch sollte vermieden werden, daß

einer großen Anzahl sehr kurzer Segmente eine höhere Bedeutung zukommt als wenigen sehr langen. Die Resultate dieser Richtungsanalyse sind in Abb. 6-5(C) zu erkennen. Es zeichnen sich deutlich zwei Hauptorientierungen ab. Zum einen ist dies die Richtung WNW-ESE. Diese ist senkrecht zum Streichen der UKSZ orientiert. Die zweite Hauptorientierung ist die Richtung NNW-SSE und damit relativ zur Streichrichtung der UKSZ etwa 30° entgegen dem Uhrzeigersinn orientiert. Als Nebenmaxima sind die Richtungen NNE-SSW und NW-SE zu beobachten. Erstere entspricht der Orientierung der UKSZ.

Die Orientierungen der im Gelände eingemessenen Störungen sind in der Abbildung 6-5(A) dargestellt. Daneben in 6-5(B) und 6-5(C) jeweils die Streichrichtungen der im Gelände eingemessenen Störungen und die der in Fernerkundungsdaten interpretierten Lineamente. Es fällt auf, daß in 6-5(B) die Hauptrichtung senkrecht zum Streichen der UKSZ (WNW-ESE) nicht auftritt. Das fragliche Richtungsmaximum bildet eventuell konjugierte Riedelstörungen entlang der dextralen UKSZ ab. Eine weitere Möglichkeit ist jedoch, daß in der Lineamentinterpretation (6-5C) nicht nur Störungen, sondern auch andere Strukturen wie Schichtungsabrisse interpretiert wurden.

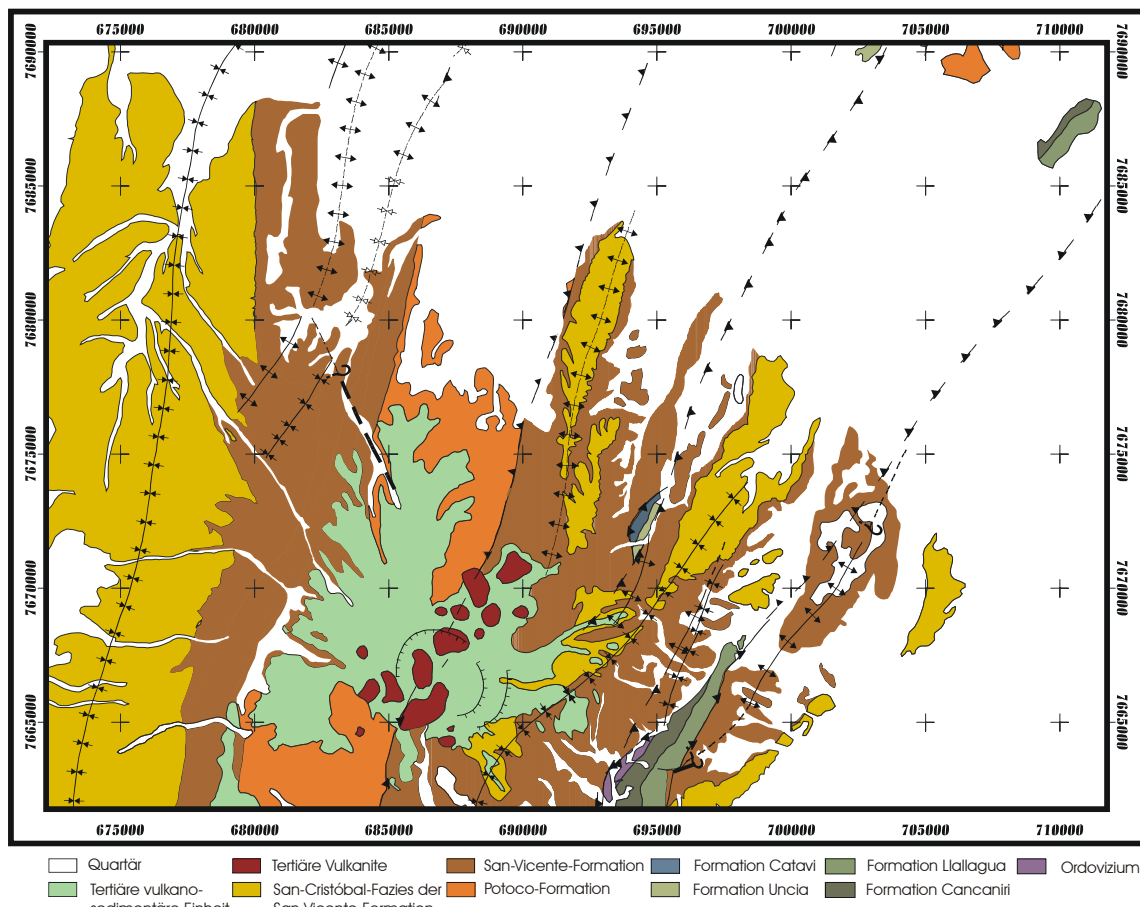


Abb. 6-1: Geologische Karte des auf Abb. 6-2 bis 6-3 dargestellten Gebietes, generalisiert und teilweise korrigiert nach YPFB-Daten.

Abb. 6-2: (nächste Seite oben) Quotientenbilder 3/1, 5/7 und 3/5 in RGB eines Teilgebietes um den Cerro San Cristóbal. A: Holozän; B: Potoco-Formation; C: Paläozoikum; D: San-Vicente-Formation; E: San-Cristóbal-Vulkanite. Lage der Ausschnitte siehe Verzeichnis der Abbildungstafeln.

Abb. 6-3: (nächste Seite unten) Hauptkomponenten 2, 3 und 4 in RGB desselben Teilgebietes um den Cerro San Cristóbal. A: Potoco-Formation; B: Strandlinien des Lago Minchin, Holozän; C: Holozän; D: San-Cristóbal-Vulkanite; E: Paläozoikum.

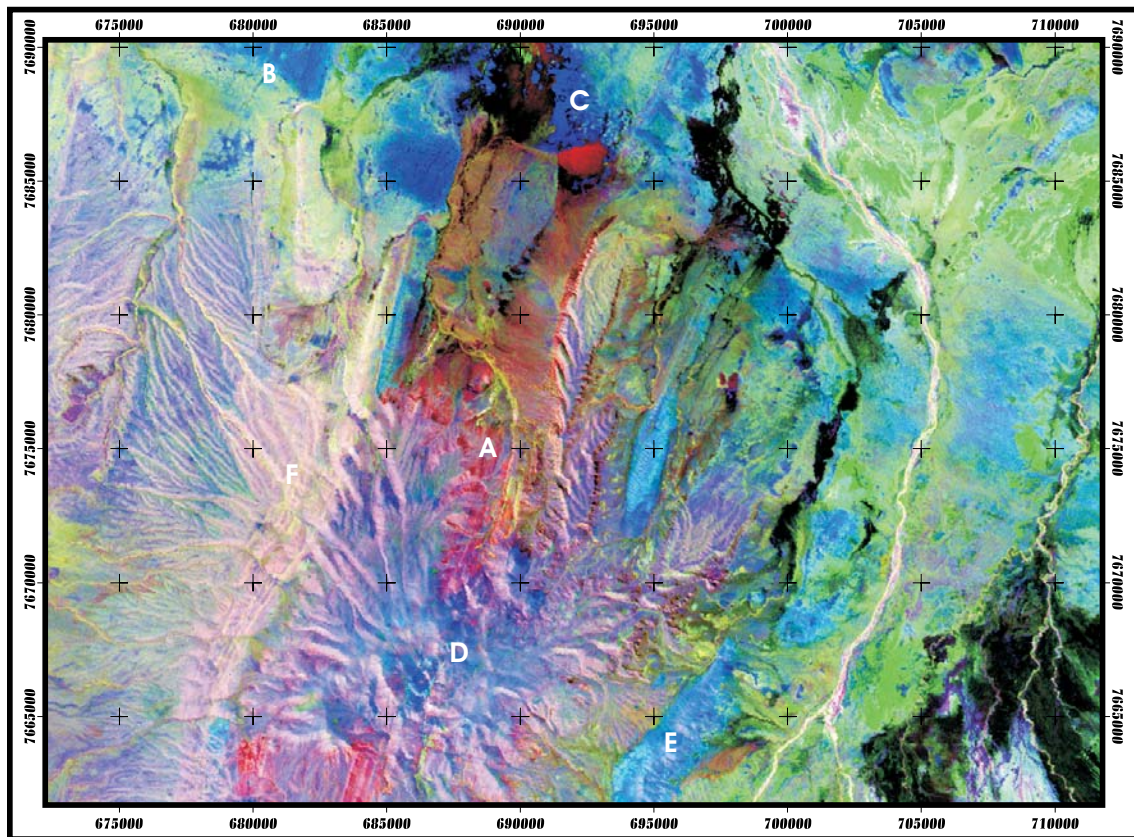
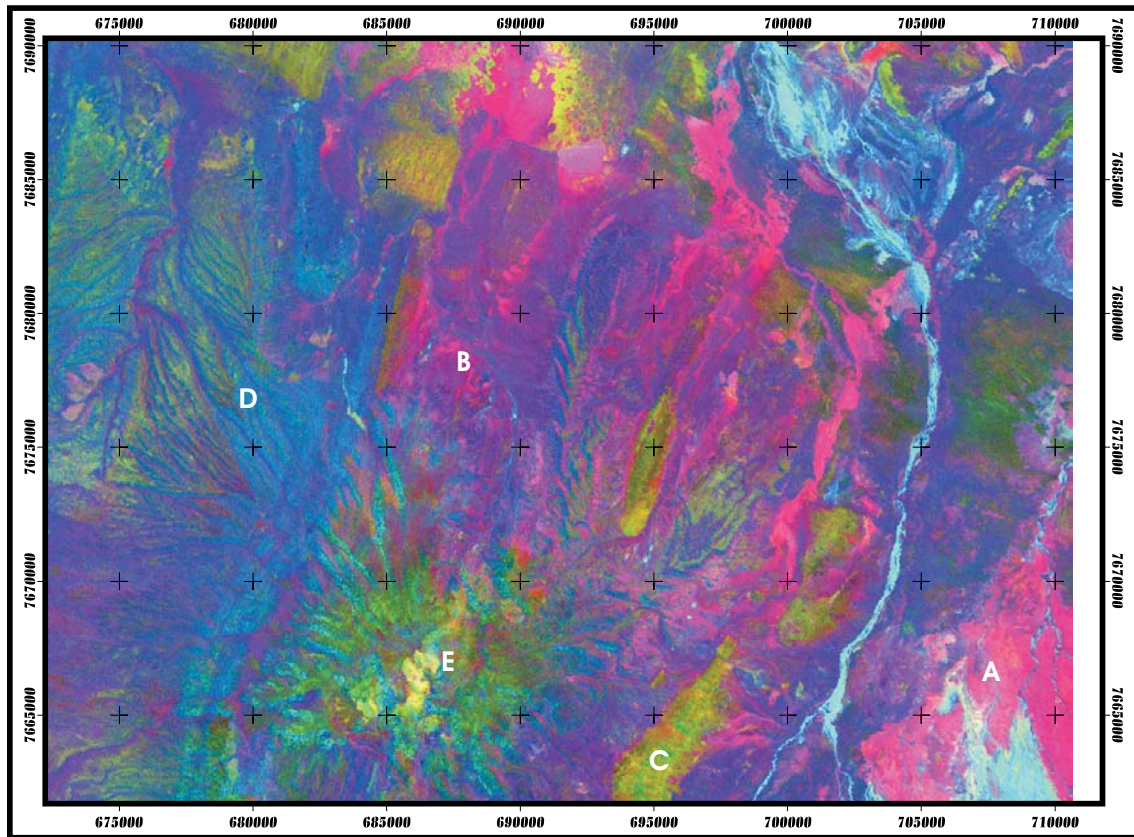


Abb. 6-2 und 6-3. Legende auf der vorherigen Seite.

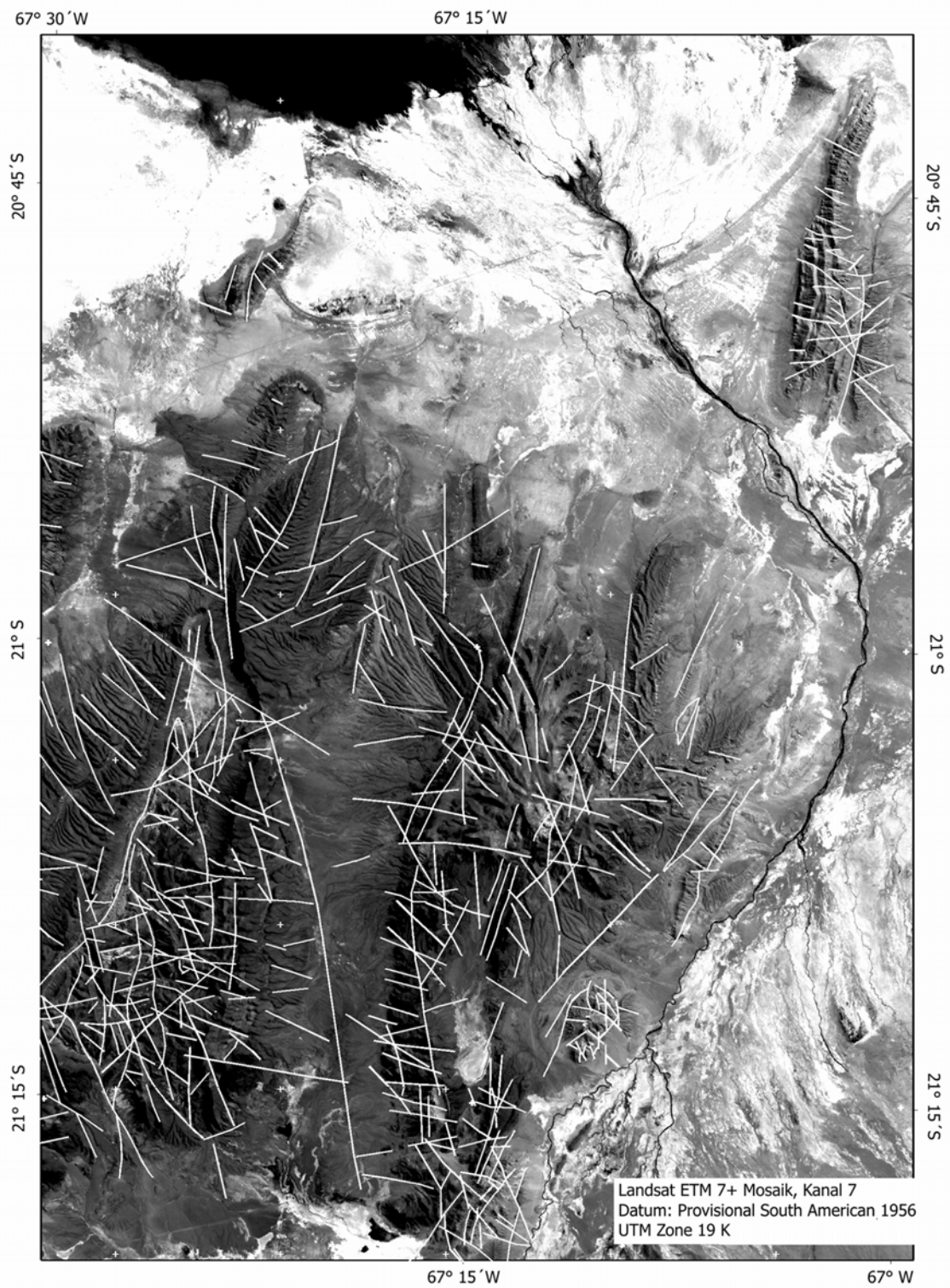


Abb. 6-4: Lineamentinterpretation aus verschiedenen Bildverarbeitungsprodukten auf einkanaliger Satellitenbildunterlage (siehe auch Tafel II).

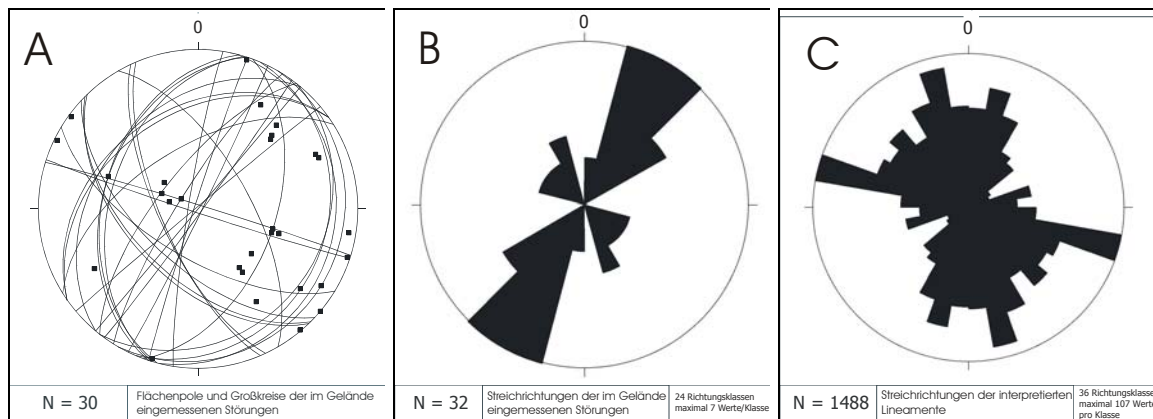


Abb. 6-5: Vergleich von Orientierung und Streichen von eingemessenen Störungen und Lineamenten aus Fernerkundungsinterpretationen.

Außerdem konnten im Arbeitsgebiet Faltenstrukturen aus den Satellitenbildern erkannt werden (Siehe Kapitel 4.2.5 und Tafeln I bis IX). Dabei handelt es sich um spitzwinklig zur UKSZ streichende Antiklinal- und Synklinalstrukturen. Im Westen ist dies die großflächig aufgeschlossene Ines-Antiklinale. Der Antiklinalkern ist ausgeräumt und bildet somit eine Reliefinversion. In ihr sind Evaporite und Pelite aufgeschlossen, beide durchschlagen von vulkanischen Gängen sowie daran gebundene Vererzungen. Im Osten schließt eine flache Mulde an, die sich zur San-Cristóbal-Aufschiebung hin aufsteilt. Dort legt sich an die steilgestellten Sedimente der San-Vicente-Formation um den Cerro Paya Punta zwischen der Estancia Cieneguillas und Agua Chica (Tafel III) eine kleinräumigere Sattel- und Muldenstruktur, die an ihrem umlaufenden Streichen zu erkennen ist (Tafel V). Die Faltenachsen tauchen dabei generell nach Norden hin ab.

6.2 Interpretation des geologischen Modells (GoCAD)

Das durch GIS-Modellierung entstandene geologische Modell bildet die großen strukturgeologischen Komponenten ab, die auch im Gelände beobachtet wurden. Die Geometrie dieses Modells wurde ausschließlich auf der Datengrundlage wie in Kapitel 4.1 und 4.2 dargestellt, aufgebaut. Das Hauptgewicht lag dabei auf der Integration der Gefügewerte von Schicht- und Störungsflächen. Anhand der Geländebeobachtungen wurde dieses Modell auf Stimmigkeit überprüft. Ziel dieses Vergleiches war es, etwaige Unstimmigkeiten deutlich zu machen und eine Diskussionsgrundlage für den Vergleich mit anderen geologischen Modellvorstellungen aus der Literatur sowie mit weiteren geowissenschaftlichen Datensätzen, wie etwa Seismikprofilen, Gravimetrie oder Magnetotellurik-Daten zu schaffen (siehe Abb. 7-3). Die zweite Zielstellung war die Visualisierung des erarbeiteten geologischen Modells am Rechner, aus dem sehr viel deutlicher ein synoptisches Gesamtbild der geologischen Verhältnisse im Arbeitsgebiet hervorgeht (Abb. 6-6). Die Schwierigkeiten, die ein Betrachter hat, aus solch einem zweidimensionalen Bild eine dreidimensionalen Struktur zu erkennen, mag als Anhaltspunkt dafür dienen, wie wichtig die Visualisierung am Bildschirm mit der Möglichkeit, die Ansichtsperspektive schnell zu verändern, ist.

Zur Auswertung des geologischen Modells gehört auch die numerische Auswertung. Die Abfrage von Datensätzen aus dem geometrischen Modell gibt Informationen über lokale und globale Eigenschaften der Verformung von Formationen.

6.2.1 Geologische Beschreibung des Modells

Im geologischen Modell integriert sind folgende Störungen:

- Die **Uyuni-Kehnayani-Störung i.e.S.** erstreckt sich vom südlichen Rand des Arbeitsgebietes bei der Einmündung des Rios Alota entlang der Ostgrenze der Paläozoikumsaufbrüche der Cerros bis östlich von Vila Vila in NNE-Streichen (Tafel III). Ihr Verlauf folgt dem auf der Karte der YPFB verzeichneten, einschließlich des vermuteten Verlaufs. Am Rande der Paläozoikumsaufbrüche wurde der Verlauf im Satellitenbild und Luftbildmosaik angepaßt. An der UKS i.e.S. konnte das Einfallen nicht exakt gemessen, sondern nur der ungefähre Fallwert ermittelt werden. Deshalb beträgt das Einfallen der modellierten Störungsfläche als Vorgabe 45° nach W. Im erarbeiteten Modell steigt dieser Fallwert in die Tiefe an. Damit weist die modellierte Störung ein um etwa 15° steileres Einfallen als die an der Oberfläche angenommene Aufschiebungsfläche auf. Aufgrund des Fehlens von Geländemesswerten kann jedoch nicht entschieden werden, ob es sich dabei um einen systematischen Fehler handelt. Am südlichsten Rand des Modells konvergiert die UKS i.e.S. mit der San-Cristóbal-Störung.
- Die **Corregidores-Störung** konnte nur im Corregidores-Höhenzug mit Stützpunkten modelliert werden. Dort konnte nur an einem Aufschluß ein Fallwert eingemessen werden. Für die modellierte Fläche wurde das Einfallen dem im Gelände gemessenen Wert von etwa 60° nach WNW bis W angepaßt. Weiter südlich folgt diese Störung wiederum dem in der Karte von YPFB vermuteten Störungsverlauf.
- Die **San-Cristóbal-Störung** ist in ihrem nördlichen Teil ebenfalls nur aus der Karte von YPFB entnommen. Im Bereich des Cerro San Cristóbal jedoch liegen Fallwerte von 90° bei einem N-S-Streichen und Top im Westen vor. Weiter südlich in der Nähe des Rio Alota verflacht das Einfallen dieser Störung. In weiten Teilen um den Cerro San Cristóbal herum fällt diese Störung mit der modellierten Basisfläche der Potoco-Formation nahezu zusammen. Aus diesem Grunde erschien es wünschenswert, einen eventuellen Abscherhorizont an der Basisfläche der Potoco-Formation zu modellieren. Diese Form ist in der Modellierung der San-Cristóbal-Störung im Untergrund berücksichtigt. Dies äußert sich darin, daß die Störung in die Tiefe hin zunächst langsam verflacht, um sich dann bei Erreichen von Meereshöhe einem relativ starken Knick folgend der Basisfläche Potoco anzuschmiegen und sich dabei subhorizontal nach W fortzusetzen. Für die Existenz solch eines Abscherhorizontes spricht das Auftauchen von Gipsen und Salz in der Potoco-Formation im Kern der Ines-Antiklinale im Westen, assoziiert mit Salztektunik. Gegen seine Existenz sprechen das relativ abrupte Umknicken der Störung sowie eine Durchdringung von Basisfläche und Störungsfläche im Modell (in Abb. 6-6 direkt nördlich der Ines-Antiklinale). Letztere taucht jedoch nur am südlichsten Rand des Modells auf und könnte somit auf Randeffekte zurückzuführen sein.
- **Kleinere Störungen entlang des Paläozoikums:** Am Westrand der Paläozoikumsaufbrüche am Rio Alota und entlang des Rio Grande wurden aus Fernerkundungsdaten einige Lineamente interpretiert, die im Gelände nicht angesprochen werden konnten. Unter der Hypothese, daß es sich bei diesen Lineamenten um Störungen handelt, speziell um mehrere Ausbisse einer einzigen Störung, wurden sie in das Modell aufgenommen. Sie streichen parallel zur UKS i.e.S., und gliedern sich in einzelne hintereinander aufgereichte Teilstücke einer vermutlich zusammenhängenden Störung(szone) am Westrand der Paläozoikumsaufbrüche. Ihr Einfallen wurde aus der Kombination von Relief und Ausbiß approximiert. Der Fallwert liegt bei etwa 70° bis 80° nach E. An einem Aufschluß an der UKS i.e.S. konnte eine Rücküberschiebung im Paläozoikum beobachtet werden, die mit etwa 60° nach E einfällt (siehe Kapitel 4.2.2.2). Es könnte sich bei den ähnlich orientierten modellierten Störungen ebenfalls um einem Rücküberschiebungssystem zugehörige Störungen handeln. Die Abzweigung von der Hauptstörung ist nach Modell in etwa 1300 m Tiefe unter Geländeoberkante zu erwarten. Die Störung ist in Abb. 7-3 als steil nach Osten einfallende Störung westlich der UKS i.e.S. erkennbar.

Die letztgenannten kleineren Störungen vereinigen sich mit der UKS i.e.S. am südlichsten Rand des Arbeitsgebietes. Damit könnte es sich bei dieser Struktur um eine positive *flower structure* handeln. Die drei großen Störungen zeigen im Modell einen Konvergenzpunkt im Bereich des Rio Alota, wenige km westlich des Zusammenflusses mit dem Rio Grande. Auffällig ist auch, daß bei diesen drei Überschiebungen der Fallwert systematisch in Richtung W hin zunimmt, bis hin zur Überkipplung. Dies ist sowohl im Gelände als auch im geologischen Modell zu beobachten.

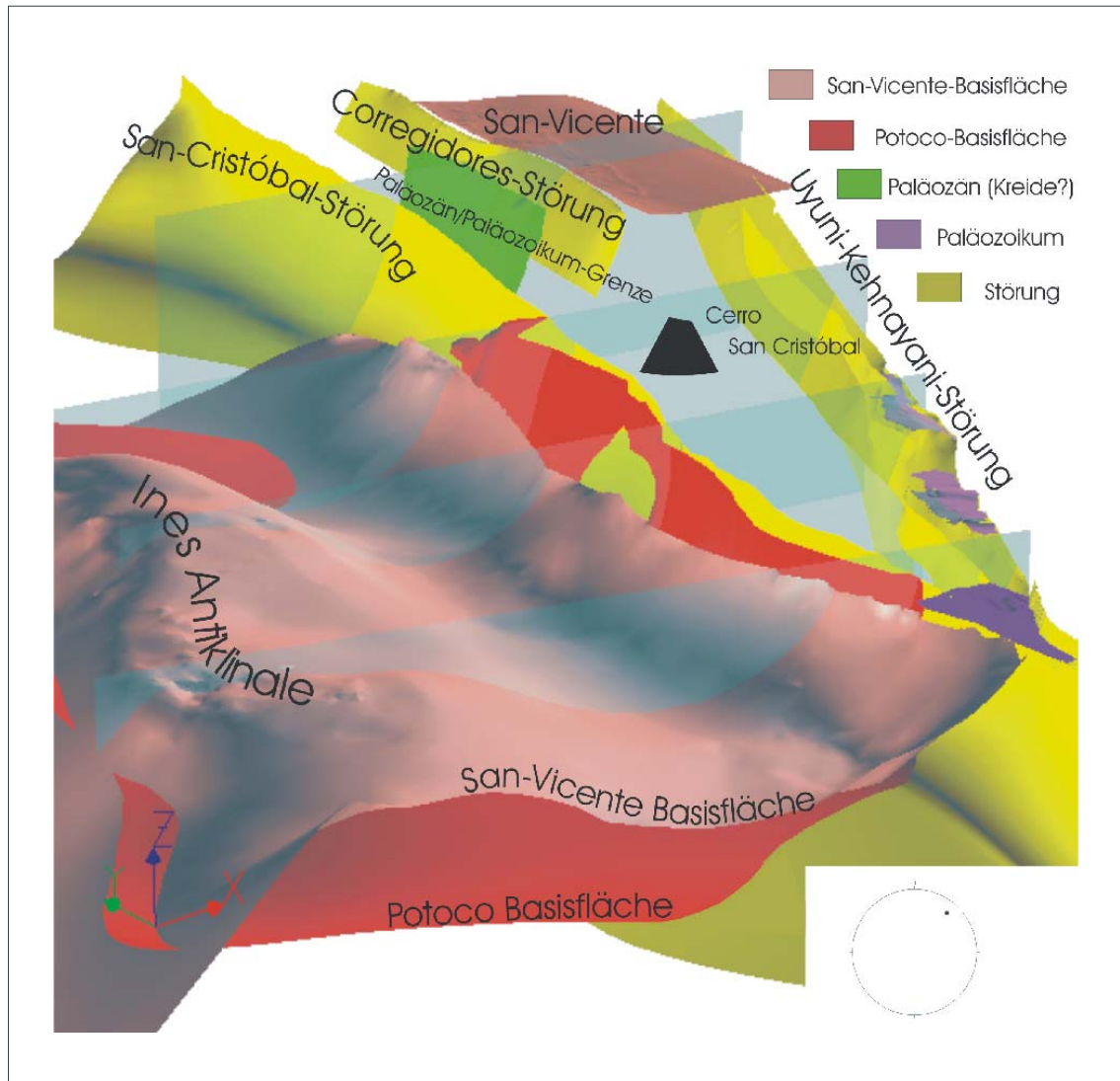


Abb. 6-6: Synoptische Ansicht von SSW des geologischen Flächenmodells des Untersuchungsgebietes. Länge der Koordinatenachsen beträgt etwa 3 km, Nordrichtung in Y, keine Überhöhung. Die Orientierung der Blickrichtung ist unten rechts im Schmidt-Netz dargestellt (untere Hemisphäre). Semitransparent sind die Profilebenen aus Abbildung 8-2 dargestellt. Höhe der Profilebenen: 10 km. **Siehe auch Tafel IX.**

Folgende lithostratigraphische Formationsgrenzen wurden stratigraphisch von oben nach unten im Modell integriert:

- Die **San-Vicente-Basisfläche** als Formationsgrenze zwischen San-Vicente-Formation und Potoco-Formation konnte in großer Ausdehnung westlich der San-Cristóbal-Störung modelliert werden, sowie östlich der Corregidores-Störung im gleichnamigen Höhenzug und ganz im Süden direkt östlich der UKS i.e.S.. Im ersten Fall konnte auf Aufschlüsse nördlich und südlich des Cerro San Cristóbal zurückgegriffen werden. An den Flanken des ausgeräumten Kerns der Ines-Antiklinale konnte die Formationsgrenze sowohl in den

- Fernerkundungsdaten, als auch im Gelände beobachtet und eingemessen werden. Die Formationsgrenze zeigt im Modell eine der Potoco-Basisfläche analoge Form, jedoch erreicht sie in der Synklinale nur eine Tiefenlage von 1200 m über NN gegenüber 2000 m unter NN bei der Potoco-Basisfläche. Nach Norden hin jedoch taucht sie stärker als die Potoco-Basisfläche ab, so daß hier eine Durchdringung der Schichtflächen im Modell zu beobachten ist. Hier besteht ein Bedarf nach mehr aussagekräftigen Daten, zumal die Aufschlüsse in diesem Gebiet unter den mächtigen Salar-Sedimenten bedeckt liegen. Abhilfe kann ein in dieser Region vorhandener Seismik-Datensatz bringen, der bis jetzt nur Frau Kirsten Elger zur Verfügung stand, da er aus privatwirtschaftlichen Quellen stammt (siehe Kapitel 7.1 und Abbildung 7-2). Im Bereich der Ines-Antiklinale wurde deren erodierter Scheitel ebenfalls als Fläche modelliert, der in seiner Form leicht nachzubilden war. Dies ist der einzige Punkt, an dem im Modell eine über der Geländeoberkante liegende Fläche systematisch erzeugt und einbezogen wurde. Die gleiche Formationsgrenze östlich des Corregidores-Höhenzugs zwischen Corregidores-Störung und vermutetem Verlauf der UKS i.e.S. liegt nahezu sölilig mit flachem Einfallen nach E von wenigen Grad. Ähnlich gelagert zeigt sich die modellierte Formationsgrenze im Süden direkt östlich der UKS i.e.S.
- Die **Potoco-Basisfläche** als Formationsgrenze erscheint an der Oberfläche nur westlich der San-Cristóbal-Störung. Dort fällt sie saiger bis überkippt in N-S-Richtung streichend ein. Das Oberste der Schichten ist einheitlich im W. Im südlichen Bereich des Arbeitsgebietes verringert sich der Fallwert. Der Bereich, in dem diese Formationsgrenze modelliert wurde, beschränkt sich folglich auf den westlich der San-Cristóbal-Störung gelegenen Raum. Da die Potoco-Formation dort konkordant von der San-Vicente-Formation überlagert wird, wurde die Formationsgrenze in Anlehnung an die San-Vicente-Basisfläche geformt. Dazu wurde eine Formationsmächtigkeit von 4000 m aufgenommen, die am Aufschluß bei der Mina Cobrizos ermittelt worden ist (SILVA, pers. Komm., 2000). Diese Mächtigkeit wurde als Randbedingung in das Modell übernommen. Daraus ergab sich eine Nachformung der Ines-Antiklinale durch die modellierte Potoco-Basisfläche, obgleich die Grenze dort nicht aufgeschlossen war. Zu diskutieren bliebe, ob diese Mächtigkeit nach Westen hin konstant ist oder sich verringert, mangels weiterer Informationen soll als Arbeitshypothese eine konstante Mächtigkeit angenommen werden. In der Tat ist der westliche Beckenrand des Potoco-Sedimentationsraums nicht aufgeschlossen und auch nicht indirekt durch fazielle Veränderungen erkennbar. Zwischen Ines-Antiklinale und Aufschubung der San-Cristóbal-Störung wurde eine weitgespannte asymmetrische Synklinale gebildet, mit steilem Schenkel im E und flach einfallendem im W. In N-S-Richtung ist ebenfalls eine Variation zu erkennen. Ganz im S des Arbeitsgebietes liegt die Troglinie der Synklinale der Formationsgrenze etwa bei 0 m über NN. Nach N hin steigt sie bis zur Höhe des Cerro San Cristóbal etwas an, um dann nach N hin wieder abzutauchen, diesmal bis einige 100 m unter NN. Analog dazu verhält sich die Scheitellinie an der Ines-Antiklinale.
 - Bei den **Formationsgrenzen in der kretazisch/paläozänen Abfolge** handelt es sich um zwei Formationsgrenzen im Liegenden der Potoco-Basisfläche, die parallel gelagert sind und auch zusammen auftauchen. Sie sind im Luft- und Satellitenbild erkennbar und auch im Gelände beobachtet worden, ihre genaue stratigraphische Position bleibt jedoch durch ihre untypische Fazies unklar. Sie konnten westlich des Höhenzugs Corregidores zwischen vermuteter San-Cristóbal-Störung und Corregidores-Störung modelliert werden, sowie am südlichen Rand des Arbeitsgebietes direkt östlich der UKS i.e.S.. Dort lagern die Schichtgrenzen sölilig bis sehr flach nach E einfallend, während bei Corregidores die Schichtgrenzen steil mit etwa 75° nach W einfallen.
 - Die **Formationsgrenzen im Paläozoikum** sind nur entlang der UKS i.e.S. westlich von ihr aufgeschlossen und modelliert. Im Gelände und Luftbild erkennbar ist eine mehr oder weniger intensive Faltung der untersten aufgeschlossen Cancañiri-Formation. Da die

Geometrie dieser Formationsgrenzen nicht von Bedeutung für die numerische Auswertung des geologischen Modells ist, werden die paläozoischen Formationsgrenzen nur zur Lokalisierung des Paläozoikums entlang der UKS i.e.S. visualisiert.

Im Modell ist deutlich erkennbar, daß die Deformation im Arbeitsgebiet durch die N-S bis NNE-SSW-streichenden Aufschiebungen in mehrere Teilbereiche gegliedert ist. Während westlich der San-Cristóbal-Störung paläozäne bis miozäne Sedimente im Hangendblock der Aufschiebung sind, bildet zwischen San-Cristóbal- und Corregidores-Störung (CS) die San-Vicente-Formation eine im Modell nicht dargestellte weitgespannte Synklinale. Direkt westlich der San-Cristóbal-Störung (SCS) tauchen im Modell steilgestellte, aufgeschobene kretazisch/paläozäne Sedimente auf, im Osten der SCS zwischen SCS und CS sind auch paläozoische Sedimente steilgestellt. Zwischen Corregidores-Störung und UKS i.e.S. ist die Potoco-Formation zwar zu weitspännigen Faltenzügen deformiert, jedoch im Bereich der Aufschiebungen durch tektonische Beanspruchung zu Spezialfalten intensiv deformiert (siehe Kapitel 4.2.2.2). Hier sind ebenfalls paläozoische Sedimente über jüngere Gesteine überschoben. Östlich der UKS i.e.S. sind bis auf den unmittelbaren Störungskontaktbereich auch die kretazisch/paläozänen Sedimente noch weitgehend undeformiert gelagert.

Zusammen mit Geländebobachtungen und Datierungen entsteht ein Gesamtbild, in dem die Deformation zeitlich von W (bis 11 Ma) nach E (bis 9 Ma) an mehreren nacheinander angelegten Überschiebungen und Aufschiebungen voranschreitet, wobei mit zunehmendem Alter der Störung das Einfallen der Störungsbahnen steiler wird und die syntektonische Bedeckung durch aus den entstehenden Hochlagen erodierten Sedimente immer größer wird. Dabei wird die Mächtigkeit der nicht in die Deformation einbezogenen Schichten nach E hin immer größer. Während im W nur die obersten Formationen San-Cristóbal und jüngere undeformiert sind, sind östlich der UKS i.e.S. auch die kretazischen Sedimente noch tektonisch unbeeinflusst, mit Ausnahme von Schleppungseffekten entlang der Störungszonen (siehe Kapitel 4.2.2.3 und Abb. 4-10). Das Streichen der Störungen rotiert dabei von NNE-SSW nach NE-SW.

6.2.2 Numerische Auswertung des Modells

Wie schon in Kapitel 5-4 erläutert, gibt es im verwendeten GIS die Möglichkeit zu punktuellen und globalen Abfragen in Flächenmodellen. Berechnet wurden die Richtungen der größten und kleinsten Einengung lokal an jedem Triangulationspunkt der modellierten Flächen. Ebenfalls berechnet wurden die Maximal- und Minimalwerte der Krümmung an jedem Punkt der modellierten Flächen. Als globale Operation wurde ein Vergleich des Flächeninhalts der modellierten Schichtgrenzflächen zwischen deformiertem und undeformiertem Wert durchgeführt.

Die Auswertung der Richtung maximaler und minimaler Krümmung gibt Informationen über die Raumlage der lokalen finiten Verformungsellipse. Dies gilt jedoch nur für den Fall, daß eine tatsächliche Einengung vorliegt, und nicht eine extensionale Struktur, die sich auch durch eine Krümmung bemerkbar macht, wie etwa eine Flexur über einer Abschiebung. Da im Arbeitsgebiet jedoch nur für ein Einengungsregime typische Strukturen und zylindrische Faltungen beobachtet wurden, kann hier davon ausgegangen werden, daß die Flächenkrümmung ein Abbild der Einengung ist.

Der Wert der lokalen Einengung e ist linear abhängig von der z-Komponente der lokalen Flächennormalen, siehe Kapitel 4.3. Die Visualisierung dieses Wertes zeigt Strukturen, die mit denen des Wertes maximaler Krümmung κ_1 sowie der mittleren Krümmung K korreliert sind, was zu erwarten war (siehe Abbildungen 6-8 und 6-9). Somit erschien es sinnvoller, direkt die Ausbildung von κ_1 oder K im Hinblick auf die Erkennung von Lineamenten zu interpretieren. Die lokalen Werte von e über die Gesamtfläche integriert entsprechen dem Wert der globalen finiten Einengung der Gesamtfläche. Hierzu erschien es jedoch sinnvoller, den Flächeninhalt jeder Fläche direkt mit der horizontalen Projektion dieser Fläche zu vergleichen. Analog zu der

Definition der horizontalen Einengung einer linienhaften Struktur kann dabei die flächige Einengung ef definiert werden:

$$ef = (F'_A - F_A) / F_A$$

Dabei ist F'_A der Flächeninhalt der deformierten Fläche und F_A der Flächeninhalt der undeformierten Fläche. Dieser Wert ist ein Maß des finiten Gesamteinengungsbetrags in einem größeren flächigen Gebiet, er kann jedoch nicht ohne weiteres für die Einengung an einem Ort einer Formationsgrenze eingesetzt werden. So kann etwa die Betrachtung eines einzelnen überkippten Faltschenkels eine größere finite Einengung vorspiegeln als die Betrachtung der gesamten Faltenstruktur, selbst wenn Teile derselben Formationsgrenze ausgewertet wurden.

Andererseits kann eine Abfolge von Flächen gleicher horizontaler Ausdehnung im Raum in ihrer Einengung durch die globale Ermittlung von ef verglichen werden. Diese Bedingung liegt im Arbeitsgebiet bei der Basis-Fläche der Potoco-Formation und der Basisfläche der San-Vicente-Formation westlich der San-Cristóbal-Störung vor, bei den kretazischen Formationsgrenzen am Westhang des Höhenzugs Corregidores und am Zusammenfluß von Rio Alota und Rio Grande sowie bei den beiden Formationsgrenzen im Paläozoikum von Cerro Khalla Huasi und Cerro Khenayani. Bei den letzten drei Lokalitäten lagern die Flächen jedoch flach bis nahezu sählig einfallend, sowie konkordant.

Um einen Wert für die horizontale Einengung entlang eines Profils zu ermitteln, wäre es nötig, die Raumlinien größter Krümmung tangential zur modellierten Fläche zu ermitteln und hier die Werte von e anhand obenstehender Formel (Kapitel 5-4) zu errechnen. Die wertvollere Information ist jedoch der Betrag der Verkürzung in Einengungsrichtung. Dieser kann geschätzt werden, indem ef durch die Erstreckung der Fläche senkrecht zur Richtung maximaler Krümmung, also entlang der Richtung minimaler Krümmung, dividiert wird.

Für alle modellierten Formationsgrenzen wurde zur Ermittlung von ef eine horizontal projizierte Fläche erzeugt, deren Flächeninhalt mit der ursprünglich modellierten Fläche verglichen wurde. Zusätzlich wurde aus der Erstreckung der Flächen in Richtung der minimalen (lokalen) Krümmung der Wert für e geschätzt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6-1 aufgelistet.

Struktur	Fläche deformiert (km ²) F'_A	Fläche undeformiert (km ²) F_A	Erstreckung normal zur Einengung (km)	Finite Einengung (km) e	Prozentuale Einengung ($ef \cdot 100$)
Corregidores West El Molino Top	2,9	10,6	6,240	1,25	72,5
Corregidores West Santa Lucia Top	16,9	61,3	10,5	4,23	72,5
Westlich San Cristóbal Fault San Vicente Bottom	1362	1551	52,2	3,64	12,25
Westlich San Cristóbal Fault Potoco Bottom	1389	1580	52,2	3,66	12,09

Tabelle 6-1: Finite Verkürzungsbeträge und –verhältnisse aus relevanten modellierten Flächen

Aus diesen Werten lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen. Die finite Einengung wurde für die Einheiten westlich der Corregidores-Störung und westlich der San Cristóbal-Störung ermittelt. Der Wert entspricht etwa 20 % der von BABY *et al.* (1990, 1997) postulierten 20 km Gesamteinengung an der UKSZ. Zu bemerken ist dabei, daß bei Corregidores zwischen der Corregidores Fault und der UKS i.e.S. keine großflächige intensive Deformation der betreffenden Einheiten von Potoco bis San Vicente mehr stattgefunden hat, sondern nur weitspannige

Faltung. Intensive Verformung tritt nur direkt an der Corregidores-Störung (siehe Abb. 4-8) auf, sowie an der UKS i.e.S. in den Einheiten El Molino und Hangende (Abb. 4-10). Auch weiter östlich der UKS i.e.S. geht diese störungsnahe Deformation in eine weitspannige Faltung über. Für die fehlende finite Einengung sind mehrere Strukturen und Prozesse in Betracht zu ziehen. Zum einen ist im Modell die Einengung zwischen UKS i.e.S. und der San-Cristóbal-Störung nicht berücksichtigt, da hier kein Leithorizont modelliert werden konnte. Zum anderen sind eventuelle Einengungsstrukturen unter Sedimentbedeckung nicht modelliert, wie zum Beispiel im Gebiet der Synklinale zwischen Ines-Antiklinale und dem Cerro San Cristóbal. Schließlich ist das erodierte Hangende der Aufschiebungen und Überschiebungen nicht näher quantifizierbar. Direkt am Cerro San Cristóbal sind östlich der San-Cristóbal-Störung noch zwei durch Aufschiebungen zutage gekommene Paläozoikumsaufbrüche erkennbar. Diese lassen eine finite Einengung in der Größenordnung der Mächtigkeit der mitgeschleppten tertiären Sedimente annehmen, also etwa 6 km.

Außerdem wird deutlich, daß zwischen der Liegend- und Hangendgrenze der Potoco-Formation keine Deformation stattgefunden haben sollte, da die finite Einengung für beide Flächen sehr ähnlich ausfällt. Dies war zu erwarten, da eine konstante Mächtigkeit zwischen diesen Flächen Eingabedatum war. Jedoch zeigt das Modell, wie in Abb. 7-2 zu erkennen ist, diesbezüglich eine wichtige Abweichung, auf die im Kapitel 7 noch näher eingegangen werden soll. Dies ist das Ausdünnen der Potoco-Formation im Modell, die durch das Vorhandensein von Strukturen im Untergrund, die jedoch durchaus beide Formationsgrenzen gemeinsam erfaßt haben kann, erklärt werden kann.

Westlich der SCS nimmt bei den südlicheren Strukturen eine Falte (die Ines-Antiklinale) zusätzliche Einengung auf. Da sich die Einengungsstrukturen der UKSZ von der Einmündung des Rio Alota in den Rio Grande aus nach Norden hin auffächern, abtauchen und weitspanniger werden, ist zu vermuten, daß die finite Einengung von Süden nach Norden abnimmt. Dies ist offensichtlich nicht im Einklang mit den Einengungsbeträgen aus dem Flächenmodell. Es scheint daher auch aus diesem Grund angebracht, weitere Einengungsstrukturen im Untergrund der Synklinale bei der Estancia Cieneguillas und nördlich davon anzunehmen.

Zur Ermittlung der Krümmungshauptrichtungen wurden die Krümmatoren an den Knotenpunkten jeder modellierten Formationsgrenzfläche in GoCAD berechnet und zur weiteren Verarbeitung mit Koordinatenangaben exportiert. Bei der Betrachtung der Krümmatoren ist die Basisfläche der San-Vicente-Formation von besonderem Interesse, da sie am großflächigsten modelliert ist, am besten durch Geländeausbisse und Messungen dokumentiert ist und von den modellierten Flächen die größte finite Einengung aufgenommen hat. Abb. 6-7 zeigt auf dieser Fläche die Werte der mittleren Krümmung H , wobei blau negative Krümmung (antiklastische Flächenbereiche) und rot positive Krümmung (synklastische Flächenbereiche) kennzeichnet. Weiß stellt die Umschlagspunkte (bzw. Umschlagslinien) zwischen diesen Bereichen dar, bzw. plane Bereiche ohne Krümmung. Dabei kommt es nicht auf die Orientierung der Fläche an. Dort, wo Umschlagspunkte sich zu Linien verbinden und eine scharfe Begrenzung zwischen anti- und synklastischen Flächenbereichen abbilden, kann eine im Untergrund verborgene Struktur vermutet werden. Strukturell können die weißen Bereiche als Inflexionslinien von Falten oder aber als Störungszonen interpretiert werden. Eine Unterscheidung kann hier jedoch nicht getroffen werden. Eine modellierte Falte ist im Flächenmodell von der Form her mit einer Formationsgrenze, die durch eine Störung vertikal versetzt wurde, durch die bei der Modellierung stattfindende Glättung identisch. Einige dieser weißen Umschlagslinien wurden nun als Lineamente interpretiert und mit den Fernerkundungslineamenten verglichen.

Die Lineamentinterpretation dieser Bereiche (Abb. 6-8) ergibt ein ähnliches Bild wie das der Geländeoberflächendaten (Abb. 6-4 und 6-9). Da nur eine geringe Anzahl von Lineamenten interpretierbar ist, wurde auf die Erstellung eines Richtungshistogramms verzichtet. Dennoch konnten einige Richtungsmerkmale beobachtet werden. Das vorherrschende Streichen ist ebenfalls ESE-WNW gerichtet. Die Nebenmaxima zeigen ein etwas anderes Bild. Anstatt des

deutlichen, um NNW streichenden Nebenmaximums der Streichrichtungen in der Fernerkundungsinterpretation von Lineamenten sind drei untergeordnete Richtungen ausgebildet, zwei davon dicht beieinander um NE und eine um NW. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Lineamentinterpretation der Fernerkundungsdaten ebenfalls Lineamente aus Schichtungsinformationen enthält, die ein Maximum im Streichen der Schichten bilden. Dieses ist in der Richtungsrose der Oberflächenlineamente (Abb. 6-5) deutlich in NNE-Richtung zu erkennen, in den Lineamenten aus Kurvatoren tritt diese Richtung nur untergeordnet auf (Abb. 6-9).

Aus diesen beiden Lineamentinterpretationen ergibt sich eine Möglichkeit, bisher nicht beobachtete, hypothetische Strukturen zu modellieren. Annahme ist, daß Lineamente sowohl an der Oberfläche in Gelände- oder Luftbilddaten als auch in der modellierten Fläche im Untergrund als Störungen angesprochen werden können. Außerdem muß die strukturelle Zusammengehörigkeit der beiden Lineamente erkannt werden. Am Beispiel einiger Strukturen zwischen der Geländeoberkante und der Basisfläche der San-Vicente-Formation soll diese Möglichkeit veranschaulicht werden. Dazu wurden den Lineamenten aus Fernerkundungsinterpretation (Abb. 6-10 A) und Kurvatorenterpretation (Abb. 6-10 B) wieder aus den Flächeninformationen Höhen zugewiesen, so daß sie dreidimensional visualisierbar wurden. Anhand dieser Visualisierung konnten dann Zusammenhänge von Lineamenten interpretiert werden. Zwischen diesen Lineamenten wurden dann hypothetische Störungsflächen als Verbindung konstruiert (Abb. 6-11).

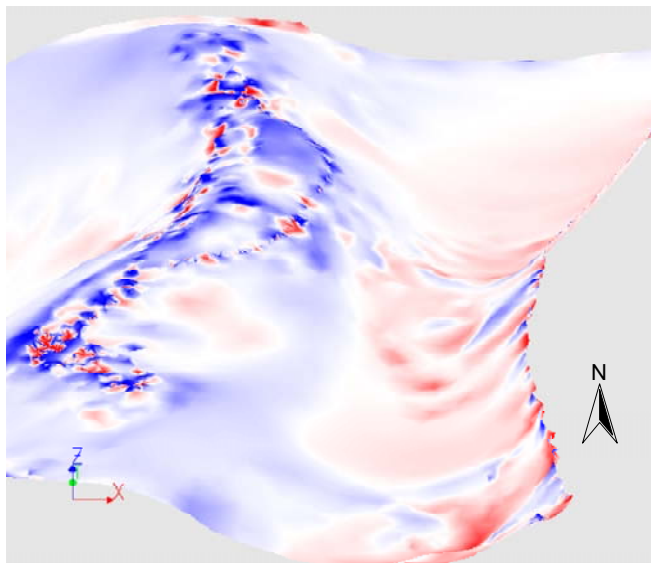
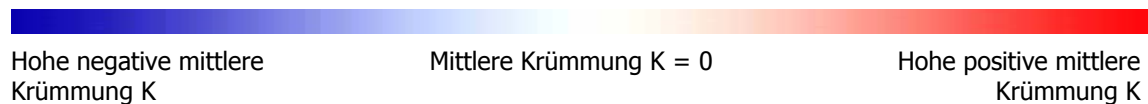


Abb. 6-7: Perspektivische Ansicht der San-Vicente-Basisfläche westlich der SCS mit Blick auf die Ines-Antiklinale (links in blau).



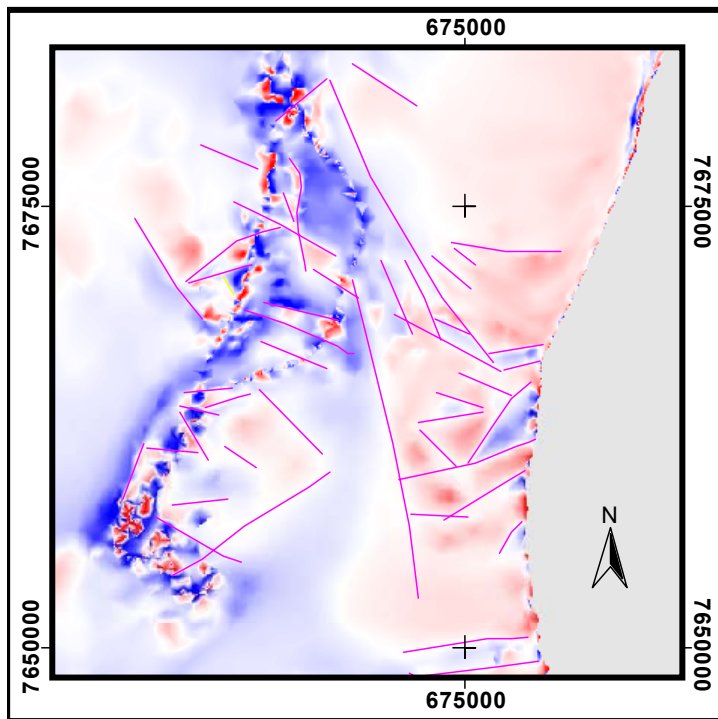
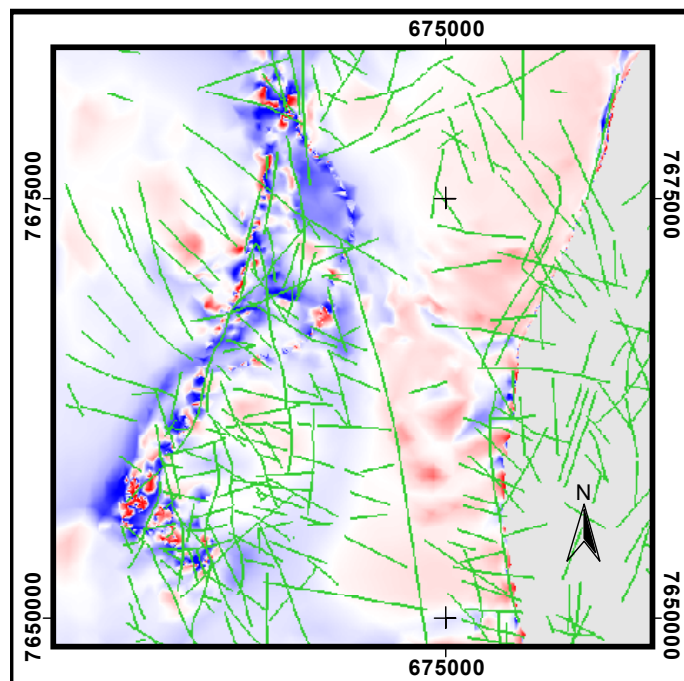


Abb. 6-8: San-Vicente Basisfläche westlich der SCS mit Ines-Antiklinale. Einfärbung mit Kurvatorenwerten, in Magenta auf der San-Vicente-Schichtfläche interpretierte Lineamente. Koordinaten in UTM Zone 19 S, PSAD '56. Lage der Ausschnitte siehe Verzeichnis der Abbildungstafeln.

Abb. 6-9: San-Vicente Basisfläche westlich der SCS mit Ines-Antiklinale. Einfärbung mit Kurvatorenwerten, in Grün Oberflächenlineamente aus Abbildung 6-4. Koordinaten in UTM Zone 19 S, PSAD '56.



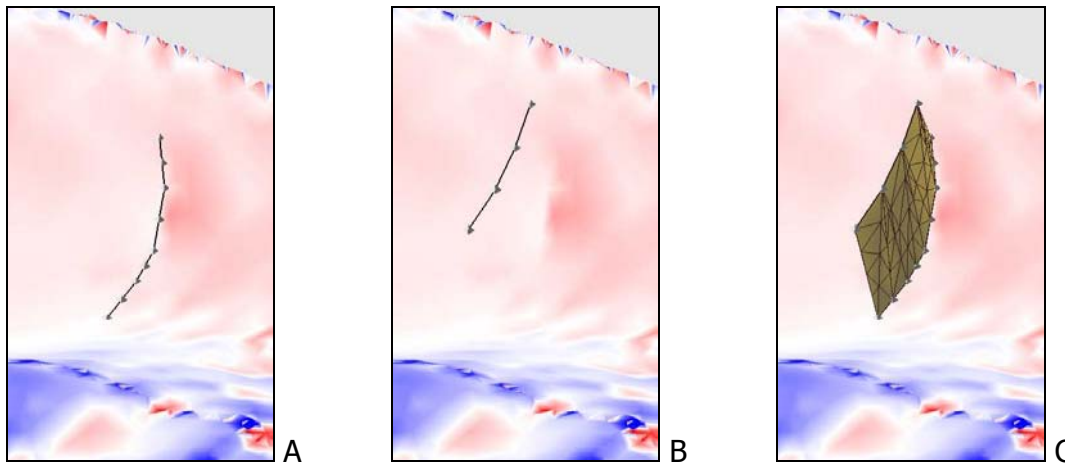


Abb. 6-10: Schema zur Konstruktion von hypothetischen Störflächen (C) aus Kurvaturenelementen (A) und Oberflächenlineamenten (B)

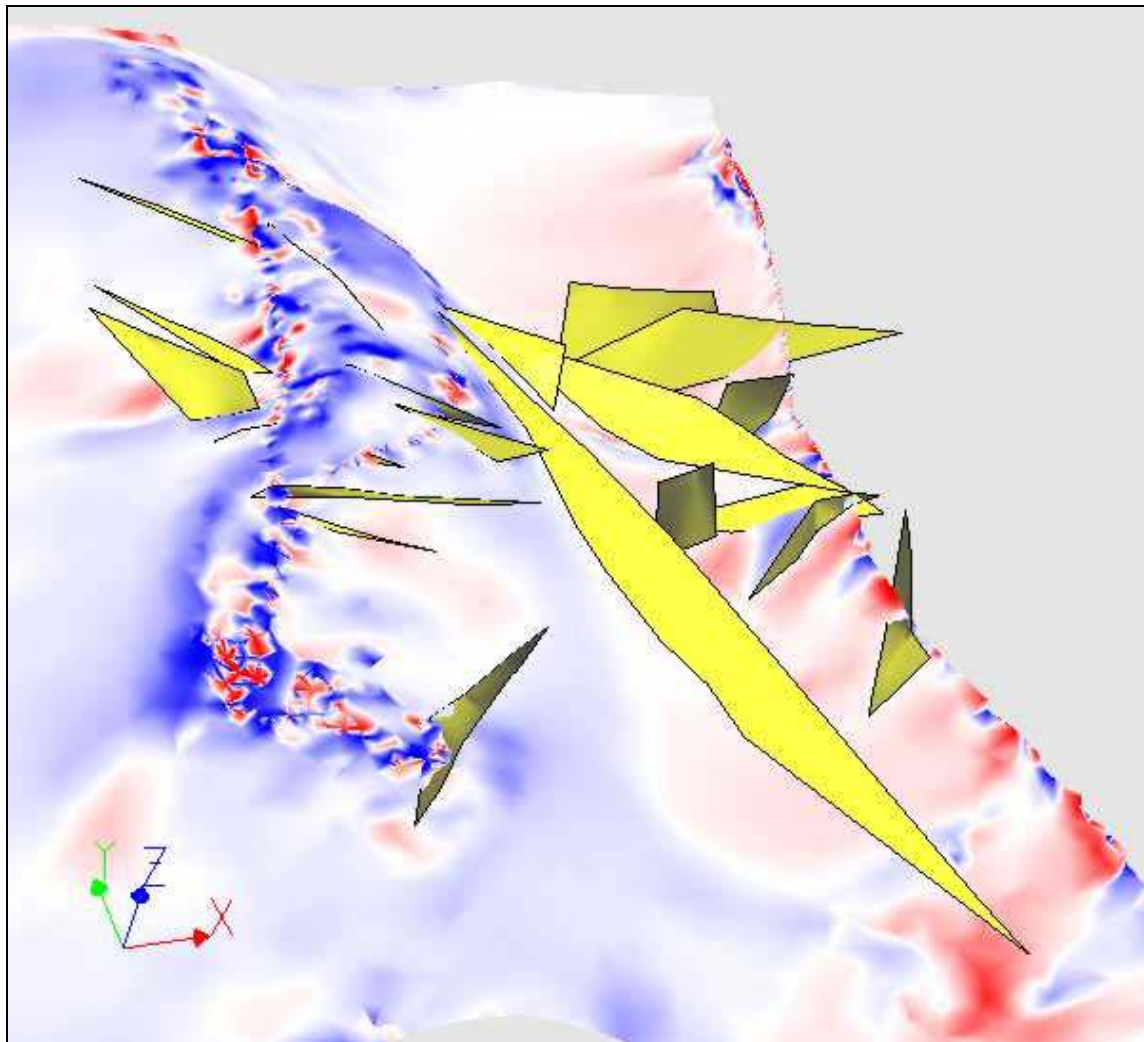


Abb. 6-11: Perspektivische Ansicht von SSW oben der San-Vicente-Basisfläche westlich der SCS mit konstruierten hypothetischen Störflächen (gelb). Ines-Antiklinale links in blau. Norden in Richtung Y.

Die große Mehrzahl dieser hypothetischen Störungsflächen ist WNW-ESE, und damit senkrecht zur UKSZ orientiert. Die meisten Flächen fallen saiger bis steil ein ($>70^\circ$). Einige wenige jedoch

fallen flacher ein, so eine Fläche innerhalb der Ines-Antiklinale, die flach nach W einfällt. Eine andere Störungsfläche streicht NNW-SSE über eine lange Strecke. Hierbei könnte es sich um eine Inflexionslinie der Ostflanke der Ines-Antiklinale handeln oder aber um eine Auf- oder Überschiebung, die in einem Winkel von etwa 45° auf die UKSZ zuläuft. Wie oben erwähnt, kann hier keine Unterscheidung getroffen werden. Da sie im Gelände nicht zu beobachten war, kann auch keine genauere Aussage gemacht werden. Bei der Mehrzahl der Störungsflächen handelt es sich vermutlich um Seitenverschiebungsbahnen oder Dehnungsklüfte (ac-Klüfte der Ines-Antiklinale?). Letzteres erscheint deshalb plausibel, weil die Haupteinengungsrichtung parallel zu der Streichrichtung der modellierten Störungsflächen liegt.

Diese Flächen treten in einigen Bereichen als Flächenscharen auf, die subparallel angeordnet sind. Zwei dieser Flächenscharen vereinen sich wenige km südlich des San-Cristóbal-Vulkankomplexes, eine dritte streicht parallel nördlich davon in einigen km Entfernung. Bemerkenswert ist dabei, daß die Stolleneingänge zweier bekannter Cu-Lagerstätten weniger als 1500 m vom Kreuzungsbereich dieser Flächenscharen und einem nicht näher definierbaren stratigraphischen Horizont in der Nähe der San-Vicente-Basisfläche entfernt sind. Die beiden Minen, Mina Puntillas und Mina Inés, liegen an der westlichen Innenflanke der ausgeräumten Ines-Antiklinale. Auffällig ist, daß eine weitere, Mina Cobrizos, ebenfalls in einem stratigraphisch korrespondierenden Horizont liegt, jedoch nördlich des Cerro San Cristóbal.