

Simone Schmid, BSc

Strukturgeologie und Tektonik im Bereich des Agua Negra Passes – San Juan, Argentinien, und deren ingenieurgeologische Auswirkungen

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
„Master of Science“
An der naturwissenschaftlichen Fakultät der
Karl- Franzens- Universität Graz und der Technischen Universität Graz

Betreuer: Univ.- Prof. Mag. Dr. Walter Kurz
Institut für Erdwissenschaften
Karl- Franzens- Universität Graz,

Ass.Prof.i.R. Dr.phil. Klima Kurt
Institut für Angewandte Geowissenschaften
Technische Universität Graz

& Mag. Giorgio Höfer-Öllinger
Geoconsult ZT GmbH

Graz, 2013

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUARY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

date

(signature)

Kurzfassung

Im Zuge der Masterarbeit, die in Kooperation mit der Firma Geoconsult ZT GmbH erstellt wurde, wurden die geologischen Gefügeelemente im Bereich des Agua Negra Passes in der Provinz San Juan – Argentinien aufgenommen, um daraus Rückschlüsse auf die tektonischen Deformationsereignisse in diesem Gebiet ziehen zu können. Der üAgua Negra Pass ist mit 4.775 m der höchste Andenpass zwischen Chile und Argentinien und momentan nur in den Sommermonaten befahrbar. Durch das in Planung befindliche Tunnelprojekt „Agua Negra“ soll der Pass das ganze Jahr über befahrbar gemacht werden.

Um die Arbeit im Gelände zu erleichtern, wurde vor der Feldarbeit versucht geologische Großstrukturen anhand von Bildern von früheren Geländebegehungen der Firma Geoconsult ZT GmbH, sowie anhand von GoogleEarth Aufnahmen festzustellen.

Die Geländearbeit, zur Aufnahme der Gefügedaten, fand im April 2012 statt. Die GPS Daten der 78 im Gelände aufgenommenen Aufschlüsse wurden mit der Software ArcGIS dargestellt. Anschließend wurden die Aufschlüsse in Domänen untergliedert und die Gefügedaten mit der Software WinTensor ausgewertet und innerhalb der Domänen nach Bewegungssinn und Orientierung der Hauptnormalspannungen gegliedert. Dadurch konnten die Paläospannungsorientierungen ermittelt werden. Anschließend wurde versucht aus diesen Spannungsplots Deformationsereignisse zu ermitteln. Es wurden so zwei unterschiedliche Deformationsevents festgestellt, deren zeitliche Einteilung jedoch aufgrund der Aufschlussbeschaffenheit im Gelände nicht möglich war.

Die Deformationsereignisse wurden anschließend in die Karte der Lineamente und Störungssysteme der Firma Geoconsult ZT GmbH integriert. Hierbei stellte sich heraus, dass sich die Seitenverschiebungssysteme der zwei Ereignisse sehr gut mit den Störungen der Karte korrelieren lassen.

Im letzten Kapitel werden noch die Auswirkungen der Strukturen auf den geplanten Agua Negra Tunnel behandelt.

Abstract

In the course of the master thesis, which has come into existence in cooperation with the company Geoconsult ZT GmbH, the structural geological elements in the region of the Agua Negra Pass in the province San Juan in Argentina were measured to get information about the tectonical deformation phases of the region. The Agua Negra Pass is with an elevation of 4.775 m the highest pass between Chile and Argentina and at the moment only accessible in the summer months. Due to the Agua Negra Tunnel the Pass should be accessible all over the year.

In preparation for the field work, pictures from Geoconsult ZT GmbH from previous field studies and pictures of GoogleEarth were analysed to get information of the geological main structures of the San Lorenzo valley to alleviate the field work.

The field work for the measurement of the structures took place in April 2012. Afterwards the GPS data of the 78 measured geological outcrops were illustrated with the software ArcGIS. Adjacent the outcrops were divided into domains and the structural data were analysed by the software WinTensor and divided after their direction of movement and the orientation of the principal stresses. This analysis devoted two different deformation phases. A temporal placement of the deformation phases was not possible due to the conditions of the outcrops in the field.

The two deformation phases were correlated with the map of the lineaments and fault systems from Geoconsult ZT GmbH. The strike slip faults of the analysed data fit quite well to the fault systems of the map.

The last chapter of the master thesis deals with the effect of the measured geological elements on the Agua Negra Tunnel.

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	1
2 Geographischer Überblick	2
3 Geologischer Überblick	3
3.1 Die Anden	3
3.2 Phasen der andinen Gebirgsbildung im Bereich der zentralen Anden	4
3.2.1 Erste Phase der andinen Gebirgsbildung	7
3.2.2 Zweite Phase der andinen Gebirgsbildung	9
3.2.3 Dritte Phase der andinen Gebirgsbildung	11
3.3 Geologie im Bereich des Agua Negra Pass	13
3.3.1 Tektonik	13
3.3.2 Lithologien	21
4 Methodik	23
4.1 Geländearbeit	23
4.2 Stressanalyse	26
4.3 WinTensor	28
5 Datenauswertung	32
5.1 Auswertung der Geländedaten	32
5.1.1 Aufschlussprotokolle	32
5.1.2 Erstellung von Domänen und Ermittlung der Hauptnormalspannungsrichtungen	34
5.1.3 Die Domänen im Detail	39
5.1.4 Darstellung der Spannungsplots in der Karte	52
6 Ergebnisse	55
6.1 N-S Kompression mit E-W Dehnung	55
6.2 N-S Dehnung mit E-W Kompression	58
7 Tunnel de Agua Negra	61
7.1 Das Projekt	61
7.2 Auswirkungen der aufgenommenen Strukturen	62
7.2.1 Geotechnische Auswirkungen von Extensions- und Kompressionsbedingungen	63
A.1 Anhang	67
A.1.1 Aufschlussprotokoll	67
Literaturverzeichnis	131

1 Aufgabenstellung

Im Zuge der Masterarbeit sollen die geologischen Gefügeelemente im Bereich des Agua Negra Passes, an der Staatsgrenze zwischen Chile und Argentinien, in der Provinz San Juan – Argentinien, aufgenommen werden um daraus Rückschlüsse auf die tektonischen Deformationsereignisse in diesem Gebiet ziehen zu können. Es sollen die verschiedenen lokalen Deformationsphasen bestimmt und wenn möglich eine zeitliche Einteilung der Ereignisse vorgenommen werden, sowie im Idealfall andinen Phasen von Extension und Kompression zugeordnet werden. Anschließend soll versucht werden, die daraus resultierenden Deformationsereignisse in bereits vorhandene Studien aus der näheren und weiteren Umgebung eingliedern zu lassen, oder ob sich neue Modelle zur tektonischen Entstehung aufstellen lassen. Des Weiteren sollen die Auswirkungen der Strukturen auf den geplanten Agua Negra Tunnel zwischen Chile und Argentinien behandelt werden.

2 Geographischer Überblick

Das Arbeitsgebiet befindet sich im Hauptgebirgszug der zentralen Anden im südlich des Agua Negra Pass ($30^{\circ}11'34''S$, $69^{\circ}49'29,5''W$) gelegenen San Lorenzo Tal in der Provinz San Juan - Argentinien. San Juan ist eine von 23 Provinzen und liegt im westlichen Teil Argentiniens an der Grenze zu Chile. Das San Lorenzo Tal hat zwei größere Seitentäler: zum einen die Q. Olivares Norte und zum anderen die Q. Amarilla, im Osten schließt quer dazu die Q. Agua Negra (Abbildung 1).



Abbildung 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes an der Grenze zwischen Chile und Argentinien. Die Untersuchungen wurden im östlichen Bereich des San Lorenzo Tales durchgeführt.

Der Agua Negra Pass ist mit 4.775 m der höchste Anden Pass zwischen Chile und Argentinien und ist von argentinischer Seite über die Straßenroute RN 150 und von chilenischer Seite über die Route CH 41 erreichbar. Bei der RN 150 handelt es sich um eine Schotterstraße, die im Zuge des Tunnelprojektes asphaltiert und für den Schwerverkehr ausgebaut und gesichert wird. Die nächstgelegenen Grenzübergänge zwischen Argentinien und Chile sind in der südlich gelegenen Provinz Mendoza und in der nördlich gelegenen Provinz La Rioja. Die Provinz San Juan liegt in der ariden Klimazone. Durch den geringen Niederschlag ist das Gebiet um den Pass, trotz der großen Höhen, in den Sommermonaten größtenteils Schneefrei. Die Geländearbeit fand in einer Höhe von 4.000 m und 4.700 m statt.

3 Geologischer Überblick

3.1 Die Anden

Die Anden sind mit einer Längserstreckung von ca. 7.500 km der längste und aktivste zusammenhängende Gebirgszug der Erde, der an einer Ozean-Kontinent Subduktionszone gebildet wurde. Er erstreckt sich über die gesamte westliche Seite des südamerikanischen Kontinentes (Abbildung 2). Der pazifische Kontinentalrand Südamerikas gehört zu den aktiven Kontinentalrändern der Erde. Bei diesen Rändern handelt es sich um besonders dynamische Bereiche mit einer der höchsten Konzentrationen an Erdbeben und aktiven Vulkanen. Ebenso findet man in diesem Bereich ein großes Vorkommen verschiedener Erzlagerstätten. Die höchste Erhebung der Anden ist mit 6.962 m der Aconcagua (Abbildung 3), der gleichzeitig der höchste Berg Nord- und Südamerikas ist.



Abbildung 2: Der andine Gebirgszug.
Quelle: <http://www.planet-wissen.de/laender_leute/berg_und_tal/anden/index.jsp>



Abbildung 3: Der Aconcagua ist mit einer Höhe von 6.962 m die höchste Erhebung der Anden. Quelle: <<http://de.wikipedia.org/wiki/Aconcagua>>

Die Höhe und Mächtigkeit der Anden ergibt sich durch eine Krustenverkürzung während der Subduktion der ozeanischen Nazca Platte unter die leichtere kontinentale Kruste der südamerikanischen Platte. Dieser Prozess ist ungefähr seit dem Jura aktiv. Momentan wird die Nazca Platte mit etwa einer Geschwindigkeit von 8,4 cm/Jahr (Oncken & Echtler 2002) subduziert.

Durch die weite Nord – Süd Ausdehnung ist die Mächtigkeit des Gebirgszuges in Abhängigkeit der Geometrie, der Subduktion, des Klimas, sowie der Subduktionsgeschwindigkeit der verschiedenen Zonen abhängig. Nach dem Winkel der einfallenden Platte im Zuge der Subduktion unterscheidet man in den Anden zwei Zonen: zum einen eine flach einfallende Subduktion mit einem Einfallswinkel $<10^\circ$ und zum anderen eine steiler einfallende Wadati-Benioff Zone mit einem Subduktionswinkel von ca. 30° .

3.2 Phasen der andinen Gebirgsbildung im Bereich der zentralen Anden

Im folgenden Kapitel 3.2 wird die tektonische Entwicklung der Anden nach Charrier et al. (2007) zusammengefasst.

Die andine Gebirgsbildung begann im frühen Jura und ist bis heute aktiv. Nach Coira et al (1982) und R. Charrier et al (2007) wird der andine tektonische Zyklus in eine frühe und späte Periode und diese wiederum in drei Phasen untergliedert (Tabelle 1). Die erste Phase verläuft vom späten Unterjura bis zur späten Unterkreide und wird in zwei Subphasen unterteilt. Die zweite Phase erstreckt sich von der späten Kreide bis ins frühe Paläogen und wird ebenfalls in zwei Subphasen untergliedert. Die dritte und letzte Phase der andinen Gebirgsbildung verläuft vom frühen Paläogen bis rezent (Tabelle 1).

Tabelle 1: Phasen der andinen Gebirgsbildung beschrieben von R. Charrier et al (2007), wobei die Perioden und Phasen ursprünglich von Coira et al. (1982) beschrieben wurden.

Periode	Phase	Subphase	Alter
späte Periode	dritte Phase		spätes Paleogen bis rezent
	zweite Phase	zweite Subphase	frühes Paleogen
		erste Subphase	frühe bis späte Kreide
frühe Periode	erste Phase	zweite Subphase	Kimmeridgian-Tithonian bis Albian
		erste Subphase	frühe Jura bis Kimmeridgian

Innerhalb dieser tektonischen Phasen der Gebirgsbildung änderte sich die Geometrie der Subduktion mehrmals (Abbildung 4).

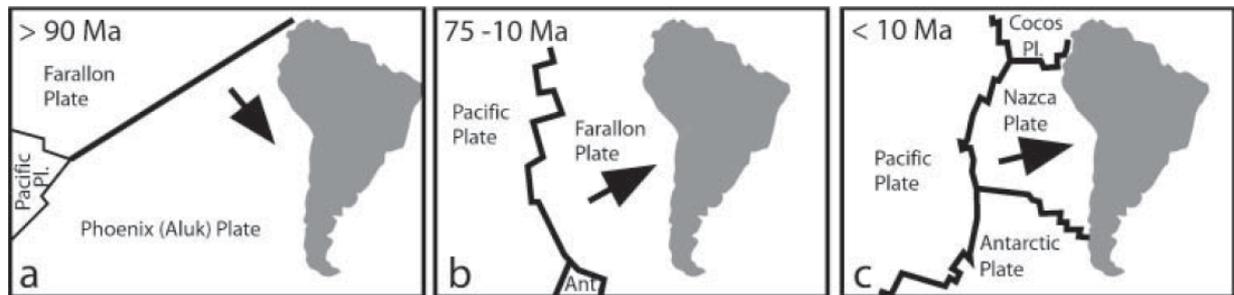


Abbildung 4 aus Charrier et al (2007): Plattentektonik und Geometrie im Verlauf der andinen Gebirgsbildung. (a) frühe Oberkreide; (b) späte Kreide bis spätes Miozän; (c) spätes Miozän bis Rezent, aus R. Charrier et al. Während der frühen Oberkreide erfolgte eine schräge Bewegung der Farallon und Phoenix Platte in Richtung des südamerikanischen Kontinentes. Im Zeitraum zwischen 75-10 Ma bewegte sich die Farallon Platte orthogonal auf den Kontinentalrand zu. Seit 10 Ma wird die Cocos Platte an der nördlichen Spitze Südamerikas subduziert, im zentralen Bereich wird die Nazca Platte subduziert und an der Südspitze des südamerikanischen Kontinentes erfolgt die Subduktion der antarktischen Platte.

Im Laufe der Zeit veränderte sich nicht nur die Geometrie der Platten an der Subduktion sondern auch die Konvergenzrate (Abbildung 5). Ebenso kommt es immer wieder zu einem Wechsel von Extensions- und Kompressionsphasen.

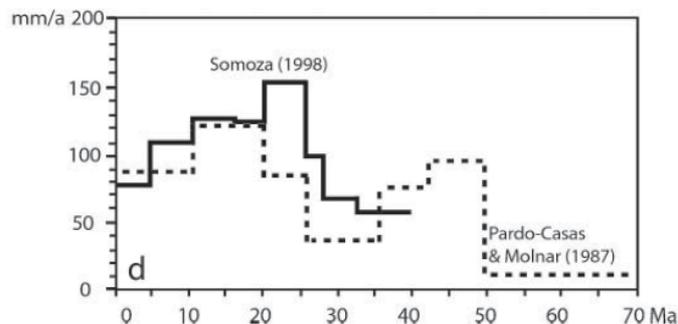


Abbildung 5 aus Charrier et al (2007): Konvergenzraten während des Känozoikums nach Somoza (1998) und Pardo-Casas & Molnar (1987). Laut Pardo-Casas & Molnar (1987) stieg die Konvergenzrate um 50 Ma rapide von ca. 10 mm/Jahr auf ca. 100 mm/Jahr an. Anschließend kam es wieder zu einem Rückgang der Konvergenz, nachdem sie bei 25 Ma wieder deutlich zunimmt. Die Kurven von Somoza (1998) und Pardo-Casas & Molnar (1987) verlaufen sehr ähnlich, bis auf einen stärkeren Peak von Somoza (1998) zwischen 25 und 20 Ma.

Frutos (1980) zeigt die Beziehung zwischen Ozeanbodenspreizungsrate in cm/Jahr und den tektonischen Phasen von Extension und Kompression (Abbildung 6). Bei einer hohen Spreizungsrate kommt es zu kompressiver Tektonik, im Gegensatz zu Zeiten mit geringeren Spreizungsraten in denen extensive Tektonik vorherrschend ist. Generell ist zu sehen dass sich auch nach Frutos (1980) Phasen von Extension und Kompression in sehr regelmäßigen Abständen abwechseln.

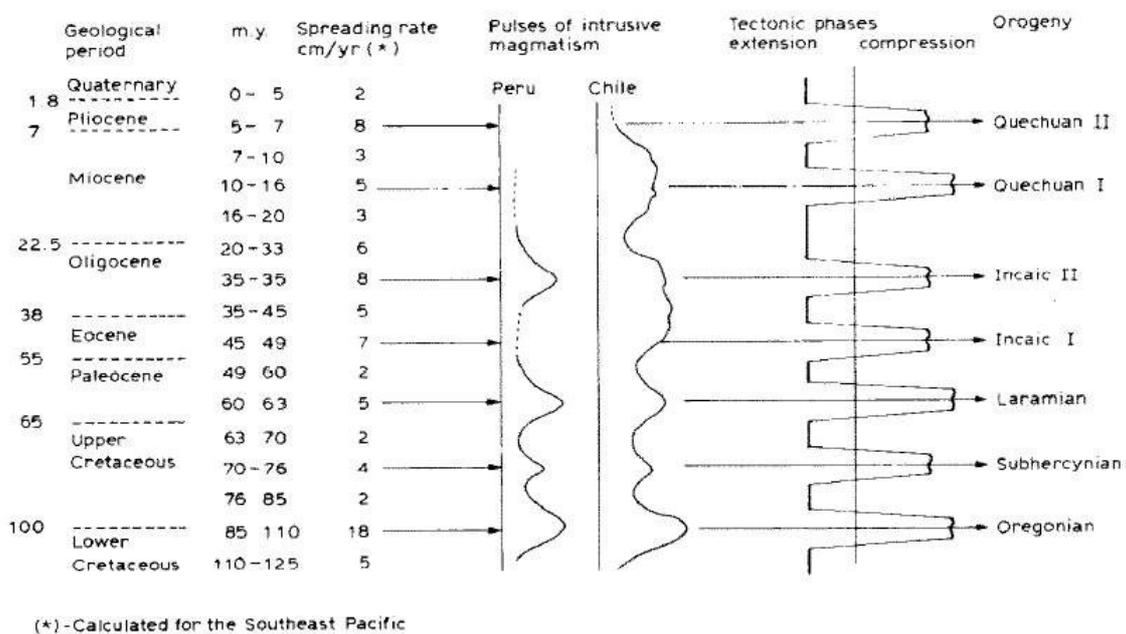


Abbildung 6 aus Frutos, (1980): Beziehung zwischen Ozeanbodenspreizung und Extensions- und Kompressionsphasen im andinen Gebirgsbildungszyklus.

3.2.1 Erste Phase der andinen Gebirgsbildung

Die erste Phase der andinen Gebirgsbildung erstreckt sich vom späten Unterjura bis zur späten Unterkreide und lässt sich in zwei Subphasen gliedern. Die erste Phase (späte Unterjura bis Kimmeridgian) ist durch intensive Aktivität im Bogen und der Bildung eines transgressiven und regressiven marinen Zyklus im Backarc Becken geprägt. Die zweite Subphase (Kimmeridgian bis Aptian-Albian) ist durch weniger Aktivität im Bogen und durch einen zweiten transgressiven und regressiven marinen Zyklus im Backarc Becken charakterisiert.

Während der ersten Phase bildeten sich ein Nord-Süd orientierter magmatischer Bogen entlang des heutigen Küstengebirgszuges, sowie ein Backarc Becken östlich davon. Da die Subduktion für ungefähr 40-50 Ma inaktiv war, resultierte die Extension während der Bildung des Bogen und des Backarc Beckens vermutlich durch die geringe Kopplung der alten und damit kalten ozeanischen Platte und West-Gondwana. Diese Bedingungen waren ausschlaggebend für eine intensive magmatische Aktivität entlang des Bogens und reichlich Sedimentation im Bereich des Backarc Beckens.

Generell herrschten während der gesamten ersten Gebirgsbildungsphase vorwiegend Extensionsbedingungen vor, was sich durch geochemische Daten und durch die enorme Mächtigkeit der vulkanischen Ablagerungen und Backarc Sedimente widerspiegelt. Während der Subduktion erfolgte eine Deformation der Kruste im magmatisch aktiven Bogen und in der weiter östlich gelegenen Backarc Region. Zum Ende der ersten Gebirgsbildungsphase in der späten Kreide kam es zu einem kurzem kompressiven Event, welches das Backarc Becken invertierte.

Die vorwiegende Extensionstektonik ist vermutlich auf einen Subduktions-Rollback zurückzuführen. Dabei verlagern sich der Ansatzpunkt der ozeanischen Platte an der Subduktion und damit auch die Tiefseerinne. Wenn die obere Platte der Verlagerung nicht mit derselben Geschwindigkeit folgt, kommt es zu einem sogenannten Subduktions-Rollback und in weiterer Folge zu einer Dehnungstektonik. Dieses Phänomen tritt nur bei einem steilen Einfallswinkel der Subduktion auf. Ein weiterer Grund für die extensionalen Verhältnisse könnte eine Hebung des asthenosphärischen Keiles unterhalb des Arc und Backarc Bereiches sein.

Während dieser ersten Phase der andinen Gebirgsbildung bildet sich die Atacama Störungszone, welche seit dem Jura aktiv ist. Bei dieser Störungszone handelt es sich um eine Seitenverschiebung, welche sich etwa 1.000 km (20°S bis 32°S) parallel zum Graben erstreckt. Sie ist ein wichtiges strukturelles Element in den zentralen Anden und kontrolliert die Deformation entlang des Bogens. An der Störungszone wurden sowohl sinistrale, als auch dextrale Bewegungen festgestellt und es kam sowohl zu duktiler, als auch zu spröder Deformation. Die ältesten aufgeschlossenen Gesteine, aus dem mittleren bis frühen Oberjura, zeigen einen sinistralen Bewegungssinn entlang der Atacama Störungszone. Die unterschiedlichen Bewegungen an der Atacama Störung sind auf eine veränderte Geometrie der Platten zurückzuführen (Abbildung 4). Vom Jura bis in die frühe Kreide kam es zu einer sinistralen Bewegung, welcher in der späten Kreide zu einem dextralen Bewegungssinn konvertierte.

Im Backarc Bereich gab es in der ersten Phase zwei Extensionsperioden. Sie fanden jeweils zu Beginn der zwei Subphasen im späten Unterjura und im Kimmeridgian statt. Wobei der zweite Event vermutlich wesentlich stärker war und es dadurch zu intensiver vulkanischer Aktivität im Backarc Bereich kam. Durch diese zweite Riftphase kam es außerdem zu einer Reaktivierung der Störungen aus der ersten Extensionsphase.

Am Ende der ersten andinen Gebirgsbildungsphase kommt es im Backarc Bereich vermutlich zu einem kompressiven Event und zu einer Deformation, Hebung und Erosion der Ablagerungen aus dem frühen Jura bis späten Unterkreide. Die Backarc Sedimentfüllungen wurden durch einen Ostvergenten Falten- und Überschiebungsgürtel invertiert.

Zwischen dem Jura und der frühen Kreide herrschte durchgehende vulkanische Aktivität im Bereich zwischen 26°S und 30°S vor. Während dieser Aktivität war die Subsidenzrate sehr hoch. Nach dieser ersten Gebirgsbildungsphase, mit der Reaktivierung der Subduktion, kam es in der frühen Oberkreide zur zweiten andinen Gebirgsbildungsphase.

3.2.2 Zweite Phase der andinen Gebirgsbildung

Die zweite Phase der andinen Gebirgsbildung war paläographisch durch ein weites Forearc Becken, einen magmatischen Bogen – welcher bis zu 100 km von der heutigen Küstenlinie entfernt ist – und ein Vorlandbecken geprägt. Während der gesamten zweiten Gebirgsbildungsperiode fand plutonische Aktivität statt.

In der frühen Oberkreide fand ein wesentlicher Wechsel in der Tektonik am südamerikanischen Kontinentalrand statt. In dieser Episode erfolgte eine sehr schnelle Produktion der ozeanischen Kruste im pazifischen Ozean. Diese Krustenproduktion war vermutlich mit einem geringeren Einfallswinkel der Subduktion unter die südamerikanische Kontinentalplatte verbunden. Als Folge dieser Änderung erreichte die zweite Regressionsperiode der vorherigen Phase ihren Höhepunkt in der Hebung des kontinentalen Randes während einer intensiven Kontraktionsphase. Es kommt zu einer Backarc Beckeninversion mit der teilweisen Hebung und Erosion der aus dem frühen Jura bis frühen Kreide stammenden Backarc Beckenfüllungen. Diese Phase trennt die von Coira et al. (1982) beschriebene frühe und späte Periode im andinen Gebirgsbildungszyklus.

Nach dieser Episode wanderte der magmatische Bogen in östliche Richtung und ein kontinentales Vorlandbecken bildete sich östlich, sowie eine weite Forearc Region westlich des Bogens. Die Subduktion war in dieser Zeit vorwiegend schräg zum Plattenrand und die Bewegung der ozeanischen Farallon Platte unter den aktiven Kontinentalrand war nun eine Nord-Süd gerichtete dextrale Seitenverschiebung.

Diese Phase der Gebirgsbildung ist charakterisiert durch eine extensionale Episode verbunden mit intensiver magmatischer Aktivität, welche die ganze zweite Phase aktiv war.

Entlang des magmatischen Bogens bildete sich eine Serie von störungskontrollierten Extensionsbecken mit aus der späten Kreide stammenden Sedimenten.

In der späten Kreide sowie im frühen Paläogen fand eine Inversion dieser Becken statt. Das Ende dieser Phase ist durch ein großes Deformationsereignis im Eozän geprägt.

Im Zeitraum der Kreide – Paläogen Grenze fand vermutlich eine Kompression statt. Nach dieser Phase folgte eine Extension, welche eine geringere Intensität als das

Extensionsereignis in der späten Kreide hatte. Zum Schluss kam es zu einer neuen Kompressionsphase, welche am Ende der zweiten andinen Phase zum Stillstand kommt.

Die große Mächtigkeit der vulkanischen und sedimentären Ablagerungen während der späten Kreide zeigen, dass in dieser Phase eine starke Subsidenz vorgeherrscht haben muss. Dies spricht wiederum für ein Extensionsereignis während dieses Zeitraums.

Die geochemischen Eigenschaften der Arc Ablagerungen in der Region um La Serena zeigen eine beträchtliche Reduktion der Krustenmächtigkeit seit der frühen Kreide und bestätigen somit das Konzept der starken Extensionsbedingungen während der späten Kreide. Zu dieser Zeit (späte Kreide und frühes Känozoikum) herrschte eine geringe Konvergenzrate zwischen der Farallon Platte und der südamerikanischen Platte. In der späten Kreide kam es auch im Norden Chiles zur Extension, diese führte zur Bildung des Salta Rift im andinen Vorland im Westen Argentinien.

Der dritte andine kompressive Event fand am Ende der zweiten andinen Gebirgsbildungsphase im Eozän statt. In dieser Zeit kommt auch die Aktivität im magmatischen Bogen zum Stillstand. Es kommt zu einer tektonischen Inversion des Bogens und des Extensionsbeckens, welches in der letzten Subphase (frühes Paläogen) gebildet wurde. Ebenso kam es zu einer Deformation der Beckenfüllungen.

An der Grenze zwischen der zweiten und dritten Phase der andinen Gebirgsbildung herrschen sehr hohe Konvergenzraten, verbunden mit einer geringen Obliquität der Konvergenz, um 45 Ma vor.

3.2.3 Dritte Phase der andinen Gebirgsbildung

In dieser dritten Phase der andinen Gebirgsbildung erreichte das Orogen im Bereich von Chile und Argentinien seine heutige Konfiguration. In dieser Zeit fand eine Hebung des andinen Gebirges statt und der vulkanische Bogen erreichte seine heutige Position.

Der NE orientierte Juan Fernández Rücken kollidierte im Miozän, im Bereich von Südperu und Nordchile, gegen den Kontinentalrand. Durch eine Ost-West orientierte Konvergenz, seit 26 Ma, wanderte der Rücken mit einer Geschwindigkeit von 200 km/Ma zu seiner heutigen Position.

In dieser Phase war die tektonische Entwicklung nördlich von 47°S durch die relativen Bewegungen zwischen der südamerikanischen Kontinentalplatte und der Nazca Platte kontrolliert. Bis zum mittleren Eozän herrschte von 49,5 Ma bis 42 Ma mit >10 cm/Jahr eine sehr hohe Konvergenzrate und die Ablagerungen der vorherigen Phase unterlagen einer starken Deformation. Nach dieser Episode verringerte sich die Konvergenzrate bis 26 Ma und die Bewegung der Platten war nahezu parallel zur Plattengrenze. Nach dieser Phase verringerter Konvergenzrate, erfolgte bis 12 Ma wieder eine Zunahme der Rate und die relativen Bewegungen der Platten verliefen nicht mehr parallel zur Plattengrenze sondern orthogonal. Diese Änderungen in der Kinematik der Platten, sowie der Konvergenzrate, führte im Forearc Bereich zu einer Hebung und synchron verlaufender Extension, Seitenverschiebung und kompressiver Deformation.

Die Einheiten, welche während des späten Eozän bis heute abgelagert wurden, sind nicht gleichmäßig verteilt. So fehlt die zentrale Depression im Bereich der flach einfallenden Subduktionszone bedingt durch die Subduktion des Juan Fernández Rücken, die zu einer erheblichen Hebung führt. Zwischen 27°S und 33°S fehlt die vulkanische Aktivität, und die Frontal Cordillera sowie die mächtige Pampean Range liegen weiter östlich im andinen Vorland Argentiniens, anstatt der weniger mächtigen Falten- und Überschiebungsgürtel, die nördlich und südlich dieser Zone entwickelt sind.

Dieser Bereich gehört zum Segment der flach einfallenden Subduktionszone, in der die zentrale Depression sowie der vulkanische Bogen durch die Subduktion des passiven Juan Fernández Rücken nicht ausgebildet ist.

Die Segmentierung der Anden ist durch die Subduktion des Juan Fernández Rücken (27°S bis 33°S) kontrolliert. Der Rücken ist Teil der Nazca Platte und hat mit 85 mm/Jahr dieselbe Konvergenzrate wie diese. Diese Konvergenzrate herrscht seit der Neuorientierung der Platten nach der Teilung der Farallon Platte. Der aseismische Rücken entstand im Bereich des Juan Fernández Hot Spot und traf vor etwa 12 Ma, auf Höhe von Valparaiso (33°S), auf den Kontinentalrand. Die Subduktion des Rückens führte von da an zu einer Reduktion des Subduktionswinkels. Dies wiederum führte zu einem Fehlen der zentralen Depression und des aktiven Vulkanismus (Abbildung 7).

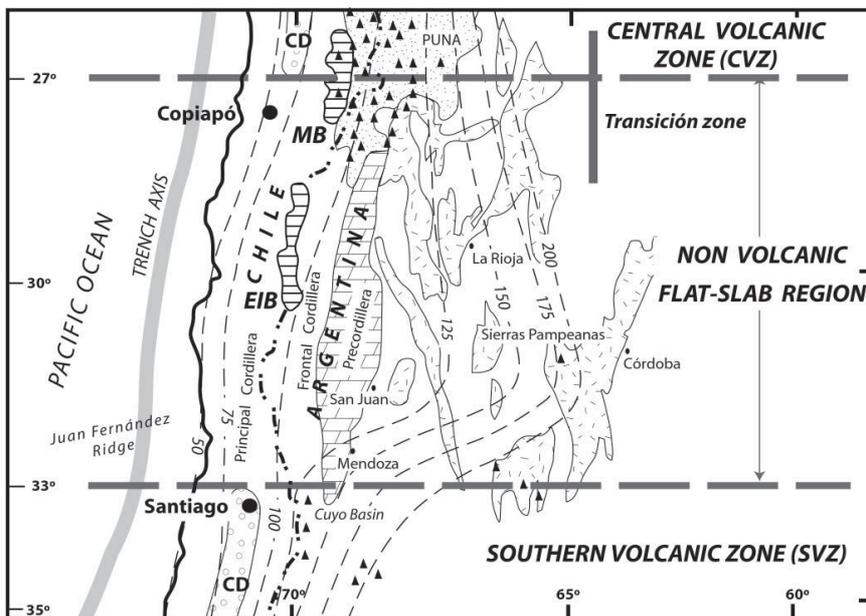


Abbildung 7 aus Charrier et al (2007): Flat-Slab Segment mit der Verteilung der Vulkane (als Dreiecke gekennzeichnet) und der Tiefe der Subduktionszone in km. Es ist deutlich zu sehen dass im Bereich des flachen Einfallswinkels der Subduktion keine aktiven Vulkane vorkommen und ebenso die zentrale Depression (CD) nicht ausgebildet ist.

Die Bildung von kurzen Kompressionsphasen im Orogen sind verbunden mit Phasen von stärkerer relativer Plattenbewegung. Im Gegensatz dazu werden Episoden von Extensionsperioden mit niedrigeren Konvergenzraten verbunden (Abbildung 5). Im Känozoikum erfolgte eine Episode mit hoher Konvergenzrate und damit einer Kontraktion des Orogens, sowie einem sich nach Osten verlagerndem magmatischen Bogens. Im Gegensatz dazu gab es Perioden mit geringeren Konvergenzraten bei denen es zu tektonischer Extension und intensiver magmatischer Aktivität kam. Im Oligozän kam es zuletzt zu einer geringen Konvergenzrate entlang des aktiven kontinentalen Randes, dabei entstand ein Extensionsbecken verbunden mit mächtigen vulkanischen und sedimentären Ablagerungen.

3.3 Geologie im Bereich des Agua Negra Pass

3.3.1 Tektonik

Das Untersuchungsgebiet liegt in etwa auf einer Höhe von 30°S in den zentralen Anden im Bereich der flach einfallenden Subduktionszone. In dieser Zone, welche sich zwischen 27°S und 33°S erstreckt, wird der so genannte passive Juan Fernández Rücken unter den südamerikanischen Kontinentalrand subduziert. Dieser passive Rücken, der auf der Nazca Platte liegt, verläuft in west-östlicher Richtung vom Juan Fernández Hotspot bis zum Peru-Chile Graben auf einer Höhe von 33°S.

Anderson M. et al (2007) führten im Bereich von 28°S bis 36°S seismische Untersuchungen durch um die Geometrie der Subduktion, vor allem im Bereich der flachen Subduktionszone, zu ermitteln. Dabei wurden die Hypozentren von 1.098 Erbeben ausgewertet, um so den Verlauf der Wadati-Benioff Zone zu dokumentieren. Diese Methode ist im Bereich der flach einfallenden Subduktionszone sehr gut anzuwenden, da hier eine hohe Konzentration an Erdbeben vorhanden ist.

Die Auswertungen ergaben, dass die Subduktionszone im Bereich von 31°S den flachsten Einfallswinkel hat. Generell fällt die Subduktion zwischen 28°S und 33°S bis zu einer Tiefe von etwa 100 km mit 30° ein, danach verringert sich der Winkel für einige hundert Kilometer auf ca. 10°, bis er wieder mit 30° in den Mantel abtaucht. Nördlich und südlich fällt die Wadati-Benioff Zone konstant mit 30° ein. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen das unterschiedliche Einfallverhalten der Subduktion (Abbildung 8). Dieses Verhalten, wird wie bereits erwähnt, auf die Subduktion des passiven Juan Fernandez Rücken zurückgeführt, der bei 31°S auf den südamerikanischen Kontinent trifft. Die flache Subduktion ist vermutlich auf die dickere ozeanische Kruste im Bereich des Rückens zurückzuführen.

Mit der Änderung der Geometrie der Subduktionszone ist auch eine Änderung der Geomorphologie des Orogen gekoppelt. Die zentralen Anden lassen sich grob in einen Küstengebirgszug, eine zentrale Depression und einem Hauptgebirgszug gliedern (Abbildung 9). Mit dem geringen Einfallswinkel der Subduktion geht jedoch ein morphologischer Wechsel mit dem Fehlen der zentralen Depression einher. Dadurch ist es nicht möglich, zwischen 27°S und 33°S den Küstengebirgszug vom Hauptgebirgszug klar zu trennen. Ebenso findet man im Bereich der flach einfallenden Subduktionszone keine aktiven Vulkangürtel vor, im Gegensatz zu den nördlich (18°S – 27°S) und südlich (33°S – 46°S) gelegenen Vulkanzonen in der steiler einfallenden Wadati-Benioff Zone, in denen auch die zentrale Depression voll ausgebildet ist. Der Juan Fernández Rücken kontrolliert somit die Morphologie, Tektonik und den Magmatismus zwischen 27°S und 33°S.

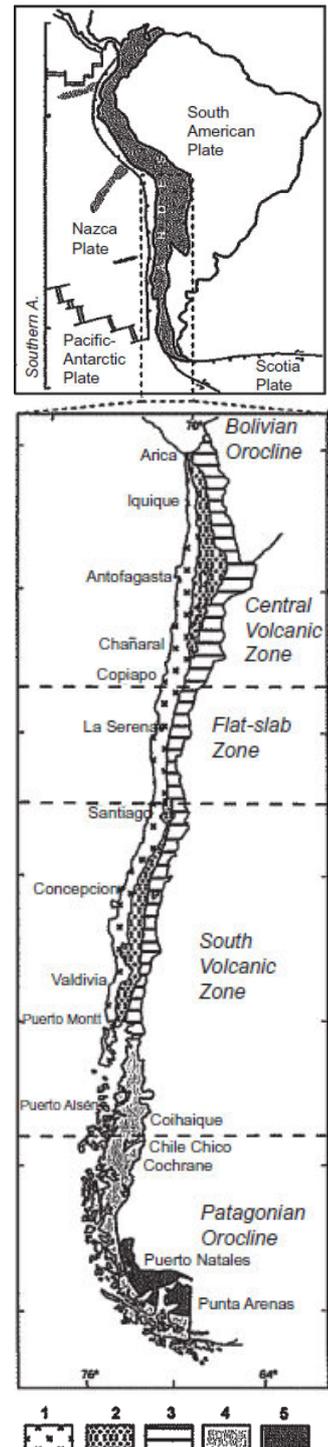


Abbildung 9 aus Charrier et al (2007): Auszug aus den zentralen Anden. Die Abbildung zeigt die zentrale und südliche Vulkanzone in denen die zentrale Depression voll ausgebildet ist, sowie den Bereich der Flach einfallenden Subduktionszone und die patagonischen Anden.

1 Küstengebirgszug, 2 zentrale Depression, 3 Hauptgebirgszug, 4 patagonische Kordillere und 5 andines Vorland in der südlichen patagonischen Kordillere.

Auswertung von Geländebildern als Vorbereitung auf die Geländearbeit

Als Vorbereitung auf die Geländearbeit wurde versucht, geologische Strukturen anhand von Luftbildern, welche von der Firma Geoconsult ZT GmbH im Zuge von Geländearbeiten und eines Helikopterfluges erstellt wurden, sowie mithilfe von GoogleEarth Aufnahmen zu ermitteln. Da im Untersuchungsgebiet keine Vegetation vorhanden ist, war es durchaus möglich Strukturen auf den Bildern zu erkennen. Die GoogleEarth Aufnahme (Abbildung 10) zeigt eine Übersicht über das Untersuchungsgebiet, sowie die Lage der im Detail betrachteten unten dargestellten Aufnahmen. Die roten Linien in den folgenden Abbildungen stellen vermutete Störungen dar, die grünen Linien zeigen die Orientierungslagen der Schichten an.

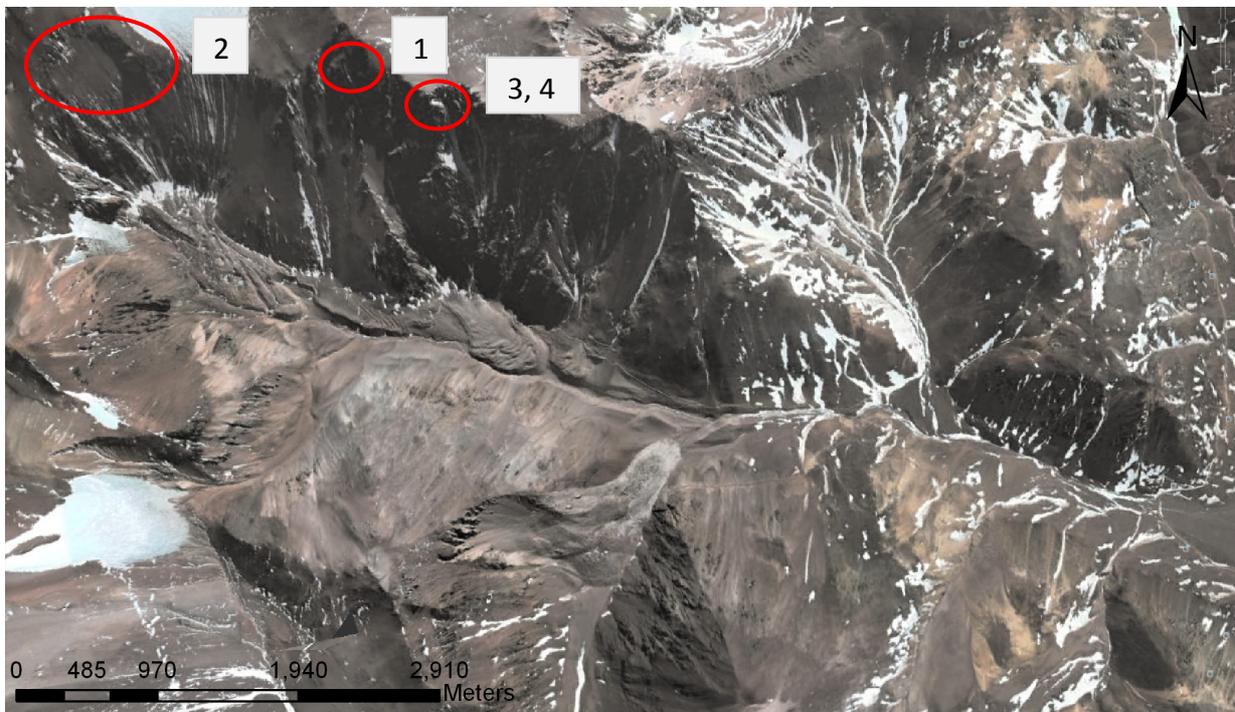


Abbildung 10: Übersicht des San Lorenzo Tales und Lage der im Detail behandelten Bilder. 1 Störung mit E-W Orientierung welche in Abbildung 11 im Detail dargestellt wird, 2 eine vermutlich in Richtung Westen verlaufende Abschiebung welche in Abbildung 12 genauer behandelt wird, 3 und 4 SW-NE verlaufender Gang, sowie zwei Aufschiebungen welche in Abbildung 13 und 14 dargestellt werden. Quelle: GoogleEarth.

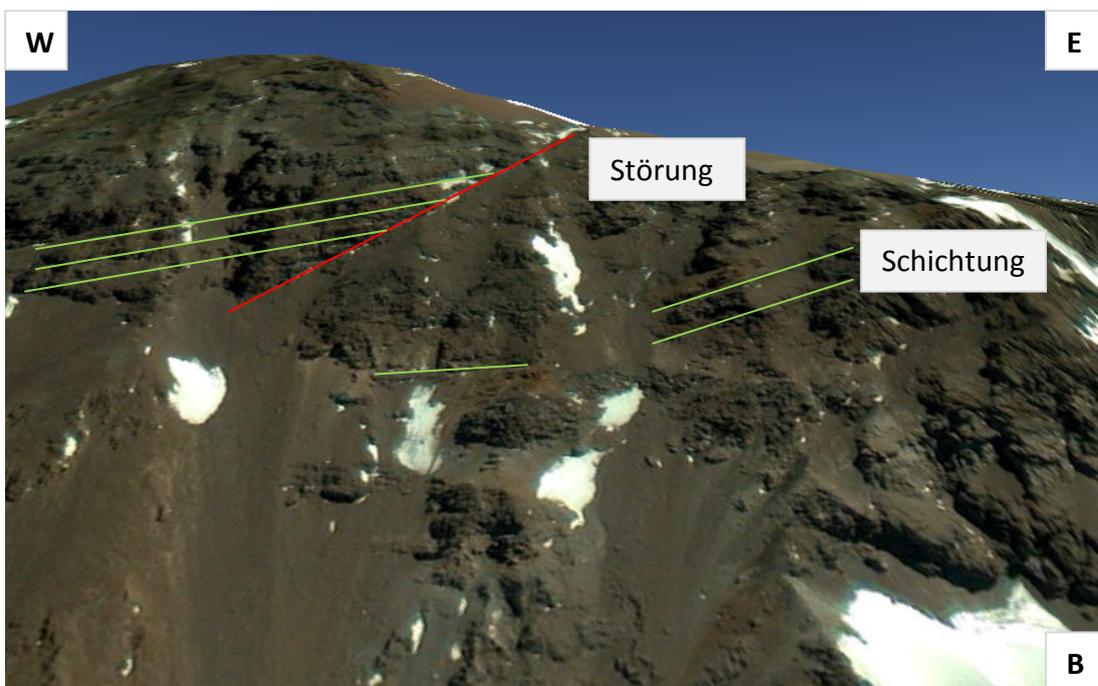
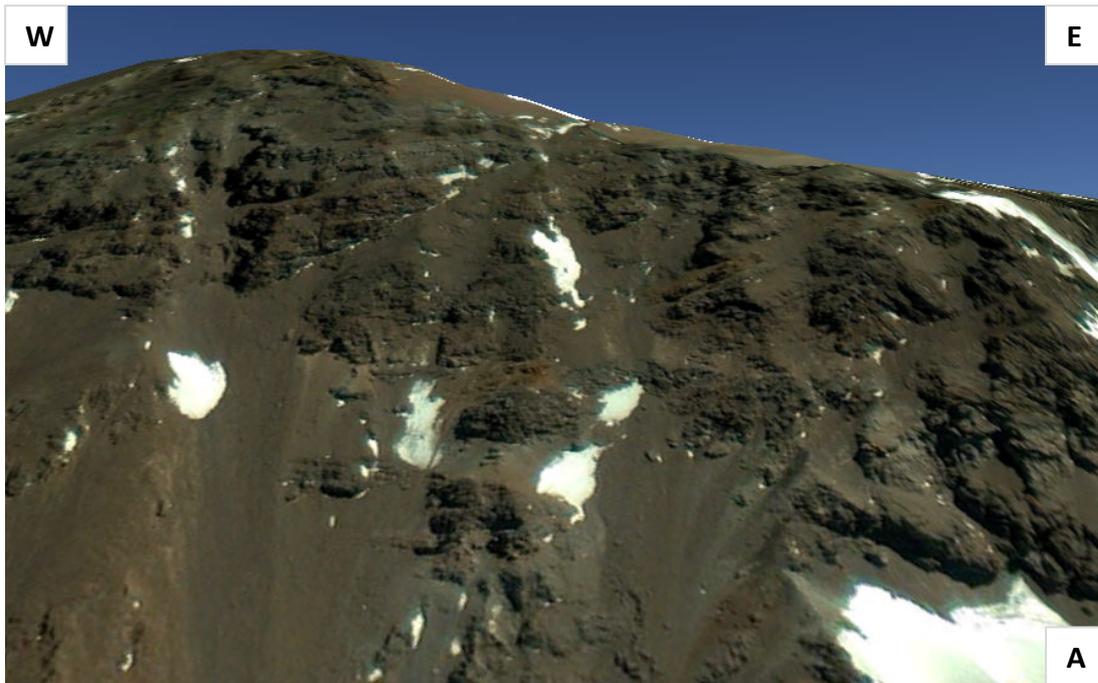


Abbildung 11: Strukturen Nördlich des San Lorenzo Tales. Vermutet wird eine Störung mit E-W Orientierung, welche im unteren Bild durch eine rote Linie markiert wurde. Den Bewegungssinn der Störung kann man anhand dieses Bildes nicht erkennen. Das Einfallen der Schichten variiert vermutlich, rechts und links der Störung nur leicht. Quelle des Bildes: GoogleEarth.

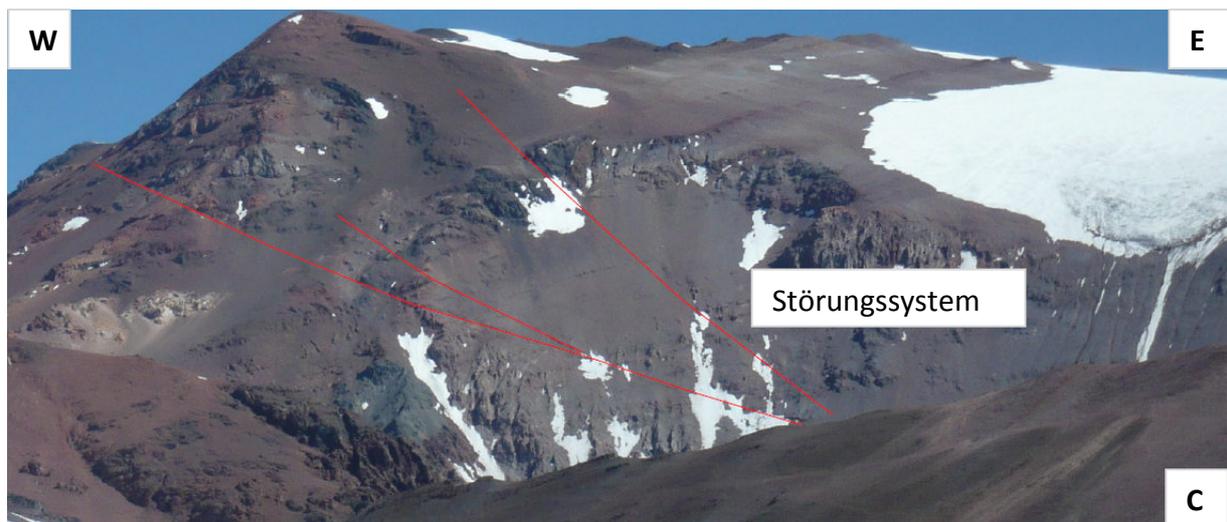


Abbildung 12: Auffällige Strukturen aus dem nordwestlichen Teil des San Lorenzo Tales. Die Aufnahmen, welche von der Firma Geoconsult ZT GmbH erstellt wurden, zeigen Störungsstrukturen (rote Linien). Bild B zeigt vermutlich eine in Richtung Westen verlaufende Aufschiebung. Die Lage von Bild B ist in Grafik A dargestellt. In Abbildung C ist das vermutete Störungssystem eingezeichnet.

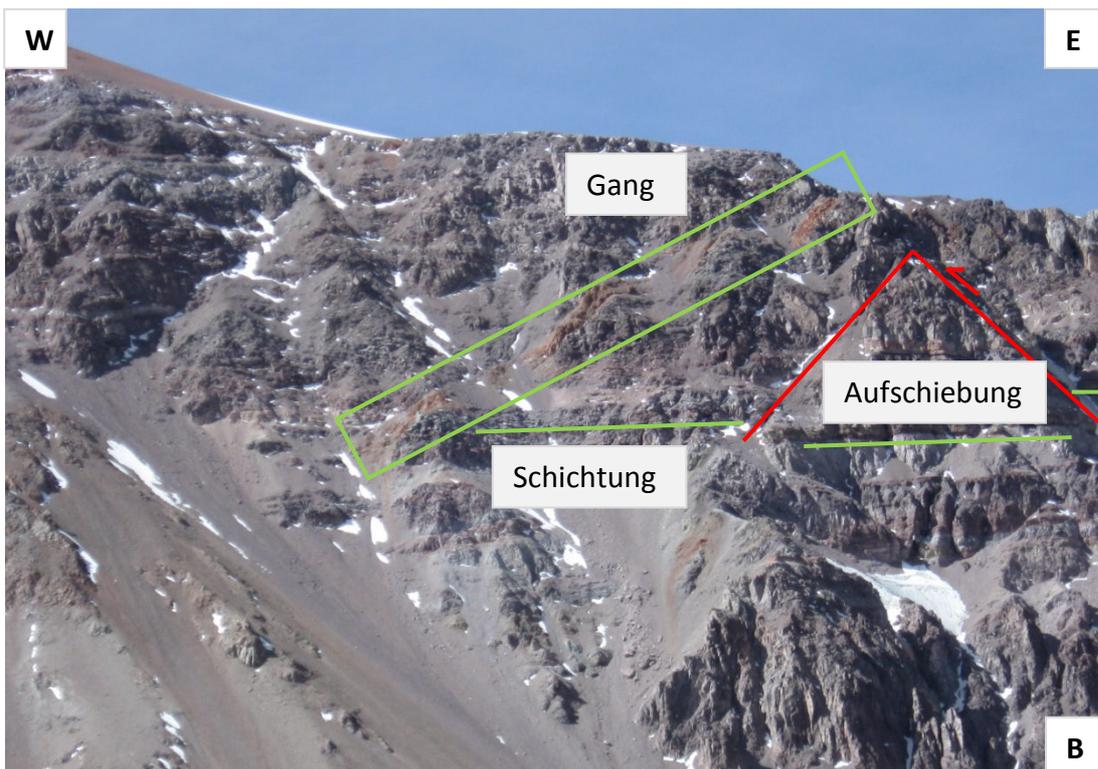


Abbildung 13: Dieses Foto, welches in Zuge einer Kartierung der Firma Geoconsult ZT GmbH im Jahr 2008 erstellt wurde, zeigt einen SW-NE verlaufenden Gang der sich während einer extensiven Phase gebildet haben muss. Des Weiteren werden noch zwei Aufschiebungen (rote Linie) vermutet, die rechte Störung wird in Abbildung 14 noch genauer dargestellt. Die Schichtung (grüne Linie) verläuft nahezu horizontal.

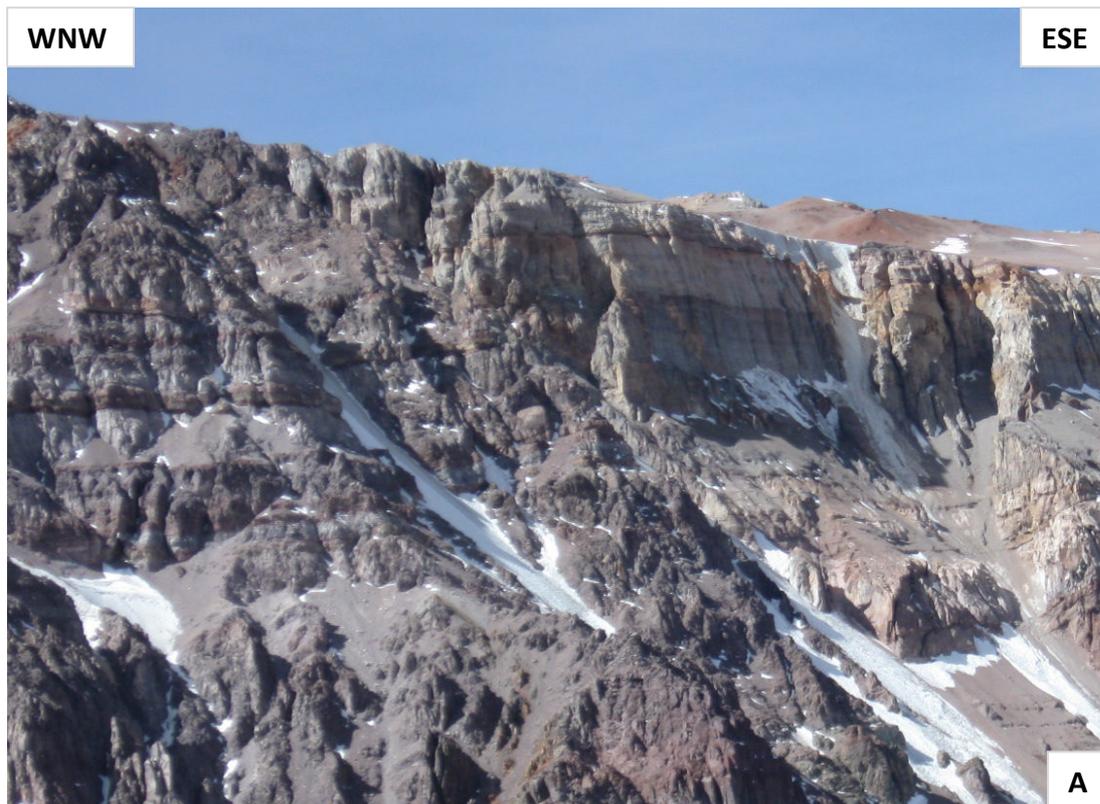


Abbildung 14: Rechtes Aufschiebungssystem aus Abbildung 13 im Detail. Durch den Versatz der braunrötlichen Schicht, welche in grün dargestellt wurde, kann man auf eine Aufschiebung Rückschließen. Die rote Linie zeigt den Verlauf der angenommenen Störung.

3.3.2 Lithologien

Die Gesteine im Bereich des Agua Negra Passes sind im Wesentlichen durch die Choiyoi Gruppe, welche im Perm und der Trias gebildet wurden, definiert. Sie besteht aus andesitischer Lava, rhyolitischen Tuffen, Ignimbriten und Breckzien, welche horizontal gelagert sind. Vertikal wurde die Gruppe durch Gänge von triassischen Basalten und Rhyoliten durchschnitten. Es handelt sich vorwiegend um basische bzw. kalkalkaline Vulkanite.

Die geologische Karte wurde von der Firma Geoconsult ZT GmbH erstellt (Abbildung 15). Dabei wurden folgende vulkanische Einheiten im Untersuchungsgebiet vorgefunden: 20 „Dona Ana indif.“ 30 rhyolitischer Imbrignit, 32 porphyrischer Rhyolit, 33 porphyrischer Dacit, 34 porphyrischer Trachyt, 35 vulkanische Breckzien, 36 Tuffstein 37 porphyrischer Andesit, 38 Basalt

Neben den vulkanischen Gesteinen sind noch folgende quartäre Ablagerungen vorhanden:

1 Schutt und Schuttfächer, 3 Blöcke, 6 Alluviale Ablagerungen, 7 Alluviale Fächer, 10 Massenbewegung, 11 „Remoción en Maza“ 12 fluviale Terrassen und Gletscher, 13 Schutt Breckzien, 14 Glaziale Gesteine, 15 Moränen, sowie 16 Gletscher.

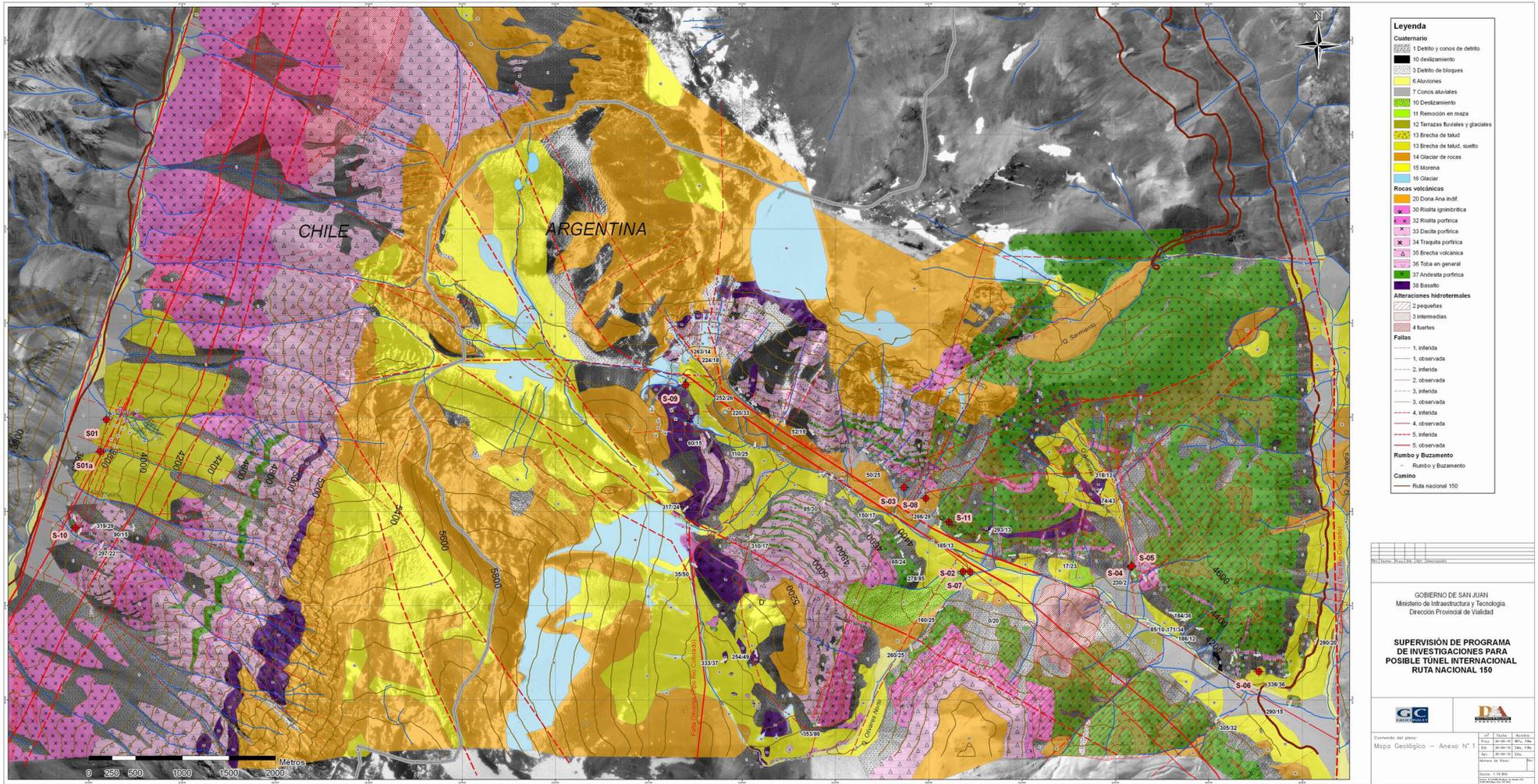


Abbildung 15: Geologische Karte des Gebietes im Bereich des Agua Negra Pass, erstellt von der Firma Geoconsult ZT GmbH.

4 Methodik

In folgendem Kapitel werden die verschiedenen Methoden, welche in Zuge der Masterarbeit zur Anwendung kamen, behandelt. Es umfasst die Geländearbeit, bei der die Gefügedaten aufgenommen wurden, sowie die Erstellung der Pläostressanalyse und das Softwarepaket WinTensor, welches für die Auswertung der Daten verwendet wurde.

4.1 Geländearbeit

Die Geländearbeit fand im April 2012 statt. Ziel der Feldarbeit war es, in etwa 200 tektonische Gefüge Daten aufzunehmen, um daraus Rückschlüsse auf die Deformation in diesem Gebiet ziehen zu können. Wegen der Abgelegenheit und der großen Höhe des Gebietes stand mir Florian Brückner, Praktikant der Firma Geoconsult ZT GmbH, im Gelände zur Seite.

Ursprünglich war vorgesehen, dass die Untersuchungen am westlichen Ende des Tales, im Bereich der Bohrung S-09, welche als Erkundungsbohrung für das Tunnel Projekt Agua Negra durchgeführt werden sollte, stattfinden. Durch einen vorzeitigen Wintereinbruch wurde die Zufahrtsstraße in etwa auf halber Strecke des San Lorenzo Tales unpassierbar und das Arbeitsgebiet verschob sich in den östlichen Bereich des Tales.

Im Zuge der Geländearbeit gab es mehrere Problematiken, die vor allem durch den vorübergehenden Ausfall der Bohrung S-09 bedingt waren. Ursprünglich war vorgesehen, dass die Geländearbeit in der Zeit von Mitte März bis Mitte Juni 2012 stattfindet. Durch den Ausfall der Bohrung und die damit verbundenen infrastrukturelle Probleme, sowie dem vorzeitigen Wintereinbruch, verkürzte sich der Aufenthalt jedoch auf fünf Wochen und 9 Geländetage.

Weitere Probleme bereitete der Straßenbau an der RN 150, wodurch es durch Sprengarbeiten immer wieder zur Sperrung der Straße kam.

Die folgenden Abbildungen 16-19 zeigen Bilder welche im Zuge der Geländearbeit aufgenommen wurden.



Abbildung 16: Schneebedeckt: Q. Sarmiente und Q. Amarilla auf der nördlichen Seite des San Lorenzo Tales.



Abbildung 17: Bereich des Tunnelportals am östlichen Ende des San Lorenzo Tales.

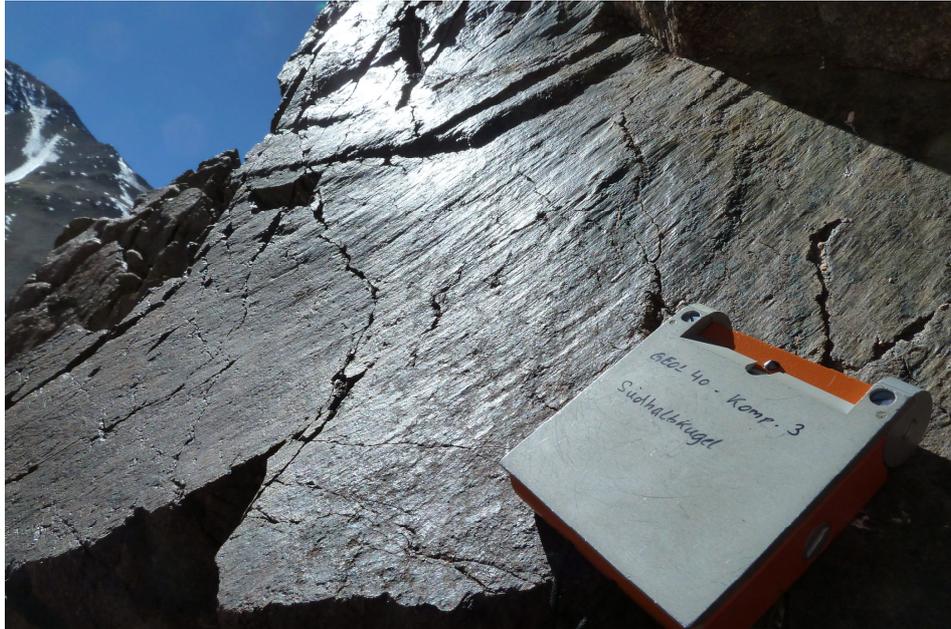


Abbildung 18: Harnischfläche mit Striemung, welche im Zuge der Geländearbeit im südlichen Bereich des San Lorenzo Tales aufgenommen wurde (Aufschluss 73). Der Bewegungssinn lässt sich in diesem Fall nicht bestimmen.



Abbildung 19: Abschiebung welche im nördlichen Bereich des San Lorenzo Tales bei Aufschluss 29 aufgenommen wurde.

4.2 Stressanalysen

Die hier beschriebenen Methoden stützen sich im Wesentlichen auf die Ausführungen von Andeweg, B. (2002).

Eine Paläostressanalyse dient zur Bestimmung der unterschiedlichen Orientierung der Hauptnormalspannungen, die in einem bestimmten Gebiet in der Vergangenheit vorherrschten, um daraus Rückschlüsse auf die tektonische Deformationsgeschichte ziehen zu können. Die Spannungen in der Lithosphäre werden durch die unterschiedlichen Bewegungen zwischen den Lithosphärenplatten bestimmt und führen zur Deformation an den Plattengrenzen. Die Intensität und der Typ der Deformation hängen von der Festigkeit des Gesteinsmaterials, aus der die Kruste zusammengesetzt ist, zusammen.

Es gibt drei verschiedene Methoden um die Spannungsverteilung innerhalb der Lithosphäre zu bestimmen:

- 1) Störungsinversionsmethode: hierbei werden Indikatoren an den Störungsflächen verwendet die im Zuge der Bewegungen entstanden sind, um deren Bewegungssinn zu bestimmen. Mithilfe dieser Methode lassen sich Paläospannungen ermitteln.
- 2) Bohrlochausbruchdaten und Spannungsrelief Methode: bei den Bohrlochausbruchdaten werden Instabilitäten an der Bohrlochwand gemessen. Durch die Orientierung der Ausbrüche kann die maximale horizontale Kompression bestimmt werden. Bei der Spannungsrelief Methode wird die Spannungsrelaxation bestimmt, die bei der Entnahme einer Gesteinsprobe vom Umgebungsgestein entsteht. Diese beiden Methoden geben jedoch nur Auskunft über das aktuelle Spannungsverhältnis im Gebirge.
- 3) Erdbeben Herdflächenanalyse: diese Methode wertet das erste Erreichen von seismischen Wellen aus, die bei einem Erdbeben entstehen, um die Orientierung der Hauptspannungsrichtungen zu bestimmen. Vorteil dieser Methode ist, dass auch der Stress in tieferen Bereichen der Lithosphäre bestimmt werden kann. Diese Methode kann wiederum nur für die aktuellen Spannungsverhältnisse verwendet werden.

Mit diesen drei Methoden lassen sich die Orientierungen der Hauptnormalspannungen (σ_1 , σ_2 und σ_3) im lokalen Bereich ermitteln. Eine Paläostressanalyse lässt sich jedoch nur mithilfe der Störungsinversionsmethode erstellen, welche auch im Zuge der Masterarbeit zur Anwendung kam.

Störungsinversionsmethode

Durch die verschiedenen Bewegungen an den Störungsflächen entstehen unterschiedliche Unregelmäßigkeiten auf den Flächen. Diese können zur Ermittlung der Bewegungsrichtung (Abbildung 20) der Störung verwendet werden. Nach der Bestimmung der Bewegungsrichtung werden Einfallswinkel und -richtung der Störungsfläche, sowie der Bewegungsindikatoren eingemessen. Mit genügend Messdaten können anschließend die Orientierungen der Hauptnormalspannungen ermittelt werden. Im Zuge dieser Masterarbeit wurden die Richtungen von σ_1 , σ_2 und σ_3 mithilfe der Software WinTensor bestimmt.

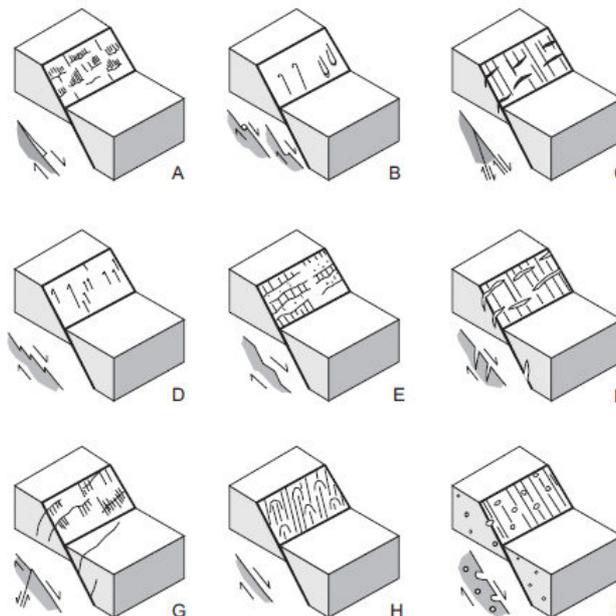


Abbildung 20 aus Andeweg, B. (2002): Marker für die Bestimmung der Bewegungsrichtung von Störungen nach Angelier [1994]. A Mineral Akkumulationen, B Tektonische Bewegungsindikatoren, C Riedel-Scherflächen, D Stylolithen, E gestufte Oberflächen, F Spannungseinschnitte, G Konjungierte Scherflächen, H Harnischflächen sowie I andere Ausbrüche.

4.3 WinTensor

Die Freeware WinTensor wurde speziell für Paläostressanalysen und Auswertungen von Daten im sprödetektonischen Bereich von Dr. Damien DELVAUX entwickelt. Mithilfe dieses Programmes wurden die im Gelände aufgenommenen Daten ausgewertet und die Orientierungen der Hauptnormalspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 ermittelt, sowie die Projektion der Klufflächen und Harnischflächen für die Aufschlussprotokolle erstellt.

Im Folgenden werden die Parameter erklärt, welche für die Auswertungen der Gefügedaten benötigt wurden (Abbildung 21, Tabelle 2).

Eingabe der Daten

The screenshot shows the WinTensor software interface. On the left, there are 'Site properties' fields for Project (Masterarbeit), Area name (Agua Negra), Geologist(s) (Simone Schmid), Field date (April 2012), and Incoding date (15.06.2012). In the center, there are two stereonet projections labeled 'Stereonets - Id: 6'. On the right, a 'Data Row 6 (Id=6) / Fault Plane Dip' dialog box is open, showing 'Data Value' as 45 and 'Data Type' as '1 - Fault plane with slip line (slickenside) - also foliation with mineral lineation (defined as 'F')'. Below the interface is a data table with the following structure:

N°	Fault-slip data		Input row data (User format)											Compiled data Set 1 (Standard format)						
	Definition		Fracture plane		Slip Line		Slip	Conf.	Weigh	Activ.	Striae	Subset	Comments	Fault plane		Slip Line		Slip	Subsets	
	Format	Type	Dip-Dir	Dip	Azim.	Plunge	Sense	Level	Factor	Type	Intens	Input		Dip	Dip-Dir	Plunge	Azim.	Sense	Temp.	Work.
1	22	1	115	25	090	23	I	P	2,0	3	2	1,0		25	115	23	090	ID		1,0
2	22	1	120	10	120	10	I	P	2,0	3	2	1,0		10	120	10	120	IX		1,0
3	22	1	110	65	174	44	I	P	2,0	3	2	1,0		65	110	44	174	IS		1,0
4	22	1	130	40	130	40	I	P	2,0	3	2	1,0		40	130	40	130	IX		1,0
5	22	1	152	35	084	15	I	P	2,0	3	2	1,0		35	152	15	084	ID		1,0
6	22	1	105	45	067	38	I	P	2,0	3	2	1,0		45	105	38	067	ID		0,0

Abbildung 21: WinTensor Oberfläche. Als Beispiel wurde die Auswertung von Aufschiebungen aus der Masterarbeit verwendet. Der markierte Bereich wird in der folgenden Tabelle näher behandelt.

Tabelle 2: Eingabeparameter zur Darstellung von Harnischflächen mit den dazugehörigen Striemungen.

(1) Format: Auswahl des gewünschten Eingabeformates, **(2) Type:** um welchen Typ von Bruchflächen handelt es sich, **(3) Fracture Plane:** Einfallrichtung und –winkel der Bruchfläche, **(4) Slip Line:** Orientierung der Striemung, **(5) Slip Sense:** Bewegungssinn der Bruchfläche, **(6) Confidence Level:** wie sicher ist man sich mit der Definition der Bruchfläche, **(7) Activation Type:** Aktivierungstyp der Fläche, **(8) Striae Intensity:** wie gut ist die Striemung ausgeprägt.

1 Format	2 Type (Typ)
<p>11-44 First digit: format for planes (1) = dip-angle / dip direction (2) = dip-direction / dip-angle (3) = strike (0-180°) / dip-angle (with N, E, S or W) (4) = strike (0-360°) / dip-angle (dip-dir. = strike + 90°)</p> <p>Second digit: format for lines - lines defined independently of a plane: (1) = plunge / azimuth (2) = azimuth / plunge - lines defined in a plane: (3) = pitch (with N,E,S or W) or Trend (4) = Rake or Slip (+/- 0-360°)</p>	<p>1 - Fault plane with slip line (slickenside) - also foliation with mineral lineation (defined as 'F')</p> <p>2 - Two conjugated shear planes</p> <p>3 - Shear plane with tension fracture</p> <p>4 - Plane alone (Fracture, Bedding, Foliation)</p> <p>5 - Focal mechanism: Movement and auxilliary planes & type</p> <p>6 - Focal mechanism: Movement plane, slip line & slip sense</p> <p>7 - Focal mechanism: P and T kinematic axes</p> <p>8 - Line alone (Fold or Boudinage axis, Stylolite peak)</p> <p>9 - Current direction from bedding and current planes</p> <p>10 - Horizontal stresses from Sigma 1, Sigma 3 and R ratio</p>
3 Fracture plane (Bruchfläche)	4 Slip Line (Striemung)
Dip direction (0-360°) Dip angle (0-90°)	Azimuth (0-360°) Plunge angle (0-90°)
5 Slip Sense (Bewegungssinn)	6 Confidence Level (Wahrscheinlichkeit)
<p>For slickensided faults: (N) = Normal (I) = Inverse or Reverse (D) = Dextral (S) = Sinistral (X) = Unknown</p> <p>For foliation with mineral lineation: (F)</p>	<p>(C) = Certain (P) = Probable (S) = Supposed (X) = Unknown</p>
7 Activation Type (Aktivierungstyp)	8 Striae Intensity (Striemungsintensität)
<p>(0) = Non activated plane (1) = Neoformed fault or fracture (2) = Reactivated fault or fracture (3) = Activation type unknown</p>	<p>(0) = No striae (1) = Weakly marked (2) = Well marked (3) = Profound (4) = Corrugation</p>

Auswertung der Daten

Nach der Eingabe der Daten erfolgt unter dem Menüpunkt "Processing" die Auswertung der Bruchstrukturen (Abbildung 22). Hier hat man die Möglichkeit, sich verschiedene Auswertungen anzeigen zu lassen. Im Zuge der Masterarbeit wurden zwei Registerkarten des Processing Tools verwendet, die PBT um die Orientierungen der Hauptnormalspannungen darzustellen (Abbildung 23), sowie das Registerblatt Mohr, welches das Mohr Coulomb Bruchkriterium darstellt (Abbildung 24).

The screenshot shows the WinTensor software interface. The 'Processing' menu item is highlighted in red. The interface displays site properties, stereonet plots, and a data table. The data table is as follows:

N°	Fault-slip data			Input row data (User format)										Compiled data Set 1 (Standard format)							
	Definition			Fracture plane		Slip Line		Slip	Conf.	Weigh	Activ.	Striae	Subset	Comments	Fault plane		Slip Line		Slip	Subsets	
	Id	Format	Type	Dip-Dir	Dip	Azim.	Plunge	Sense	Level	Factor	Type	Intens	Input		Dip	Dip-Dir	Plunge	Azim.	Sense	Temp.	Work.
1	1	22	1	115	25	090	23	I	P	2,0	3	2	1,0		25	115	23	090	ID		1,0
2	2	22	1	120	10	120	10	I	P	2,0	3	2	1,0		10	120	10	120	IX		1,0
3	3	22	1	110	65	174	44	I	P	2,0	3	2	1,0		65	110	44	174	IS		1,0
4	4	22	1	130	40	130	40	I	P	2,0	3	2	1,0		40	130	40	130	IX		1,0
5	5	22	1	152	35	084	15	I	P	2,0	3	2	1,0		35	152	15	084	ID		1,0
6	6	22	1	105	45	067	38	I	P	2,0	3	2	1,0		45	105	38	067	ID		0,0

Abbildung 22: WinTensor Oberfläche im Eingabemodul mit dem in rot markierten Processing Tool.

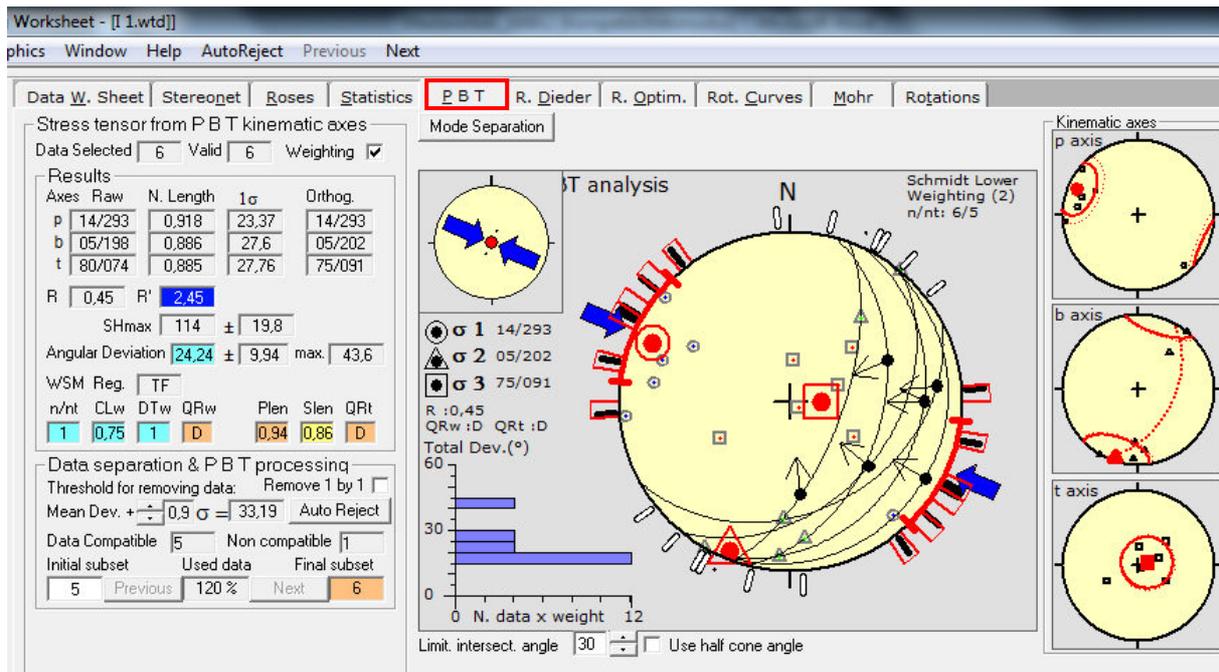


Abbildung 23: WinTensor Processing – PBT kinematische Axen. Darstellung der Hauptnormalspannungsrichtungen σ_1 , σ_2 , σ_3 .

Das Mohr Stress Diagramm gibt ein 3-dimensionales Stressfeld in einer 2-dimensionalen Darstellung wieder. Es wird die relative Normalspannung σ_n zur relativen Scherspannung τ jeder Fläche geplottet und ein Bruchkriterium erstellt.

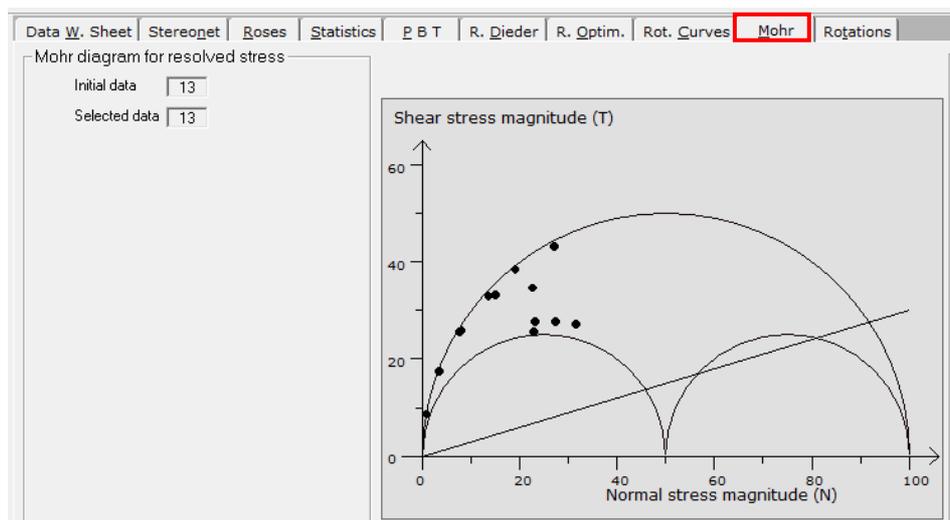


Abbildung 24: WinTensor Processing – Mohr Coulomb Kriterium. Gegenüberstellung von Scher- und Normalspannung sowie Darstellung des Bruchkriteriums.

5 Datenauswertung

Die Auswertung der im Gelände aufgenommenen Orientierungen der Harnischflächen und Strömungen wurde mit dem Softwarepaket WinTensor vorgenommen, welches bereits im vorherigem Kapitel behandelt wurde.

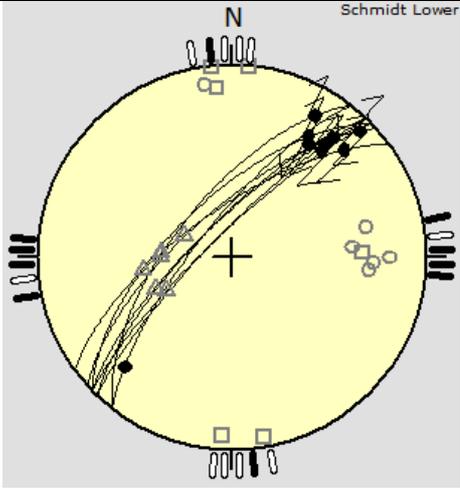
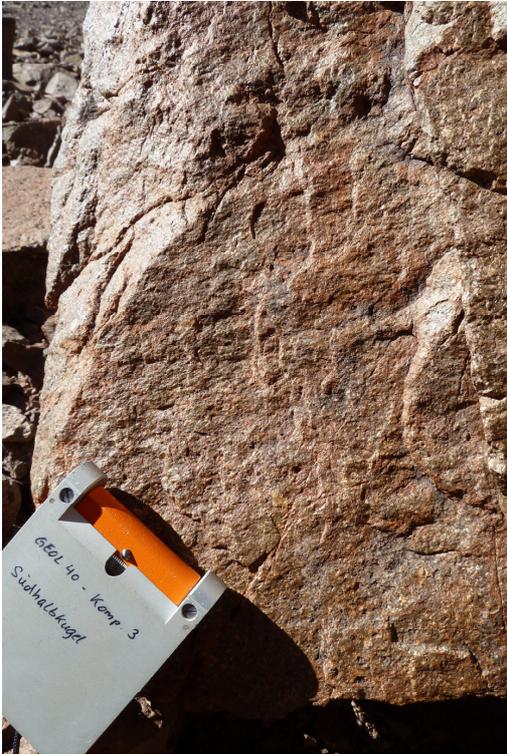
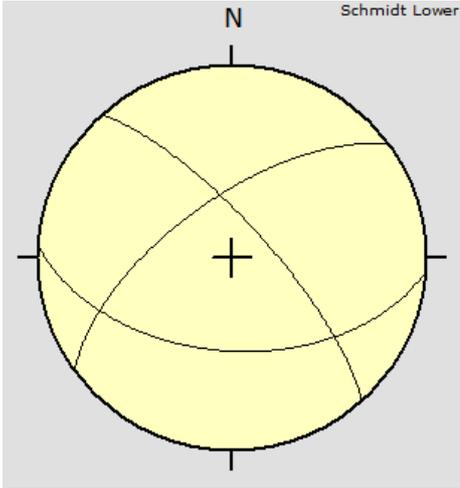
Zur Erstellung des diversen Kartenmaterials und der Darstellung der GPS-Aufschlussdaten wurden die Programme ArcGIS und ArcMAP verwendet. Als Kartengrundlage wurden Bilder von GoogleEarth, welche mithilfe von ArcGIS georeferenziert wurden, sowie Kartenmaterial der Firma Geoconsult ZT GmbH verwendet.

5.1 Auswertung der Geländedaten

5.1.1 Aufschlussprotokolle

Am Anfang der Datenauswertung stand die Erstellung eines Aufschlussprotokolls. Hierbei wurden die Gefüge-, GPS-Daten sowie die Höhe und das Aufnahmedatum jedes Aufschlusses tabellarisch erfasst und die Großkreisdarstellung der aufgenommenen Strukturen und etwaige Bilder des Aufschlusses dargestellt. Die untenstehende Tabelle 3 zeigt als Auszug aus dem Aufschlussprotokoll beispielhaft den Aufschluss SSC054. Das vollständige Protokoll ist der Masterarbeit im Anhang beigelegt. Insgesamt wurden 79 Aufschlüsse dokumentiert.

Tabelle 3: Auszug aus dem Aufschlussprotokoll. Der Aufschluss SSC054 wurde am 21.04.2012 aufgenommen, es wurden fünf dextrale und eine sinistrale Seitenverschiebungen, drei Störungsflächen mit unbekanntem Bewegungssinn sowie Klüfte aufgenommen.

SSC054	21.04.2012		
 <p>316/65</p>		 <p>Harnische</p>	
 <p>324/70</p>		 <p>Klüfte</p>	
Höhe	4.516 m		
Koordinaten	419526	6651473	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
324/70	046/21	Dextral	324/65
318/70	045/08	Dextral	048/75
308/75	224/22		184/50
316/75	040/20		
314/80	039/25		
316/65	032/27	Dextral	
308/65	030/16	Dextral	
314/75	034/30	Sinistral	
316/80	040/29	Dextral	

5.1.2 Erstellung von Domänen und Ermittlung der Hauptnormalspannungsrichtungen

Nach der Erstellung des Aufschlussprotokolls galt es die Gefügedaten zu gruppieren. Dazu wurden die im Gelände aufgenommenen GPS-Daten der Aufschlüsse mithilfe von ArcGIS und ArcMAP in einer Karte aus GoogleEarth dargestellt und anschließend in 11 Domänen untergliedert (Abbildung 25). Die Aufschlüsse A1 bis A9 wurden nicht in die weiteren Auswertungen mit einbezogen, da nicht ausreichend bzw. keine Harnischflächen vorgefunden wurden.

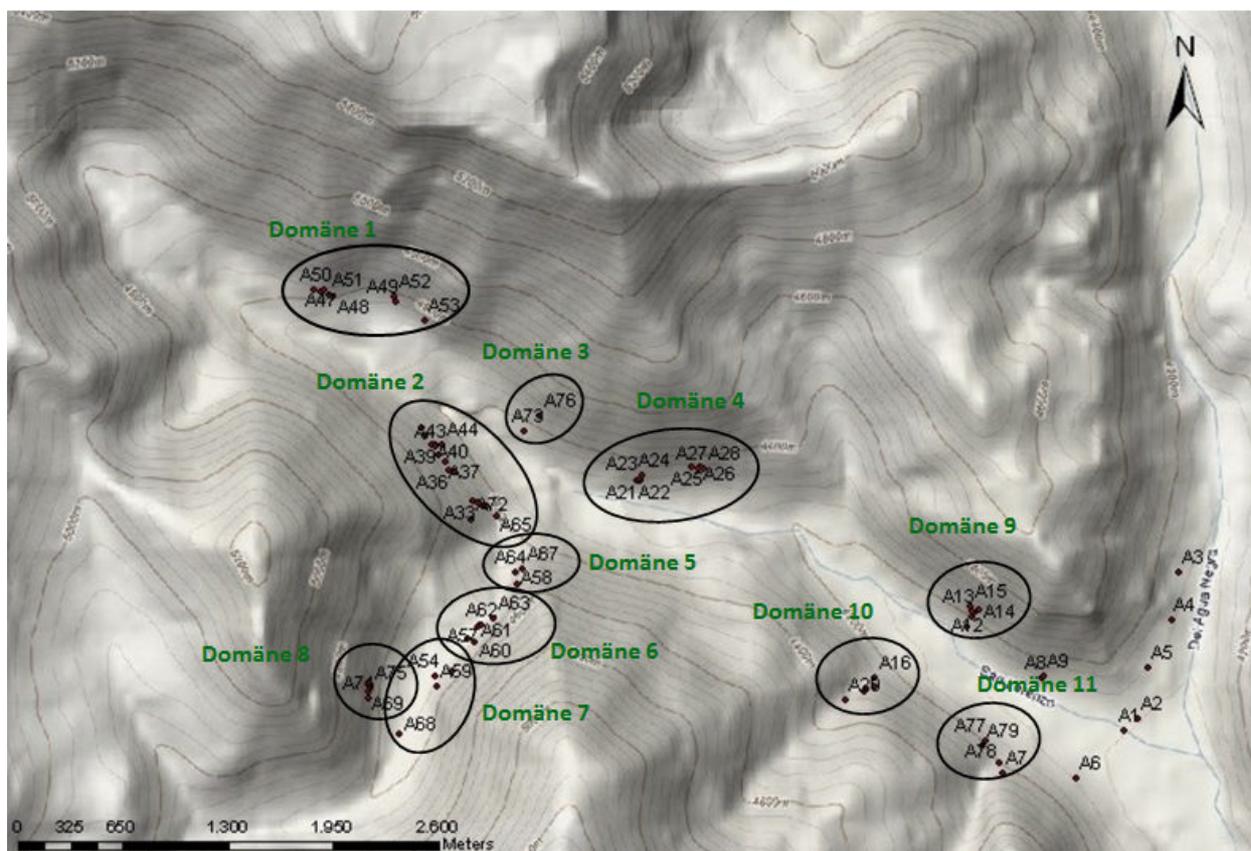
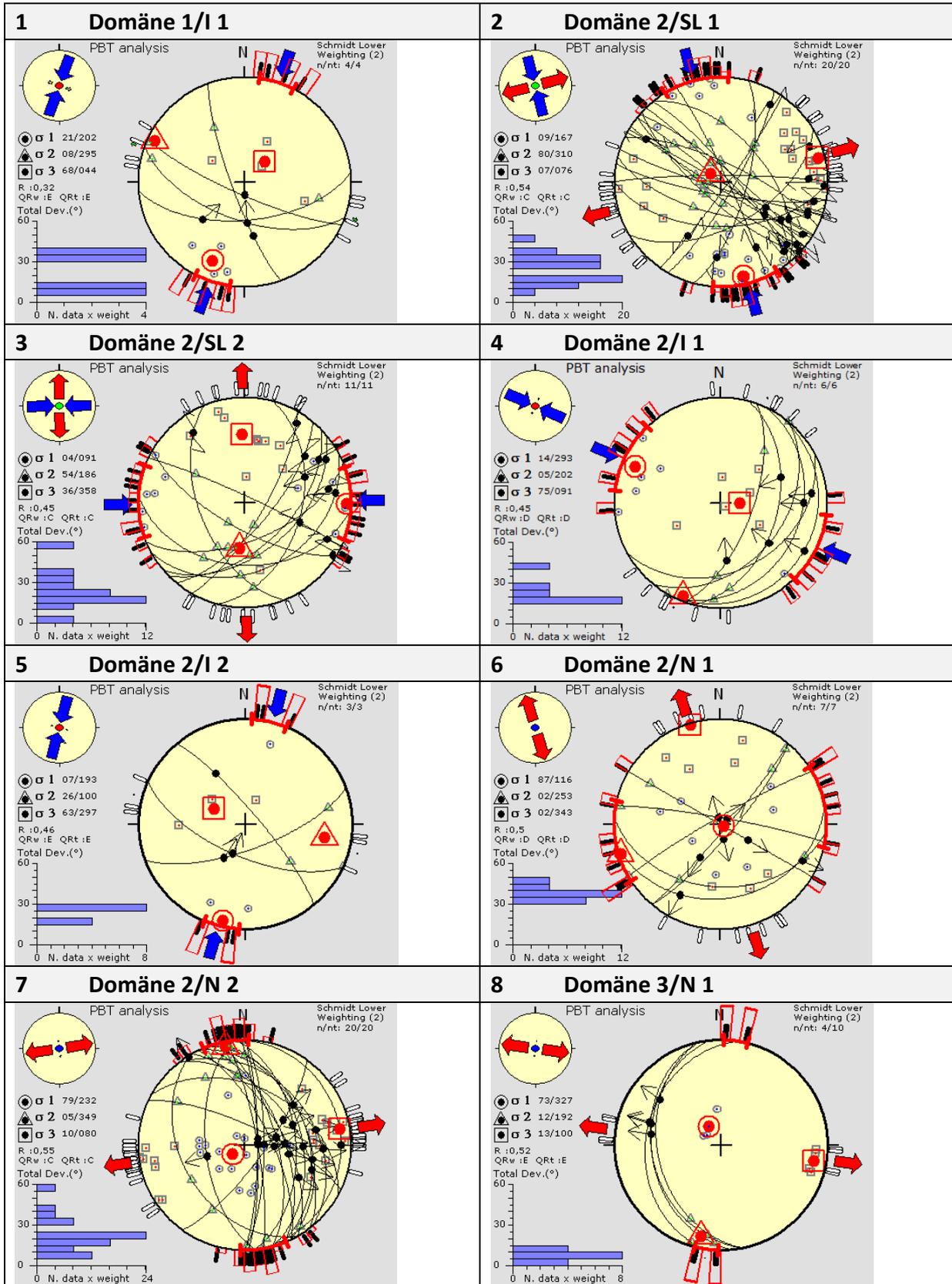


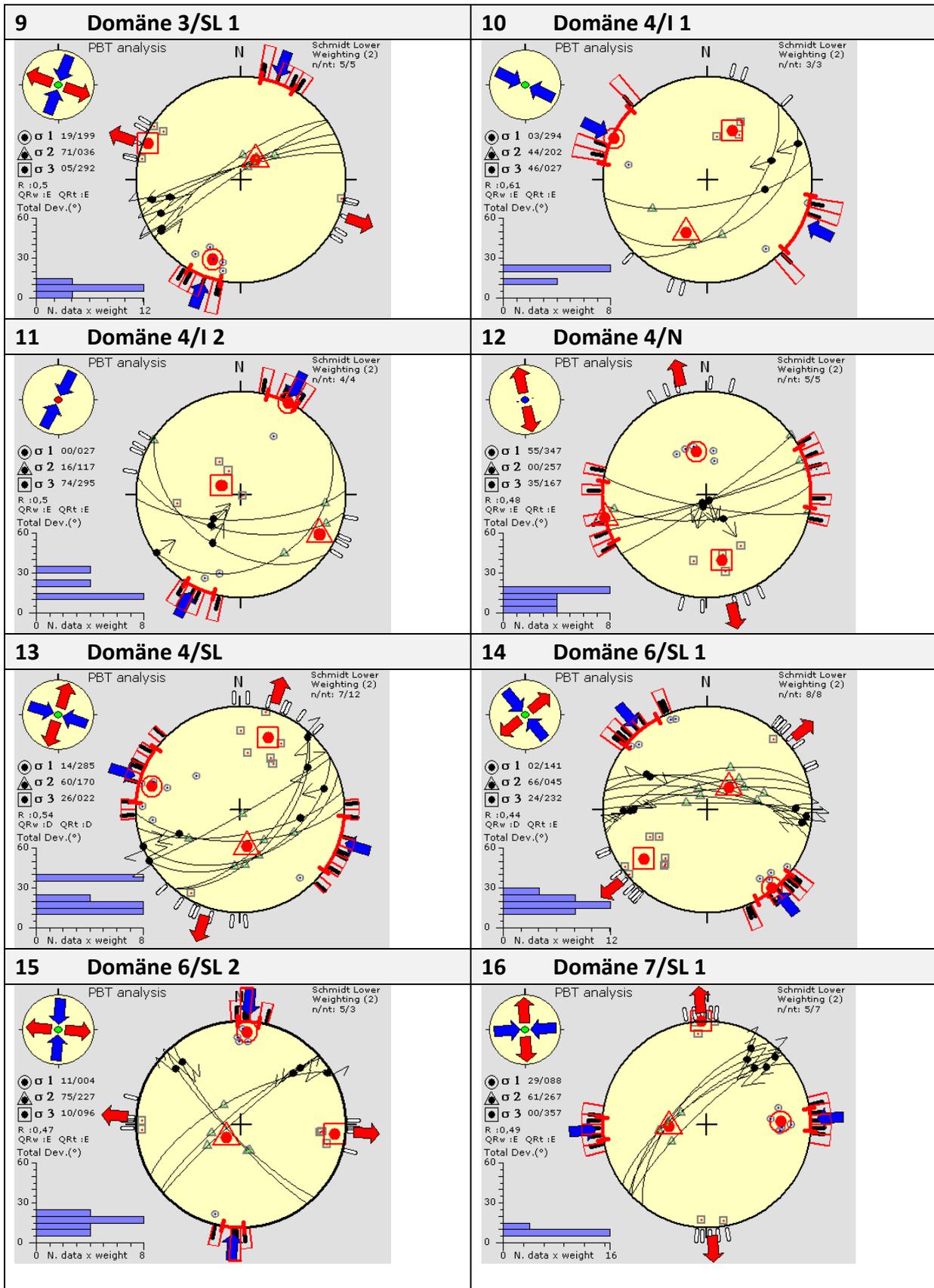
Abbildung 25: Darstellung der GPS Aufschlussdaten und Einteilung der Aufschlüsse in Domänen.
Quelle: GoogleEarth.

Innerhalb dieser Domänen wurden die Daten nach Bewegungssinn und Hauptnormalspannungsrichtungen gegliedert. Daraus ergaben sich innerhalb der 11 Domänen 21 verschiedene Spannungs- und Orientierungsplots (Abbildung 26). Hierbei steht I für Inverse Fault (=Aufschiebung), N für Normal Fault (=Abschiebung) und SL für Strike Slip Fault (=Seitenverschiebungen). Die Tabelle 4 enthält die genauen Orientierungen von $\sigma 1$, $\sigma 2$ und $\sigma 3$ der 21 Spannungsplots.

Tabelle 4: Orientierung der 21 erfassten Spannungsrichtungen, $\sigma 1$, $\sigma 2$ und $\sigma 3$, innerhalb der Domänen.

Orientierung der Hauptnormalspannungen					
ID	$\sigma 1$	$\sigma 2$	$\sigma 3$	Bewegungssinn	Beschreibung
1	202/21	295/08	044/68	I	Domäne 1/I 1
2	167/09	310/80	076/07	SL	Domäne 2/SL 1
3	091/04	186/54	358/36	SL	Domäne 2/SL 2
4	293/14	202/05	091/75	I	Domäne 2/I 1
5	193/07	100/26	297/63	I	Domäne 2/I 2
6	116/87	253/02	343/02	N	Domäne 2/N 1
7	232/79	349/05	080/10	N	Domäne 2/N 2
8	327/73	192/12	100/13	N	Domäne 3/N 1
9	199/19	036/71	292/05	SL	Domäne 3/SL 1
10	294/03	202/44	027/46	I	Domäne 4/I 1
11	027/00	117/16	295/74	I	Domäne 4/I 2
12	347/55	257/00	167/35	N	Domäne 4/N
13	285/14	170/60	022/26	SL	Domäne 4/SL
14	141/02	045/66	232/24	SL	Domäne 6/SL 1
15	004/11	227/75	096/10	SL	Domäne 6/SL 2
16	088/29	267/61	357/00	SL	Domäne 7/SL 1
17	001/05	263/59	095/31	SL	Domäne 7/SL 2
18	350/13	081/03	183/76	I	Domäne 7/I
19	194/76	079/06	348/13	N	Domäne 7/N
20	327/73	192/12	100/13	N	Domäne 8/N
21	204/16	002/72	112/06	SL	Domäne 8/SL





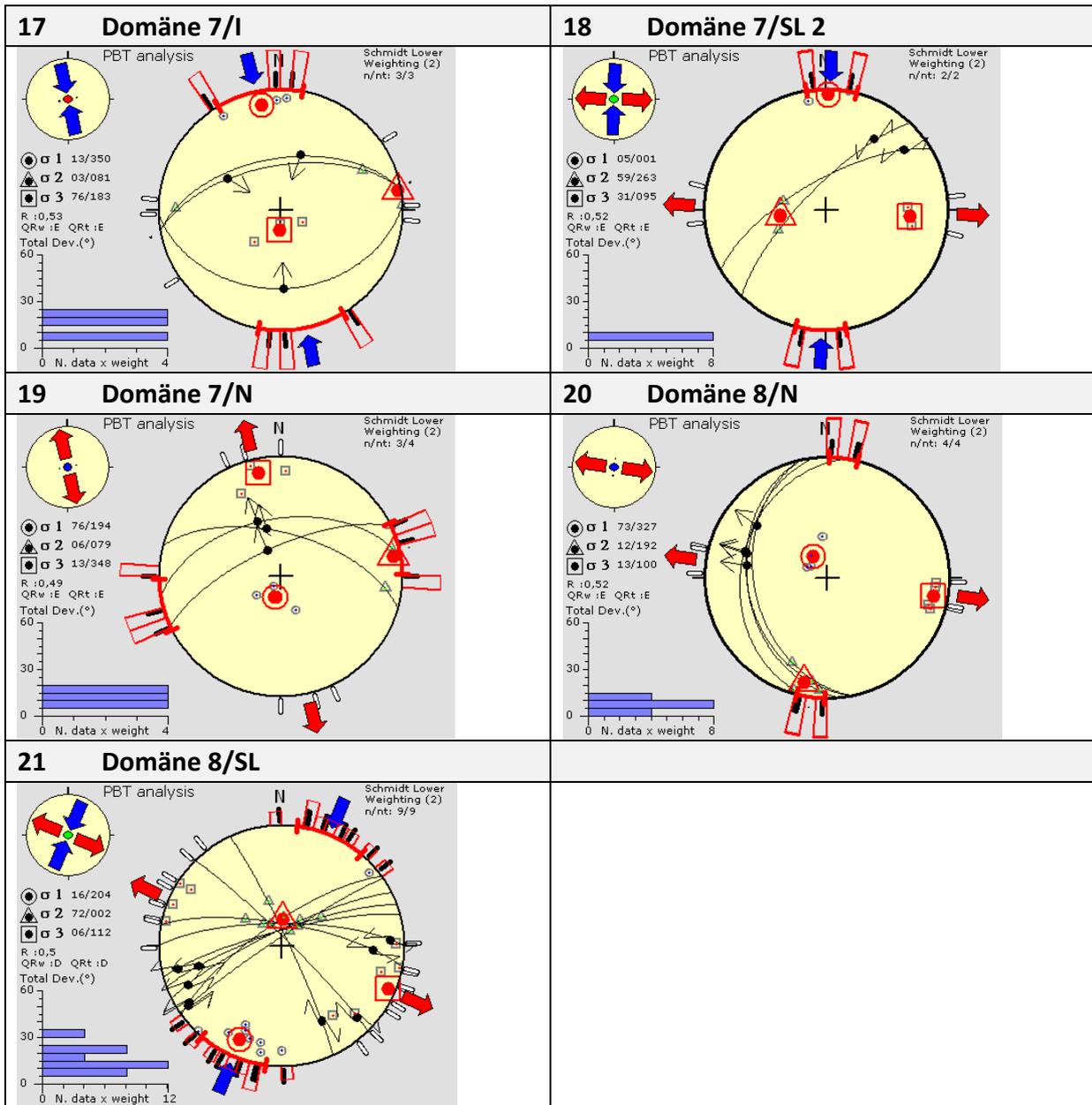


Abbildung 26: Orientierung der Hauptnormalspannungen und Darstellung der Gefügedaten innerhalb der Domänen. Es wurden 21 verschiedene Spannungsplots ermittelt.

5.1.3 Die Domänen im Detail

Im folgendem werden die Domänen 1-8, mit Ausnahme der Domäne 5, im Detail dargestellt. Dabei werden die Spannungsplos nochmals im Detail behandelt, sowie das Verhältnis von Normal- und Scherspannungskomponente nach dem Mohr-Coloumb Bruchkriterium dargestellt und versucht, die verschiedenen Störungen mit gleicher Hauptnormalspannung, innerhalb einer Domäne zu kombinieren.

Auf eine Fläche wirken generell zwei verschiedene Spannungskomponenten: zum einen die Scherspannung (τ) und zum anderen die Normalspannung (σ_n) welche aus den drei Hauptnormalspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 zusammengesetzt ist. Die Scherspannung wirkt parallel auf die Fläche und hat somit bei Seitenverschiebungen einen höheren Anteil an der Spannungskomponente als die Normalspannung. Die Scherspannung berechnet sich aus der Differenz von σ_1 und σ_3 , sowie dem Winkel α , der zwischen σ_1 und der Normalen der Fläche liegt. Normalspannungen wirken, wie der Name schon sagt, normal auf die Fläche und können sowohl aus negativen Zugspannungen (Abschiebungen), als auch als positive Druckspannungen (Aufschiebungen) vorkommen (GeoDZ, 2010).

Domäne 1

In Domäne 1 wurde lediglich ein Spannungsplos mit NNE-SSW Kompression (σ_1 202/21, σ_3 044/68) erstellt. Es wurden 2 Aufschiebungen, sowie 2 Harnischflächen mit unbekanntem Bewegungssinn ausgewertet (Abbildung 27).

Das Verhältnis der relativen Scherspannung zur Normalspannung zeigt eine Gruppierung der beiden Aufschiebungen, mit relativ hohem Anteil der Scherspannungskomponente (Abbildung 28). Die beiden Flächen mit unbekanntem Bewegungssinn haben eine deutlich geringere Scherspannungskomponente.

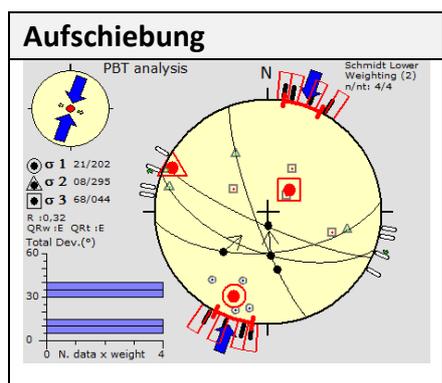


Abbildung 27: Gefügedaten der Domäne 1 mit Darstellung der Hauptnormalspannung.

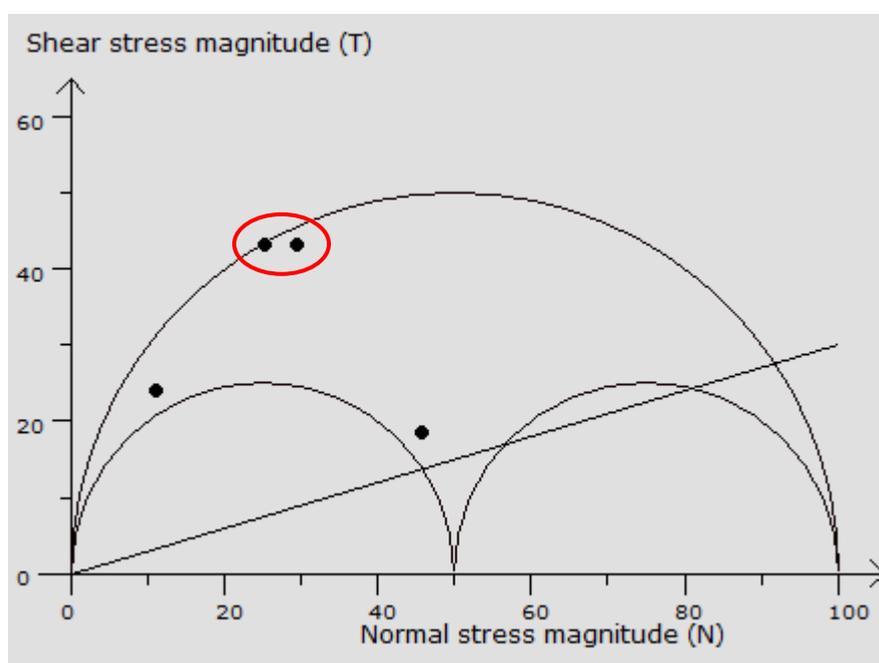


Abbildung 28: Darstellung der Gefügedaten aus Domäne 1 nach Verhältnis von Normal- und Scherspannung. Bei den rot umrahmten Punkten handelt es sich um die beiden Aufschiebungen, die Plots mit geringerem Scherspannungsanteil zeigen die Bruchflächen mit unbekanntem Bewegungssinn.

Domäne 2

Die Domäne 2 beinhaltet 67 Gefügedaten mit dextralen und sinistralen Seitenverschiebungen sowie Abschiebungen und Aufschiebungen. Die Orientierung der Hauptnormalspannungen zeigen zwei verschiedene Ereignisse: zum einen eine N-S Kompression mit E-S Dehnung sowie ein um etwa 90° gedrehtes Ereignis mit einer N-S Dehnung und E-W Kompression (Abbildung 29). In Seitenverschiebung 1 sind 18 dextrale Seitenverschiebungen mit NW-SE Orientierung sowie 4 sinistrale Seitenverschiebungen mit NE-SW Orientierung vorgefunden worden, es herrscht eine N(WN)-S(ES) Kompression mit E(NE)-W(SW) Dehnung vor (σ_1 167/09, σ_3 076/07). Der Plot der Seitenverschiebung 2 zeigt ein um 90° gedrehtes Spannungsverhältnis (σ_1 091/04, σ_3 358/36), hier wurden vorwiegend in etwa NE-SW orientierte dextrale Seitenverschiebungen vorgefunden. Die jeweils beiden Auf- und Abschiebungsevents zeigen ebenfalls ein um 90° gedrehtes Spannungsfeld. Vorwiegend wurden N(EN)-S(W) orientierte Aufschiebungen (σ_1 293/14, σ_3 091/75) sowie N-S orientierte Abschiebungen (σ_1 232/79, σ_3 080/10) vorgefunden.

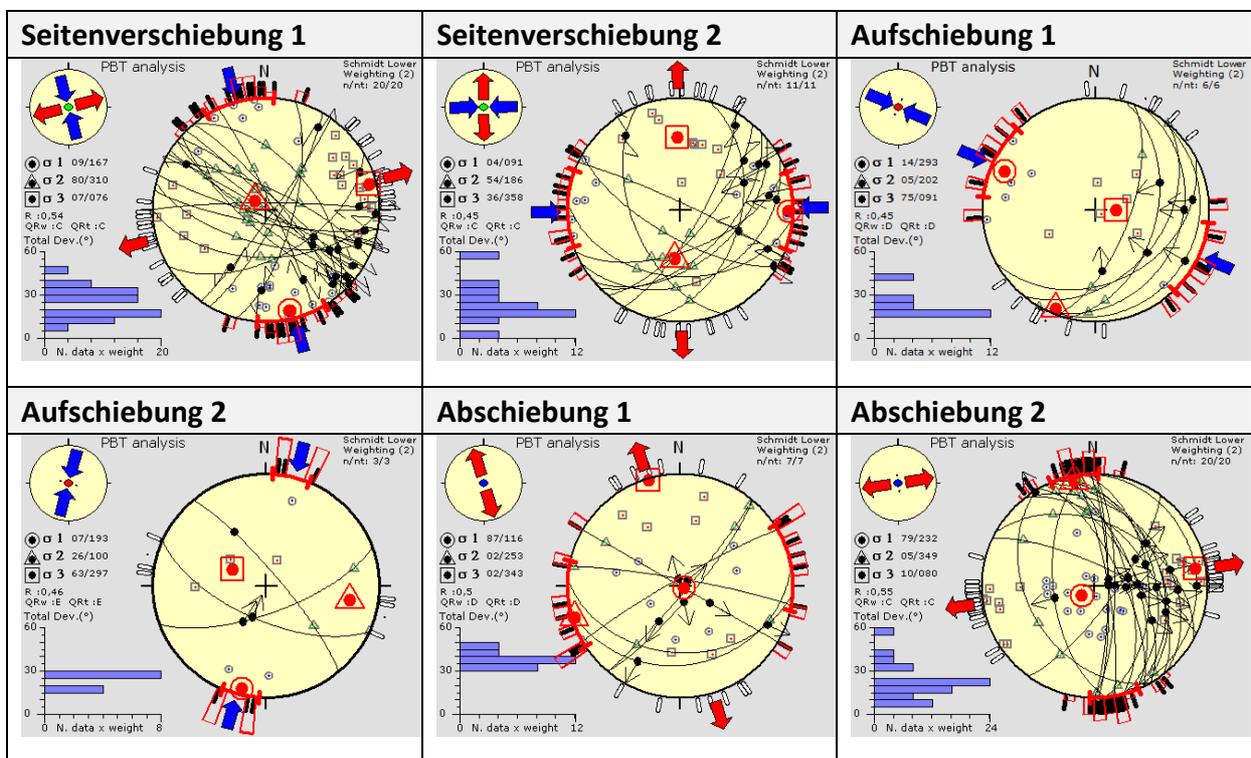


Abbildung 29: Harnischflächenauswertungen für die Domäne 2.

Die Interpretation der Daten lässt auf ein System von dextraler Seitenverschiebung mit Auf- sowie Abschiebung, bei W(SW)-E(NE) Kompression mit N(WN)-S(ES) Dehnung, rückschließen (Abbildung 30).

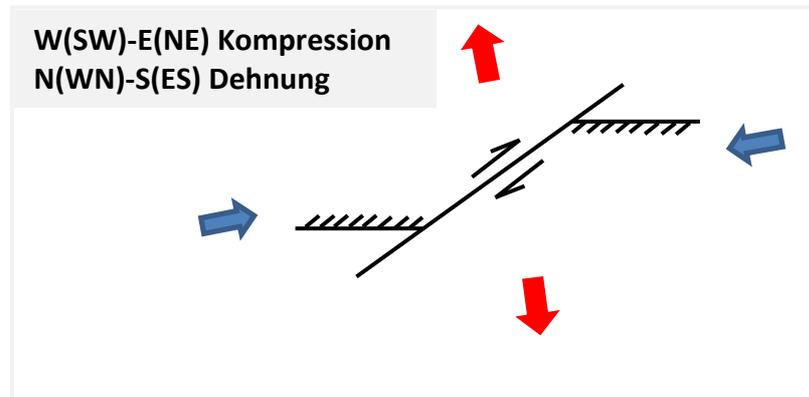


Abbildung 30: System aus Seitenverschiebung, Auf- und Abschiebung mit W(SW)-E(NE) Kompression und N(WN)-S(ES) Dehnung.

Domäne 3

In Domäne drei wurde ein Deformationsereignis mit E(SE)-W(NW) Dehnung und N(EN)-S(WS) Kompression ermittelt. Es wurden insgesamt 9 Gefügedaten aufgenommen, davon 4 Abschiebungen mit N-S Orientierung (σ_1 327/73, σ_3 100/13) sowie 5 sinistrale Seitenverschiebungen mit E(NE)-W(SW) Orientierung (σ_1 199/19, σ_3 292/05) (Abbildung 31). Die Darstellung der relativen Scher- und Normalspannungen der Gefügedaten zeigt deutlich eine Gruppierung der Seitenverschiebungen im Bereich niedriger Normalspannungen, sowie der Abschiebungen im rechten Bereich der Grafik mit deutlich höherem Normalspannungsanteil (Abbildung 32). Dies ist wiederum darauf zurückzuführen, dass bei Abschiebungen die größte Hauptnormalspannung (σ_1) normal auf die betrachtete Fläche wirkt und bei den Seitenverschiebungen die Spannung parallel auf die Fläche wirkt.

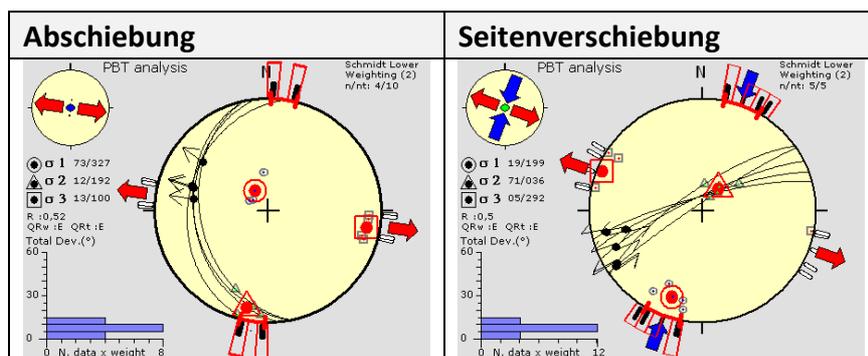


Abbildung 31: Hauptnormalspannungsrichtungen innerhalb Domäne 3.

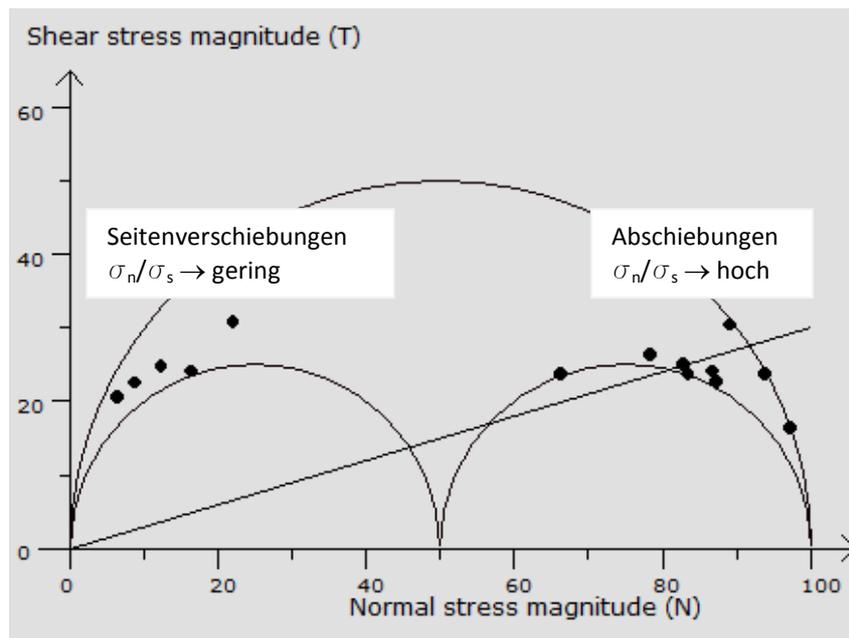


Abbildung 32: Die Darstellung der Daten nach Scher- und Normalspannungsverhältnis zeigt auf der rechten Seite eine Konzentration der Abschiebungen mit einem großem σ_n/σ_s Verhältnis und auf der linken Seite der Grafik die Seitenverschiebungen mit einem geringeren Verhältnis.

Da die ermittelten Seitenverschiebungen und Abschiebungen aus dem gleichen Deformationsevent stammen, konnten sie gut miteinander korreliert werden. Es handelt sich um eine Kombination aus sinistraler Seitenverschiebung und Abschiebung bei E(SE)-W(NW) Dehnung und N(EN)-S(W) Kompression (Abbildung 33).

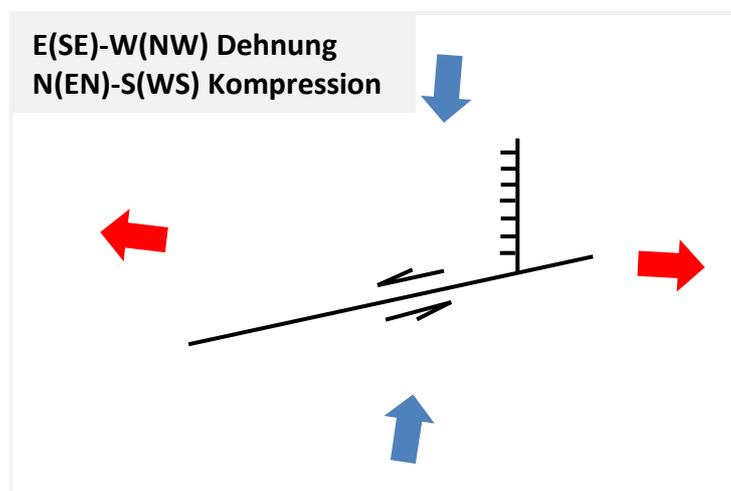


Abbildung 33: System aus Abschiebung und sinistraler Seitenverschiebung mit E(SE)-W(NW) Dehnung und N(EN)-S(W) Kompression

Domäne 4

In Domäne vier wurden 24 Gefügedaten aufgenommen die vorwiegend Ab- und Aufschiebungen zeigten (Abbildung 34). Es wurden wiederum zwei Deformationsphasen vorgefunden: ungefähr E-W Kompression mit N-S Dehnung (σ_1 027/00, σ_3 295/74) sowie einer N(EN)-S(WS) Kompression (σ_1 303/29, σ_3 212/01).

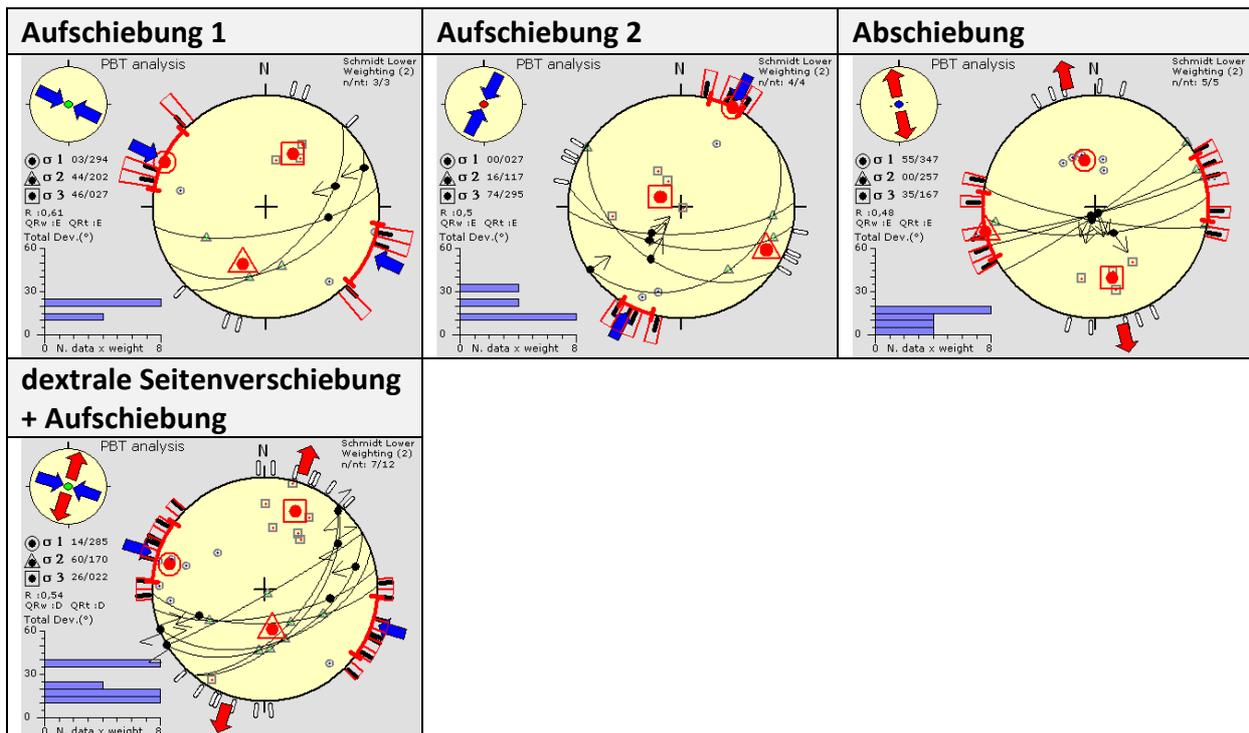


Abbildung 34: Bruchflächen und Hauptnormalspannungen innerhalb Domäne 4.

Bei der Betrachtung der Scher- und Normalspannungskomponenten (Abbildung 35) wurden die Daten je nach Spannungsverteilung in vier Gruppen untergliedert und die dazugehörigen Orientierungen, sowie der Bewegungssinn der Bruchflächen, tabellarisch erfasst (Tabelle 5). In diesem Beispiel fällt auf, dass im Gegensatz zu den anderen Domänen, das Verhältnis von Scher- und Normalspannung im Wesentlichen vom Einfallswinkel abhängt. Bewegungssinn und Orientierung spielen eine untergeordnete Rolle. Je geringer der Einfallswinkel wird, desto höher wird der Anteil der Normalspannungskomponente.

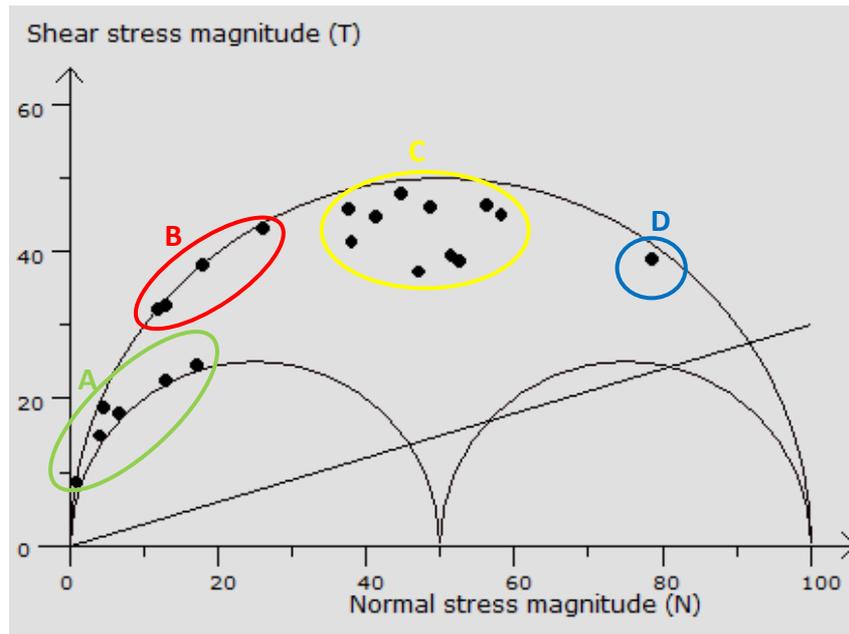


Abbildung 35: Spannungsverteilung der Bruchflächen in Domäne 4. Die Orientierung der Bruchflächen und der Bewegungssinn der Daten in den markierten Bereichen sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Orientierung und Bewegungssinn der Bruchflächen eingeteilt in Gruppen je nach Verhältnis von Scher- zu Normalspannung.

A		B		C		D	
150/86	D	170/70	D	144/60	X	148/30	I
180/85	X	170/70	X	158/55	X		
145/85	N	190/60	I	150/55	X		
165/85	N	178/70	I	160/50	N		
160/85	N	175/70	N	130/55	I		
190/80	N	170/70	I	130/60	I		
				150/50	I		
				178/65	N		
				215/45	I		
				132/55	I		
				150/45	I		

Die Interpretation der Daten in Domäne 4 lässt auf eine dextrale Seitenverschiebung mit NE-SW Orientierung mit einem Abschiebungssystem mit N-S Extension schließen (Abbildung 36).

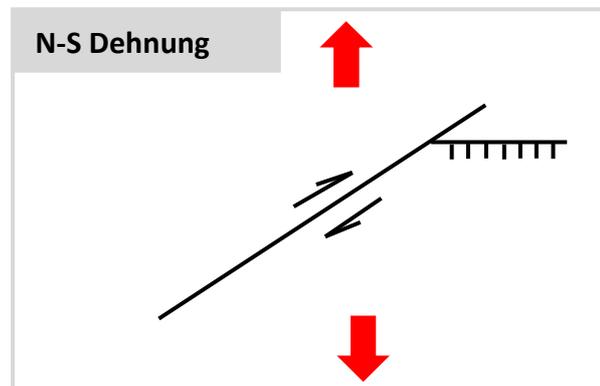


Abbildung 36: Dextrale Seitenverschiebung mit Abschiebung bei N-S Extension.

Domäne 6

Innerhalb der Domäne 6 sind nur Seitenverschiebungen vorgefunden worden: E-W orientierte dextrale Seitenverschiebungen (σ_1 141/02, σ_3 232/24), NE-SW orientierte sinistrale Seitenverschiebungen und NW-SE orientierte dextrale Seitenverschiebungen (σ_1 004/11, σ_3 096/10) (Abbildung 37). Die Hauptnormalspannungen der beiden Events variieren leicht, was auch auf eine spätere Rotation von Blöcken, durch reaktivierte Störungen, zurückzuführen sein kann.

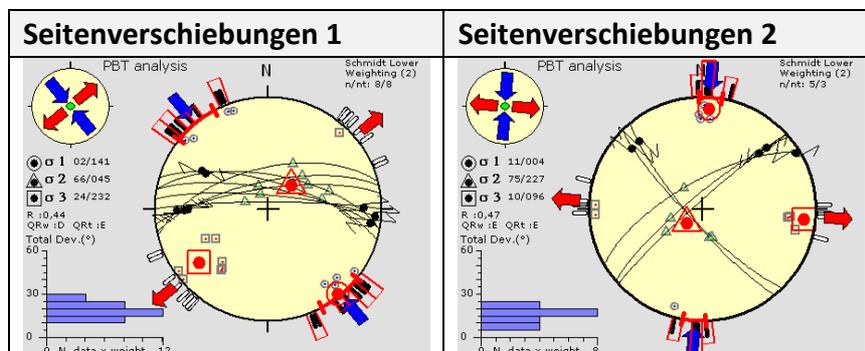


Abbildung 37: Seitenverschiebungen in Domäne 6.

Das Verhältnis von Scher- zu Normalspannungsverhältnis wurde in Domäne 6 ebenfalls mit der Software WinTensor ausgewertet (Abbildung 38). Da in dieser Domäne ausschließlich Seitenverschiebungen vorgefunden wurden und somit die Spannungen vorwiegend parallel wirken, ist das Verhältnis zwischen Scherspannung und Normalspannung niedrig und variiert je nach Orientierung der Fläche.

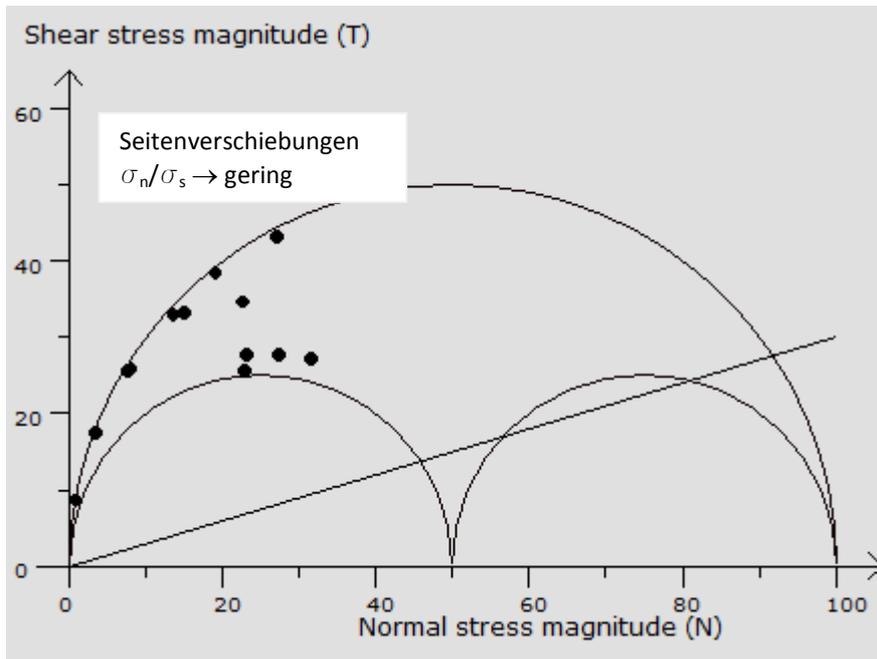


Abbildung 38: Verhältnis von Scherspannung und Normalspannung sowie Darstellung des Mohr Coloumb Bruchkriterium.

Das Seitenverschiebungssystem aus Domäne 6, mit NW-SE verlaufender dextralen Seitenverschiebungen sowie NE-SW verlaufenden sinistralen Seitenverschiebungen, bei N-S Kompression, wurde grafisch dargestellt (Abbildung 39).

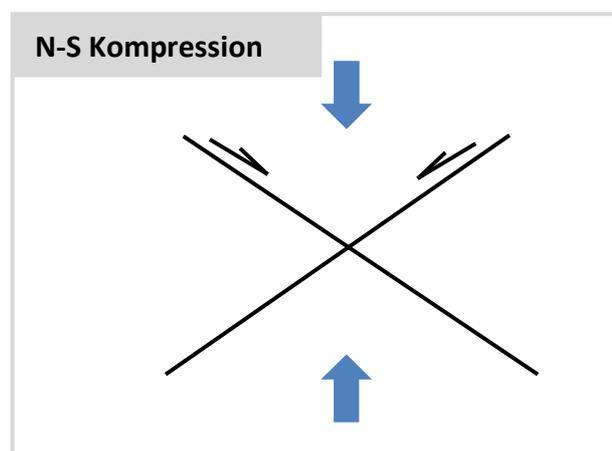


Abbildung 39: Dextrale und sinistrale Seitenverschiebung bei N-S Kompression in Domäne 6.

Domäne 7

Die Domäne 7 zeigt wieder deutlich zwei Deformationsereignisse, zum einen eine N-S Dehnung mit E-W Kompression und zum anderen eine N-S Kompression mit E-W Dehnung. Es wurden insgesamt 16 Gefügedaten aufgenommen, wobei es sich um dextrale Seitenverschiebungen (σ_1 088/29, σ_3 357/00) und sinistrale Seitenverschiebungen (σ_1 001/05, σ_3 095/31) sowie Aufschiebungen (σ_1 350/13), σ_3 183/76) und Abschiebungen (σ_1 194/76, σ_3 348/13) handelt (Abbildung 40).

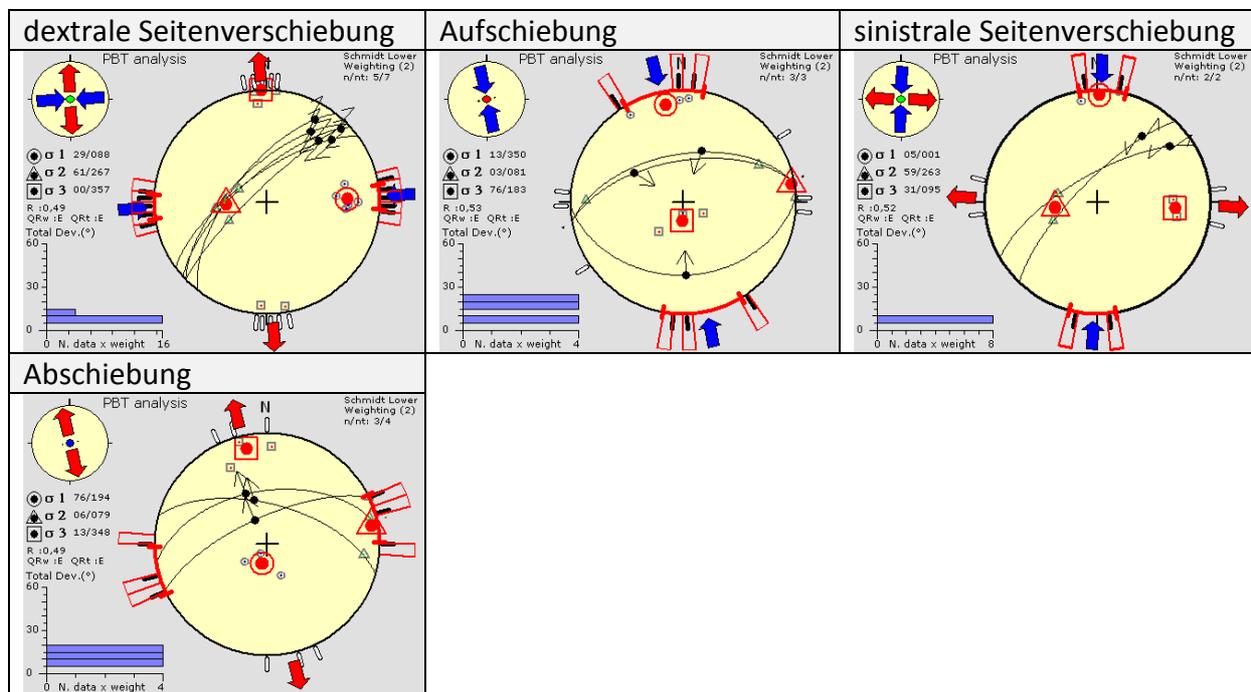


Abbildung 40: Hauptnormalspannungen aus Domäne 7. Es wurden zwei Deformationsereignisse ermittelt.

Die unterschiedlichen Störungssysteme der gleichen Deformationsphase wurden grafisch dargestellt. Zum einen wurde eine Kombination aus sinistraler Seitenverschiebung mit Auf- und Abschiebungen bei N-S Kompression und E-W Dehnung ermittelt (Abbildung 41) und zum anderen ein System aus dextraler Seitenverschiebung mit Abschiebung bei N(WN)-S(ES) Kompression mit E(NE)-W(SW) Dehnung (Abbildung 42).

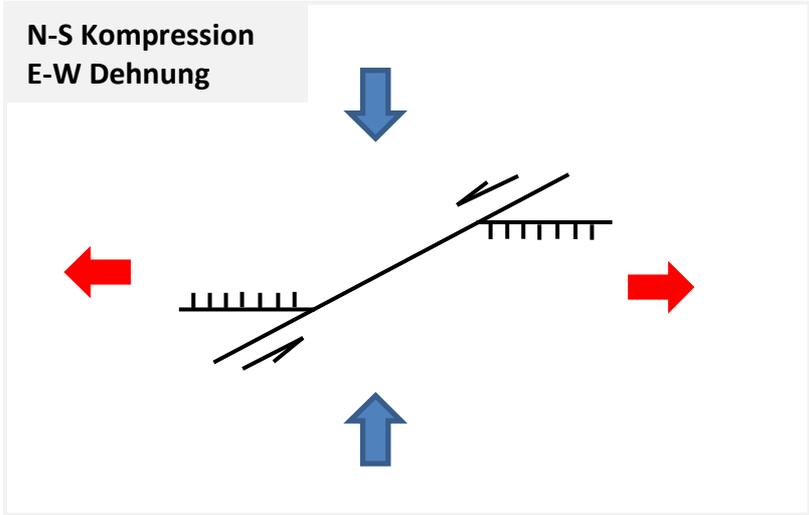


Abbildung 41: Kombination aus sinistraler Seitenverschiebung sowie Auf- und Abschiebungen mit N-S Kompression und E-W Dehnung.

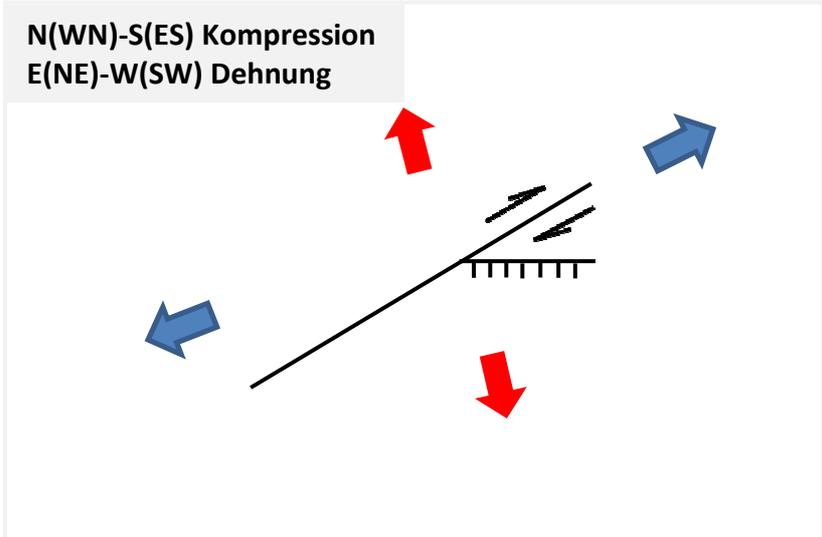


Abbildung 42: Dextraler Seitenverschiebung mit Abschiebung.

Des Weiteren wurde noch die Verteilung von Scher- und Normalspannung nach Mohr Coulomb dargestellt (Abbildung 43). Auffällig in dieser Domäne ist, dass die Seitenverschiebungen einen geringeren Anteil an der Scherspannungskomponente haben als die Auf- und Abschiebungen.

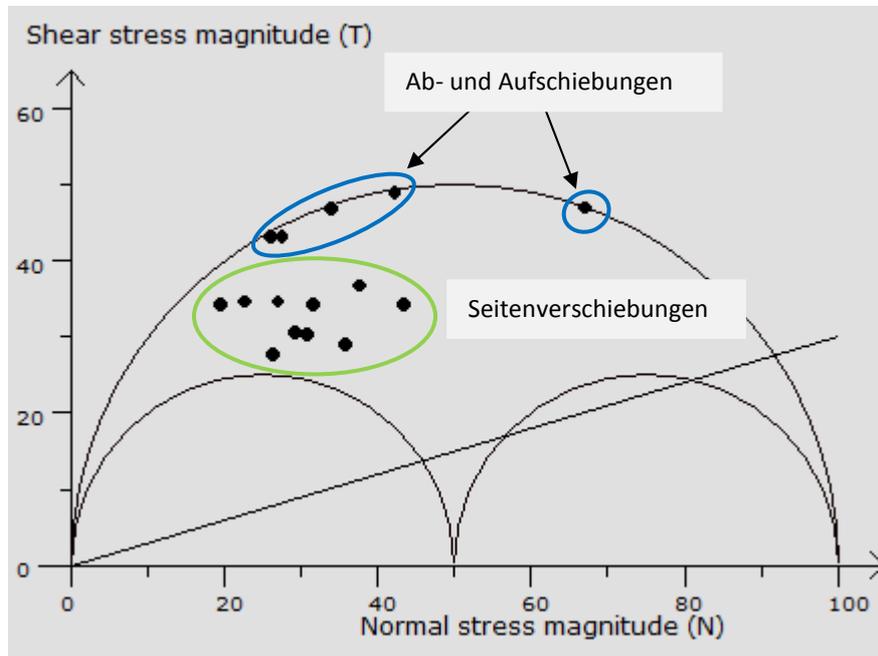


Abbildung 43: Geringes Verhältnis zwischen Scherspannung und Normalspannung. Die Seitenverschiebungen haben in Domäne 7 einen etwas geringeren Anteil an der Scherspannungskomponente als die Auf- und Abschiebungen.

Domäne 8

In Domäne 8 wurde anhand von 16 Gefügedaten, davon 7 Abschiebungen (σ_1 327/73, σ_3 100/13) und 9 Seitenverschiebungen, ein Deformationsereignis mit W(NW)-E(SE) Dehnung mit N(EN)-S(WS) Kompression ermittelt (Abbildung 44). Das Verhältnis von Normal- und Scherspannung zeigt wieder eine deutliche Gruppierung der Seitenverschiebungen mit einem geringem Verhältnis zwischen Normal- und Scherspannung, sowie den Abschiebungen mit einem großem Verhältnis zwischen σ_n/σ_s (Abbildung 45).

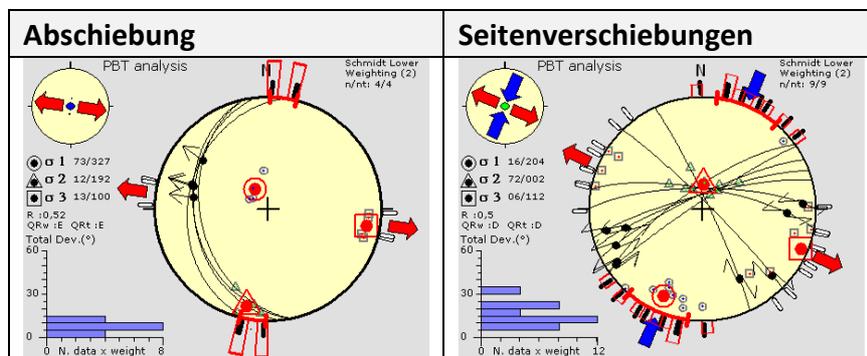


Abbildung 44: Abschiebungen und Seitenverschiebungen in Domäne 8.

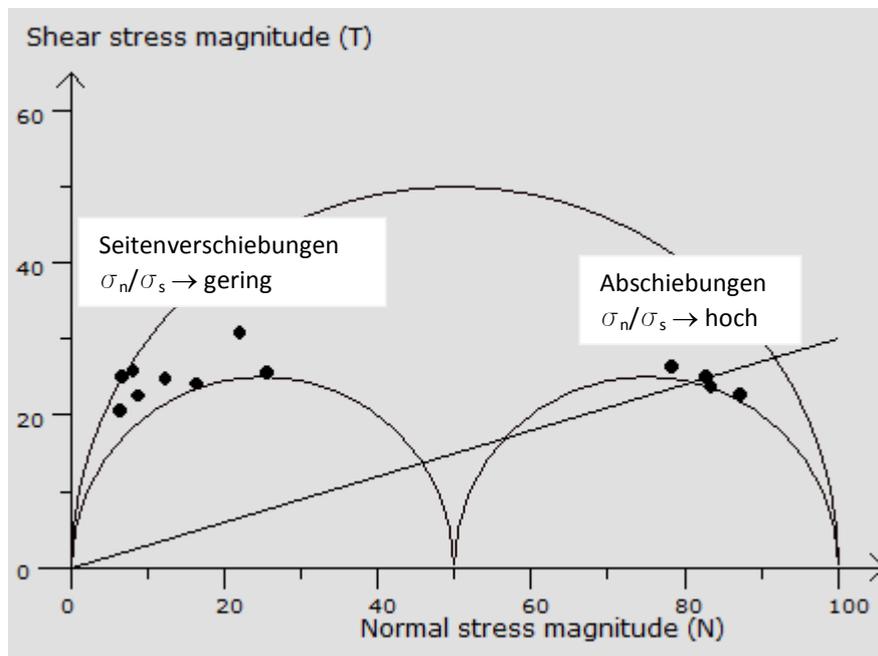


Abbildung 45: Die Abschiebungen zeigen ein großes Verhältnis zwischen Scher- und Normalspannung und liegen daher im rechten Bereich der Grafik, die Seitenverschiebungen weisen eine höhere Scherspannungskomponente auf.

5.1.4 Darstellung der Spannungsplots in der Karte

Die 21 verschiedenen Plots wurden anschließend in Karte zu den jeweiligen Domänen geplottet (Abbildung 46). Innerhalb der Domänen 9, 10 und 11 konnten keine aussagekräftigen Plots erstellt werden. Aus dieser Darstellung lassen sich die unterschiedlichen Deformationsereignisse sehr gut ableiten. Es wurden zwei tektonischen Phasen im regionalem Maßstab ermittelt: eine in etwa N-S Kompression mit einer E-W Dehnung und zum anderen eine N-S Dehnung mit einer E-W Kompression. Aufgrund der Beschaffenheit der Aufschlüsse im Gelände war es nicht möglich eine zeitliche Korrelation der zwei Ereignisse vorzunehmen.

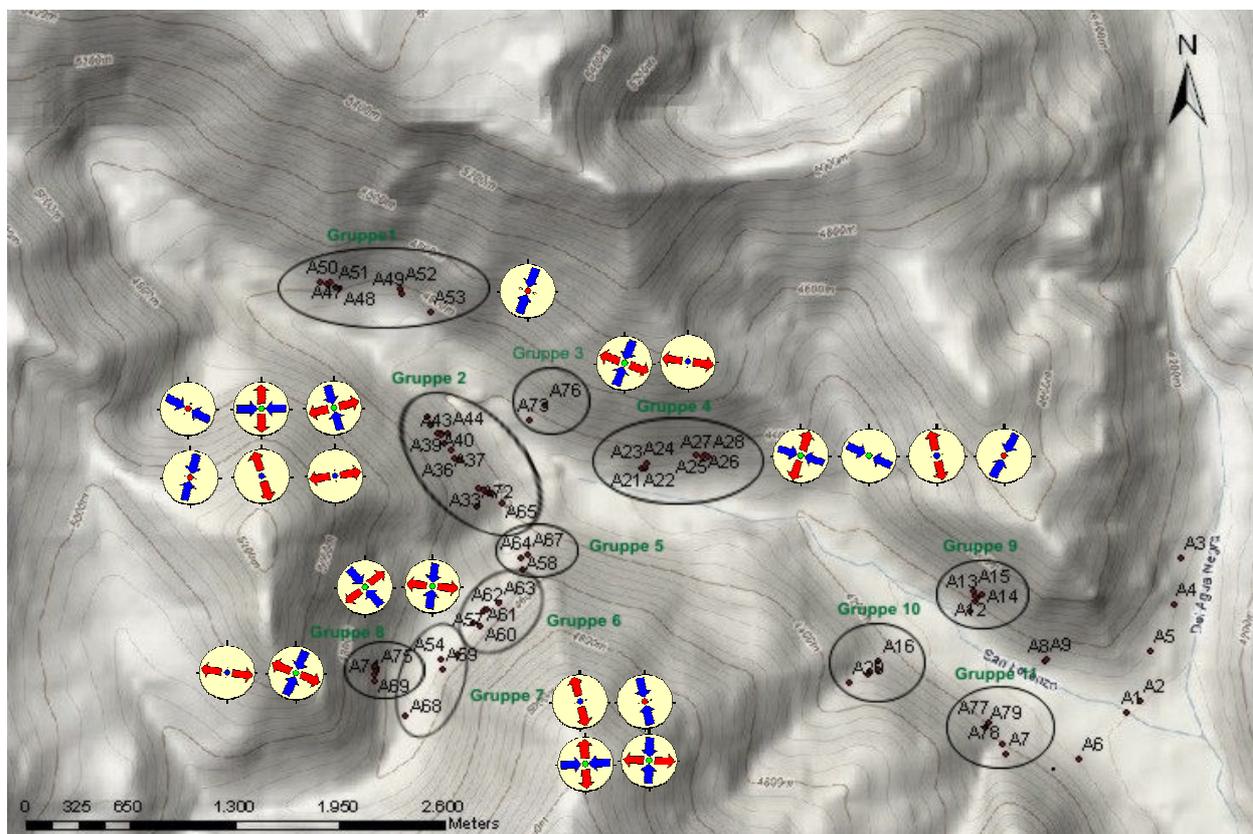


Abbildung 46: Darstellung der unterschiedlichen Hauptspannungsrichtungen innerhalb der Domänen. In den Domänen 9-11 konnten keine aussagekräftigen Spannungsplots erzeugt werden, somit werden diese Aufschlüsse nicht mehr in die weiteren Auswertungen mit einbezogen.

Nun gilt es die gewonnenen Resultate in bereits vorhandene Studien eingliedern zu lassen. Dazu werden die Plots der zwei Deformationsereignisse in die Karte der Lineamente und Störungssysteme, welche von der Firma Geoconsult ZT GmbH erstellt wurde, integriert. Die Abbildung 47 zeigt die N-S Kompression mit E-W Dehnung, Abbildung 48 zeigt das zweite ermittelte Deformationsereignis mit N-S Dehnung und E-W Kompression. Die leicht ausgeblichenen Plots in Abbildung 46 zeigen Hauptspannungsrichtungen die im Gegensatz zu den anderen leicht in ihrer Orientierung variieren. Dies kann zum einen auf eine spätere Rotation der Blöcke durch reaktivierte Störungen oder auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sein.

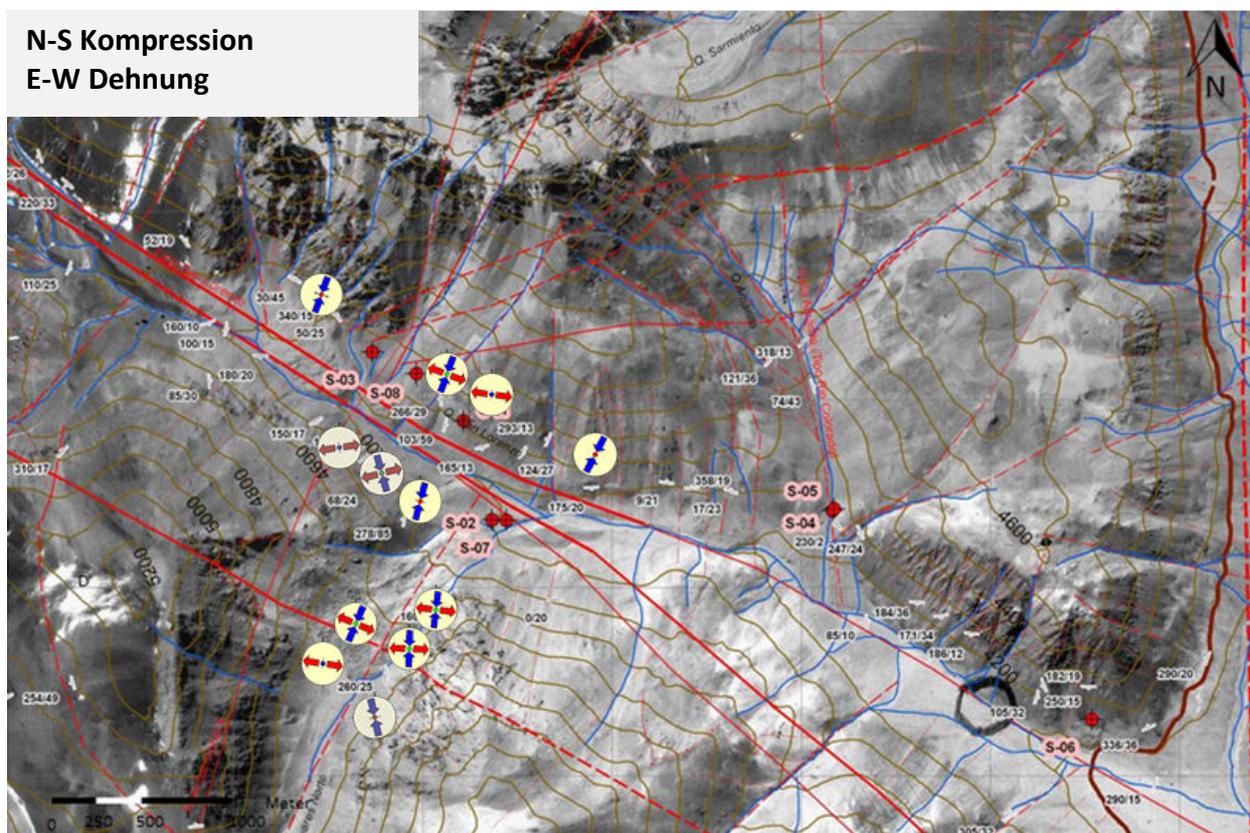


Abbildung 47: Hauptnormalspannungen des Deformationsereignisses mit N-S Kompression und E-W Dehnung geplottet in der Karte der Lineamente und Störungssysteme der Firma Geoconsult ZT GmbH.

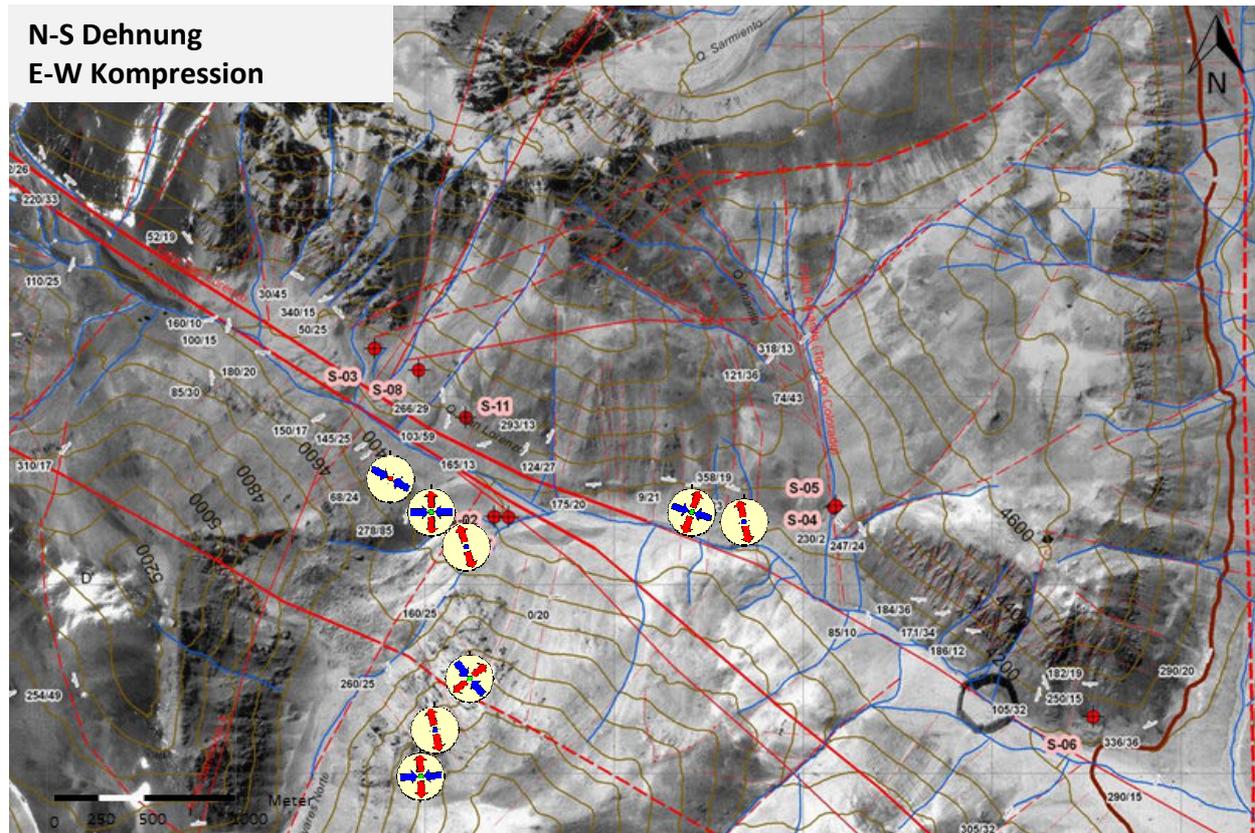


Abbildung 48: Plots der Hauptnormalspannungen der N-S Dehnung mit E-W Kompression. Die Orientierungen der Hauptnormalspannungen variieren leicht was auf eine spätere Rotation der Blöcke oder auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sein kann.

6 Ergebnisse

Die Auswertungen der Gefügedaten ergab wie bereits gezeigt zwei Deformationsereignisse: eines mit in etwa N-S Kompression und E-W Dehnung sowie ein weiteres um 90° gedrehtes Spannungsfeld mit N-S Dehnung und E-W Kompression. Dies lässt sich sehr gut mit dem tektonischen Zyklus der Anden korrelieren indem es, nach Charrier, R et al (2007), abwechselnd zu kompressiver und extensiver Tektonik gekommen ist.

Eine zeitliche Einteilung der Ergebnisse war aufgrund der Beschaffenheit der Gefügedaten im Gelände nicht möglich. Auffallend ist jedoch, dass für das Deformationsevent mit N-S Kompression und E-W Dehnung mehr Spannungsplots und Gefügedaten gefunden wurden. Dies weist womöglich darauf hin, dass es sich bei diesem Event um das jüngere handelt.

Im Folgenden wurde versucht, den Störungen, welche von der Firma Geoconsult ZT GmbH ermittelt wurden, Bewegungsrichtungen zuzuordnen. Die ermittelten Daten lassen sich zum Teil sehr gut mit den Störungen korrelieren.

6.1 N-S Kompression mit E-W Dehnung

In diesem Deformationsereignis konnten fünf Störungen sehr gut mit den ausgewerteten Daten korreliert werden (Abbildung 49). Es handelt sich in allen Fällen um Seitenverschiebungen: dextrale Seitenverschiebungen welche NW-SE orientiert sind, sinistrale Seitenverschiebungen mit NE-SW Orientierung, sowie einer W(SW)-E(NE) orientierten sinistralen Seitenverschiebung. Neben den Seitenverschiebungen wurden noch Auf- und Abschiebungssysteme aufgenommen (Abbildung 50). Diese konnten nicht direkt zu den größeren Störungssystemen zugeordnet werden, sie wurden vermutlich in Kopplung mit den Seitenverschiebungen lokal gebildet, wie dies auch bereits in vorherigem Kapitel bei der Detailauswertung der Domänen dargestellt wurde.

Generell sind drei Bewegungsrichtungen deutlich erkennbar: 1. ein Abschiebungssystem in Richtung Westen von N-S streichenden Störungsflächen ([6] und [3]), 2. ein Abschiebungssystem in Richtung E von ebenfalls N-S streichenden Störungsflächen ([1]) sowie 3. Aufschiebungssystem in Richtung NNE von NW-SE streichenden Flächen ([7], [2] und [5]).

**N-S Kompression
E-W Dehnung**

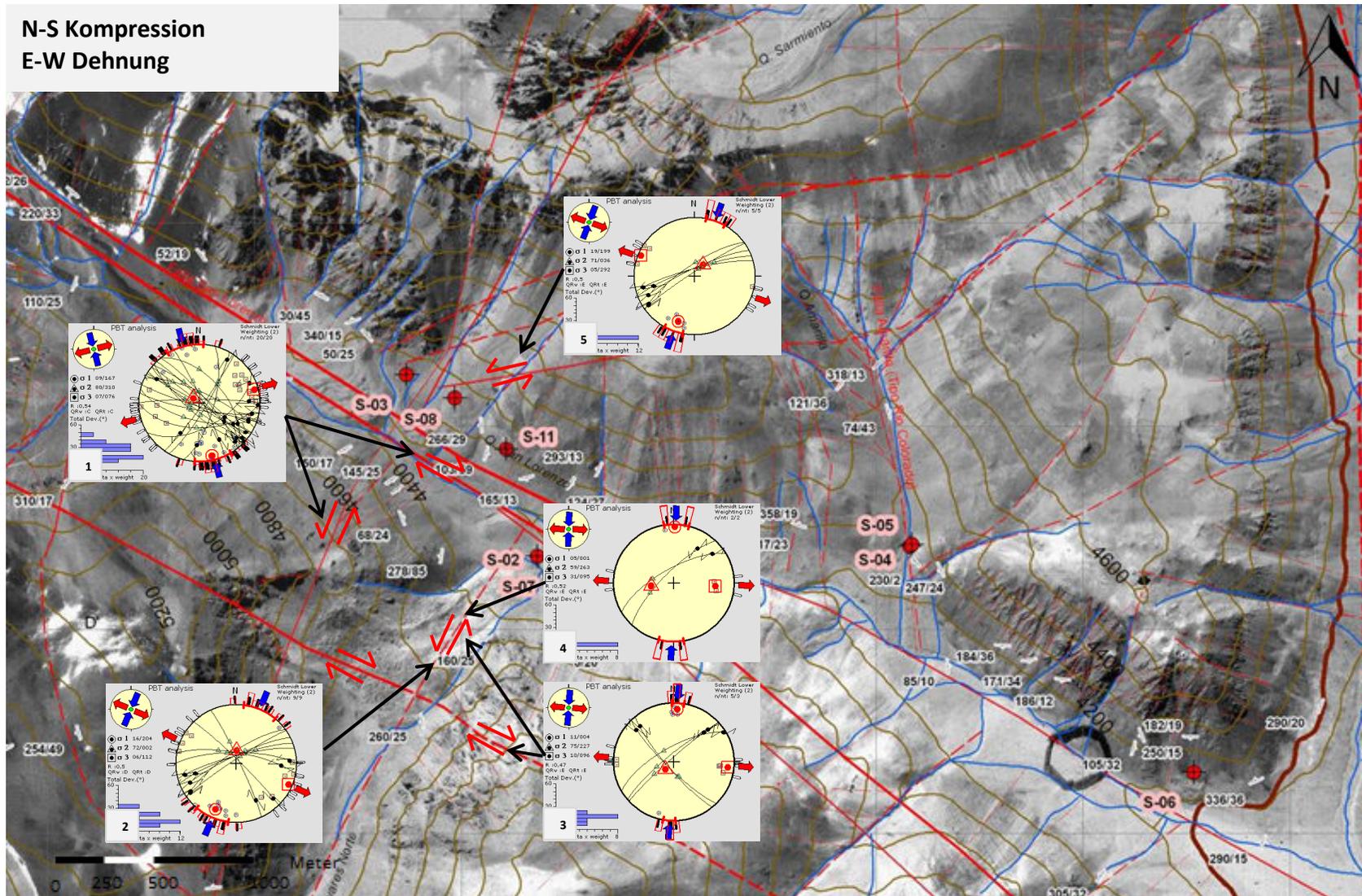


Abbildung 49: Die Lineamente und Störungen aus der Karte der Firma Geoconsult ZT GmbH wurde korreliert mit den Ergebnissen der Datenauswertung der Masterarbeit. Dabei wurden einzelnen Störungen ermittelte Bewegungssinne zugeordnet. [1] SL1 aus Domäne 2, [2] SL aus Domäne 8, [3] SL2 aus Domäne 7, [4] SL2 aus Domäne 6 sowie [5] SL1 aus Domäne 3.

**N-S Kompression
E-W Dehnung**

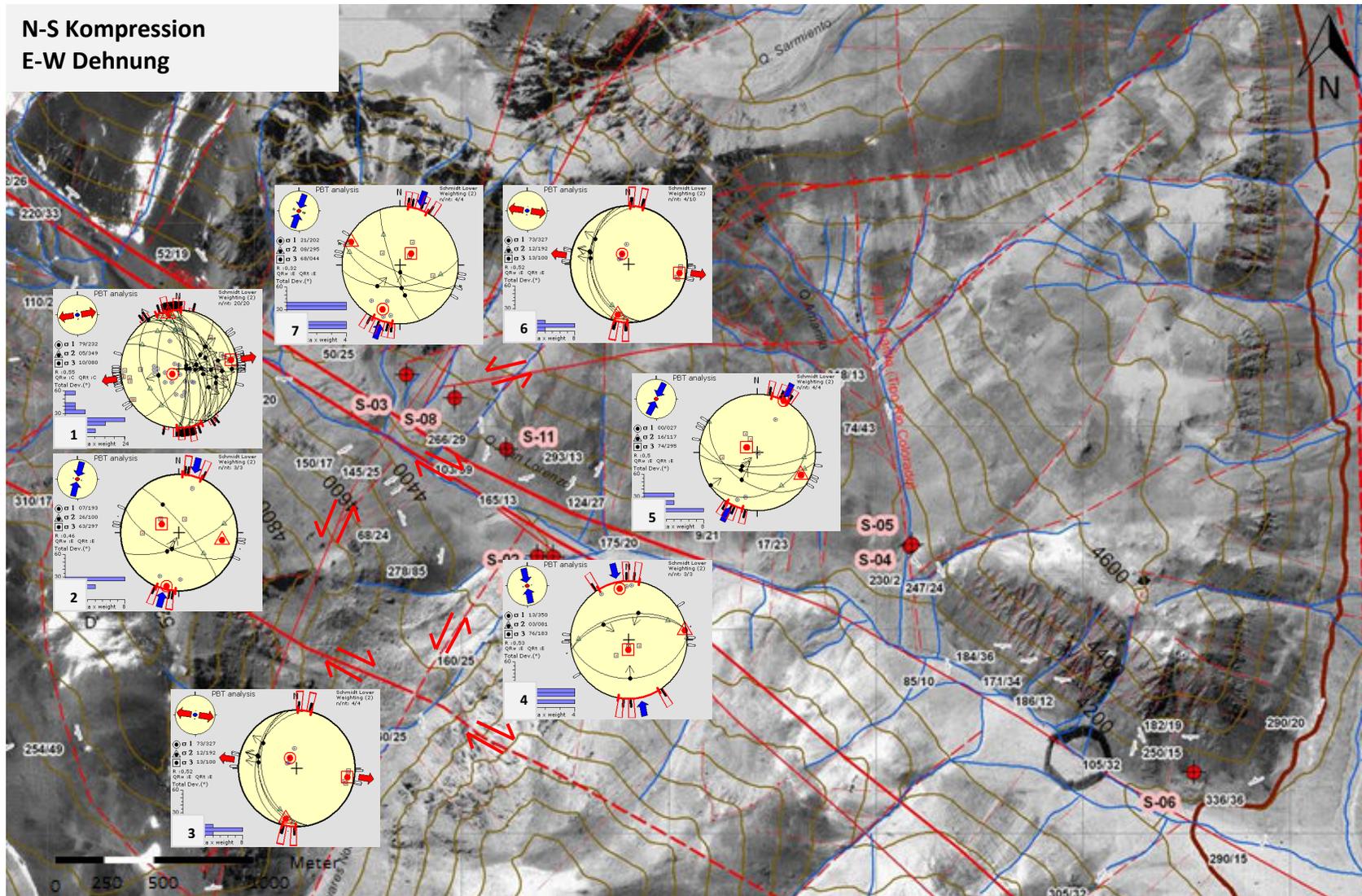


Abbildung 50: Abschiebungs- und Aufschiebungssysteme welche nicht direkt mit Störungen aus der Karte der Firma Geoconsult ZT GmbH korreliert werden konnten. [1] N2 aus Domäne 2, [2] I2 aus Domäne 2, [3] N aus Domäne 8, [4] I aus Domäne 7, [5] I2 aus Domäne 4, [6] N1 aus Domäne 3 und [7] I1 aus Domäne 1.

6.2 N-S Dehnung mit E-W Kompression

In diesem Deformationsereignis, mit N-S Dehnung und E-W Kompression, konnten lediglich zwei Störungen sehr gut mit den ermittelten Daten korreliert werden (Abbildung 51). Dabei handelt es sich bei beiden um N(EN)-S(W) orientierten dextralen Seitenverschiebungen, welche im vorher behandelten Deformationsereignis einen sinistralen Bewegungssinn zeigten. Des Weiteren wurde noch für die NW-SE verlaufende „Falla San Lorenzo“ ein sinistraler Bewegungssinn vermutet. Ebenso mit Fragezeichen wurde der W(SW)-E(NE) verlaufende Störung im nördlichen Bereich des San Lorenzo Tales ein dextraler Bewegungssinn zugeordnet.

Einige Störungssysteme konnten nicht direkt Störungen auf der Karte zugeordnet werden (Abbildung 52). Dabei handelt es sich um 1. E-W streichende dextrale Seitenverschiebungen ([4]), 2. E-W streichende Aufschiebungen in Richtung Norden ([3]), 3. in etwa E-W streichende Abschiebungen in Richtung Süden ([5]) sowie SSW-NNE streichende Aufschiebungen in Richtung Westen ([1]).

Generell gibt es in diesem Deformationsereignis weniger Gefügedaten als im oben behandelten.

N-S Dehnung
E-W Kompression

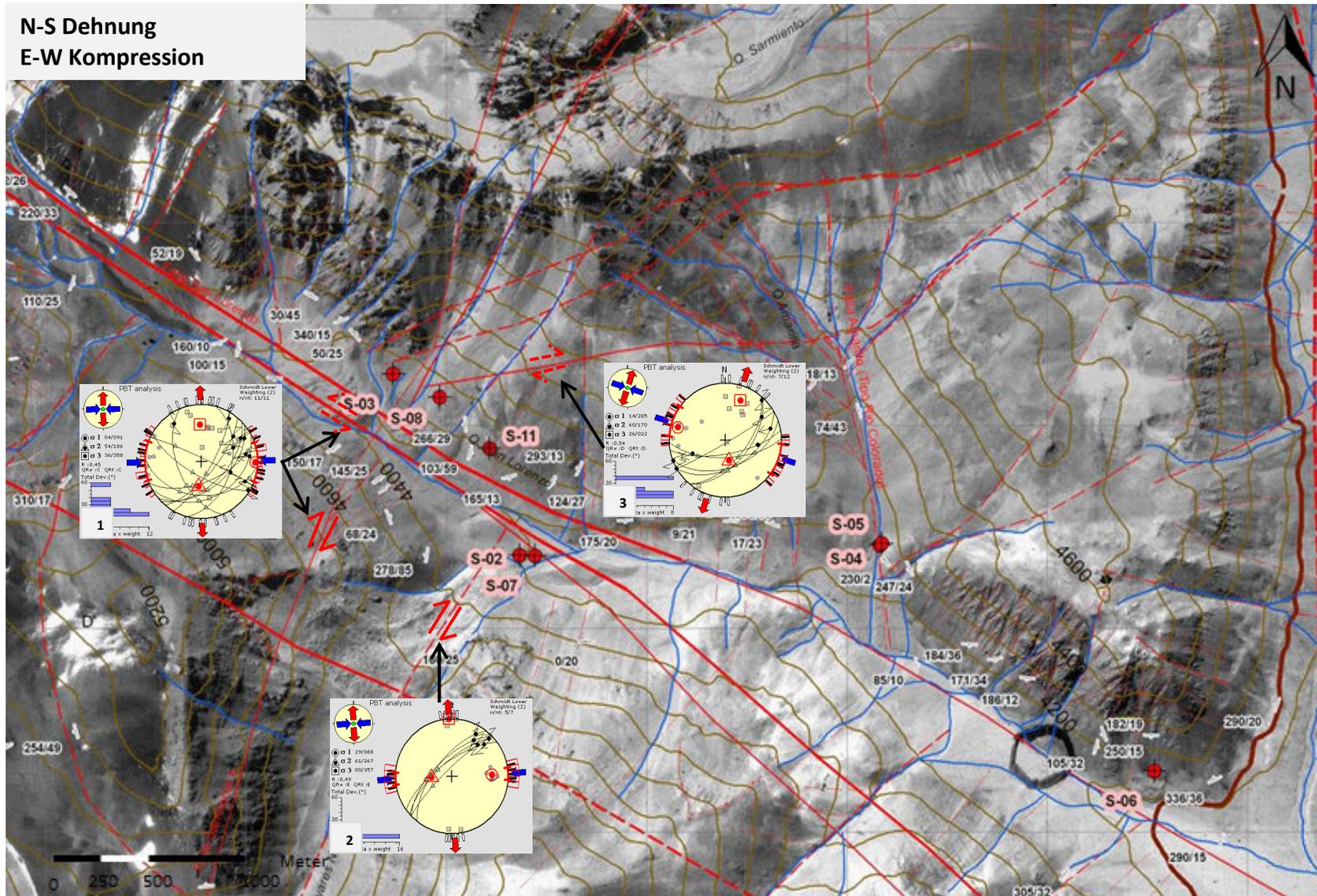


Abbildung 51: Korrelation der ausgewerteten Gefügedaten mit den Lineamenten und Störungen welche von der Firma Geoconsult ZT GmbH erstellt wurde. [1] SL2 aus Domäne 2 [2] SL1 aus Domäne 7 [3] SL aus Domäne 4.

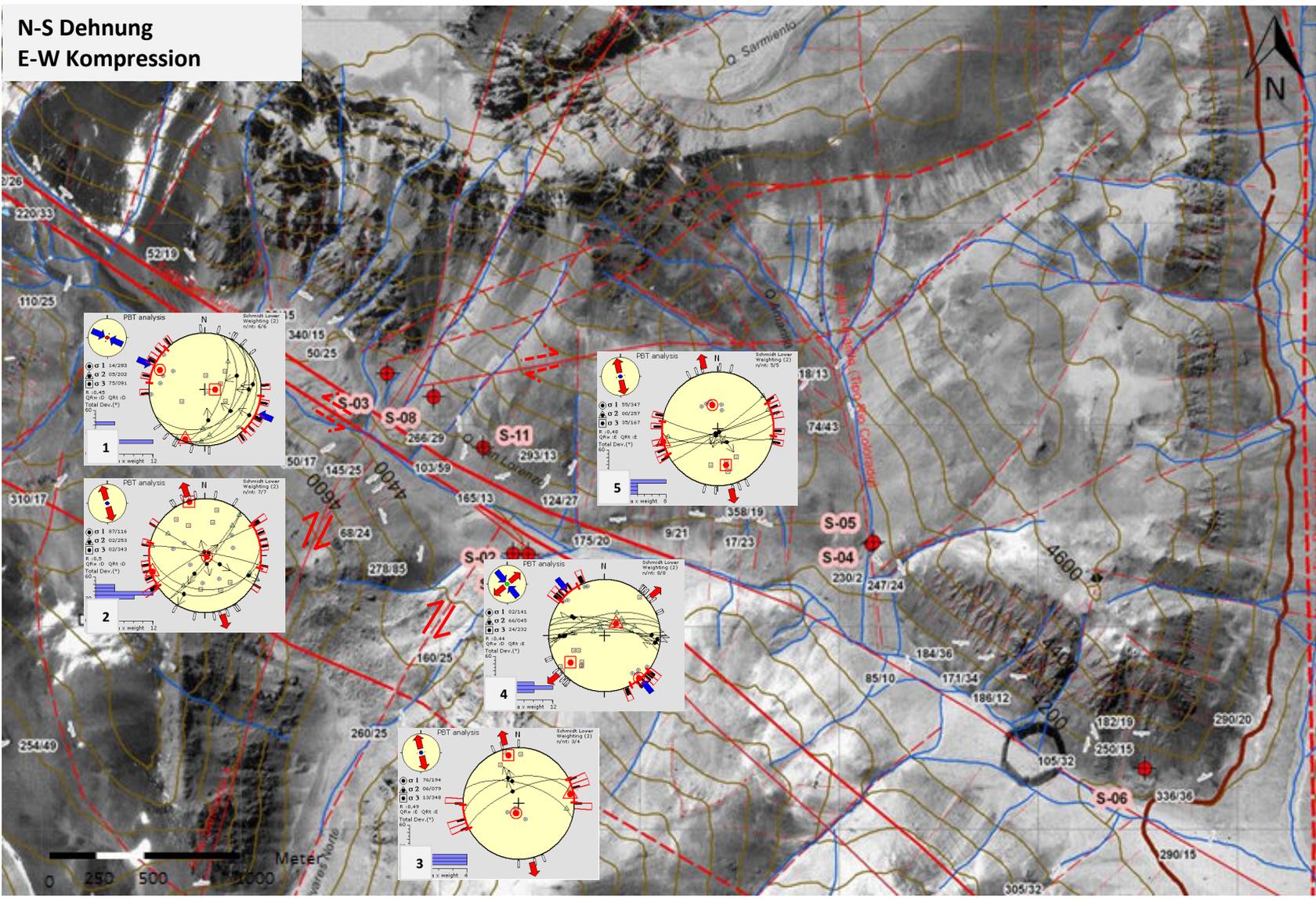


Abbildung 52: Spannungsplots des Deformationsereignisses mit N-S Dehnung und E-W Kompression welche nicht direkt Störungen zugeordnet werden konnten. [1] I1 aus Domäne 2, [2] N1 aus Domäne 2, [3] N aus Domäne 7, [4] SL1 aus Domäne 6 und [5] N aus Domäne 4.

7 Tunnel de Agua Negra

7.1 Das Projekt

Der geplante Straßentunnel im Bereich des Agua Negra Passes („Túnel de Agua Negra“) gehört mit dem ebenfalls in Planung befindlichen Eisenbahntunnel im Bereich Mendoza („Biogenic Corridor“) zu einem großen zentral südamerikanischen Atlantik-Pazifik Korridor Projekt. Der Korridor soll ermöglichen, vom Hafen Porto Alegre (Brasilien) bis zum Hafen Coquimbo (Chile) eine durchgehende Straßenverbindung für den Schwerverkehr zu schaffen um somit die Güter am Landweg vom Osten nach Westen Südamerikas zu transportieren und so den deutlich längeren Seeweg um die südliche Spitze des südamerikanischen Kontinentes zu umgehen. Die Abbildung 53 zeigt die geplanten Routen. Der Rote Pfeil markiert die Position des „Tunnel de Agua Negra“.



Abbildung 53: Route des geplanten zentral südamerikanischen Atlantik-Pazifik Korridor Projekt. Die dunkelblaue Route zeigt die geplante Straßenstrecke von Porto Alegre (Brasilien) nach La Serena (Chile) mit dem geplanten Straßentunnel im Bereich des Agua Negra Passes. Die hellblaue Route zeigt die geplante Eisenbahnstrecke, für diese soll im Bereich Mendoza ein Eisenbahntunnel errichtet werden.

Quelle: TunnelTalk (2011) <<http://www.tunneltalk.com/Chile-Argentina-Dec11-Agua-Negra-makes-infrastructure-priority-list.php>>.

Ebenso soll der Tunnel ermöglichen die Route, welche bis jetzt nur in den Sommermonaten befahrbar ist, das ganze Jahr zugänglich zu machen und aus der jetzigen Schotterstraße eine breit ausgebaute asphaltierte Straße für den Schwerverkehr zu schaffen.

Es standen ursprünglich zwei Tunnelvarianten zur Auswahl: zum einen eine 5 km lange, höher gelegene und eine 14 km niedriger gelegenen Variante. Man entschied sich aufgrund der unmittelbaren Nähe zur bestehenden Infrastruktur und der geringeren Höhe für die längere Tunneltrasse. Das Tunnelportal wird sich bei dieser Variante am nord-östlichen Ende des San Lorenzo Tales, auf einer Höhe von etwa 4.100 m befinden.

Der Baubeginn des Tunnels ist stark von der politischen Situation in Argentinien abhängig. Momentan ist geplant im Jahr 2013 mit dem Bau zu beginnen.

7.2 Auswirkungen der aufgenommenen Strukturen

Die Ergebnisse der Auswertungen der Gefügedaten ergaben zwei Deformationsereignisse. Da keine zeitliche Einteilung der Deformationsphasen möglich war, kann auch nicht gesagt werden ob im Moment eine Kompressionsphase oder Extensionsphase im Untersuchungsgebiet, und somit im Bereich der Tunneltrasse vorliegt. Durch diese Gegebenheiten ist es schwierig anhand der vorhandenen Analyse Auswirkungen auf das Tunnelprojekt zu beschreiben.

Generell kann man jedoch sagen dass es durch die abwechselnden kompressiven und extensiven Phasen zu einer starken bruchhaften Deformation des Gebirges im Bereich der flach einfallenden Subduktionszone gekommen ist. Daher ist mit einem hohem Zerlegungsgrades des Gebirges zu rechnen ist und man sowohl mit kompressiven als auch extensiven Bedingungen rechnen muss, wobei vermutlich die Kompression vorherrschend sein wird.

7.2.1 Geotechnische Auswirkungen von Extensions- und Kompressionsbedingungen

In einem extensiven Abschiebungssystem wirken die größte Hauptnormalspannung (σ_1) und σ_2 vertikal sowie die kleinste Hauptnormalspannung (σ_3) horizontal (Abbildung 54). Es bilden sich vorwiegend vertikal orientierte Störungen, vertikale offene Klüfte und horizontal orientierte Stylolithe, was zu einem Verlust der Stabilität der Gesteinsmasse und zu einer hohen Konduktivität führt. Die größten geotechnischen Probleme in einem Abschiebungsregime entstehen durch die hohe Konduktivität und dem Spannungsverlust des Gebirges. Durch die offenen Klüfte und die damit verbundene Konduktivität ist mit vermehrter Wasserführung zu rechnen.

Im Gegensatz zum extensiven Abschiebungssystem wirken die größte Hauptnormalspannung (σ_1) sowie σ_2 im kompressiven Aufschiebungsregime horizontal und die kleinste Hauptnormalspannung (σ_3) vertikal (Abbildung 54). Es kommt zur Bildung von dichten Störungen mit geringer Konduktivität und mächtigen Störungsgouges sowie zu erhöhter seismischer Aktivität. Die Klüfte und Störungen haben, im Gegensatz zum Abschiebungssystem, hauptsächlich eine horizontale Orientierung. Während des Tunnelbaus kann es beim druckhaften Gebirge, durch die hohe Verformbarkeit und der niedrigen Festigkeit, zu Deformationen des Hohlraumes und zu Beschädigungen des Tunnelausbaus kommen. Ebenso können die kompressiven Bedingungen zu einem Blockieren des Bohrkopfes sowie zu einem Verklemmen des Schildes beim Vortrieb mittels Tunnelbohrmaschine führen.

Bei Seitenverschiebungssystemen kann es zu einem hoch anisotropen variablen lokalen Stressfeld und hohen seismischen Gefahren kommen. Die größte Hauptnormalspannung (σ_1) sowie die kleinste Hauptnormalspannung (σ_3) wirken horizontal, σ_2 wirkt vertikal (Abbildung 54). Die seismischen Gefahren sind für den Tunnelbau jedoch von untergeordneter Bedeutung da es durch die Einbettung im Untergrund kaum zu Beeinträchtigungen kommt.

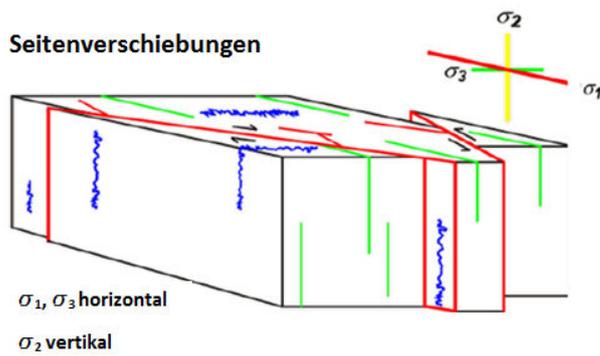
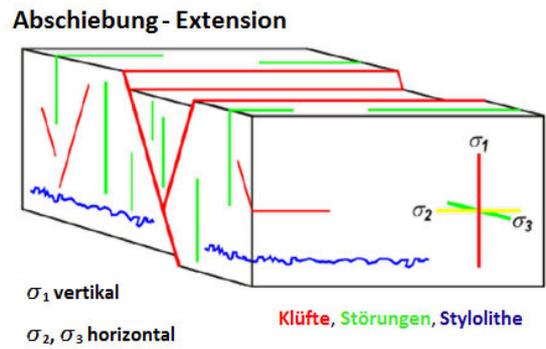
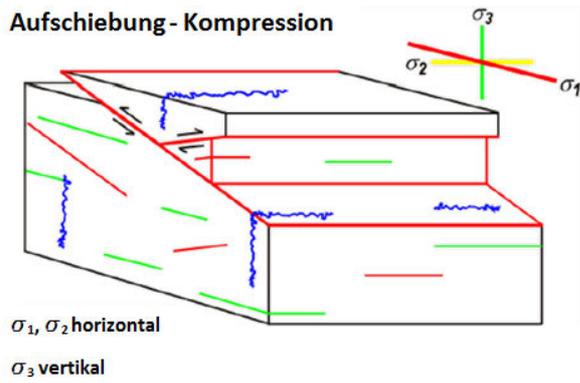


Abbildung 54: Orientierung der Hauptnormalspannungen ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) sowie Ausbildung der Störungen, Klüfte und Stylolithe bei den verschiedenen Störungssystemen. Quelle: verändert nach den Vorlesungsunterlagen zur Lehrveranstaltung „Rock Mass Characterisation“ von Brosch F.J.

Die folgenden Abbildungen 55 und 56 zeigen den Verlauf der Tunneltrasse und die nach der Datenauswertung angenommenen Bewegungssinne der Störungen im Bereich des San Lorenzo Tales.

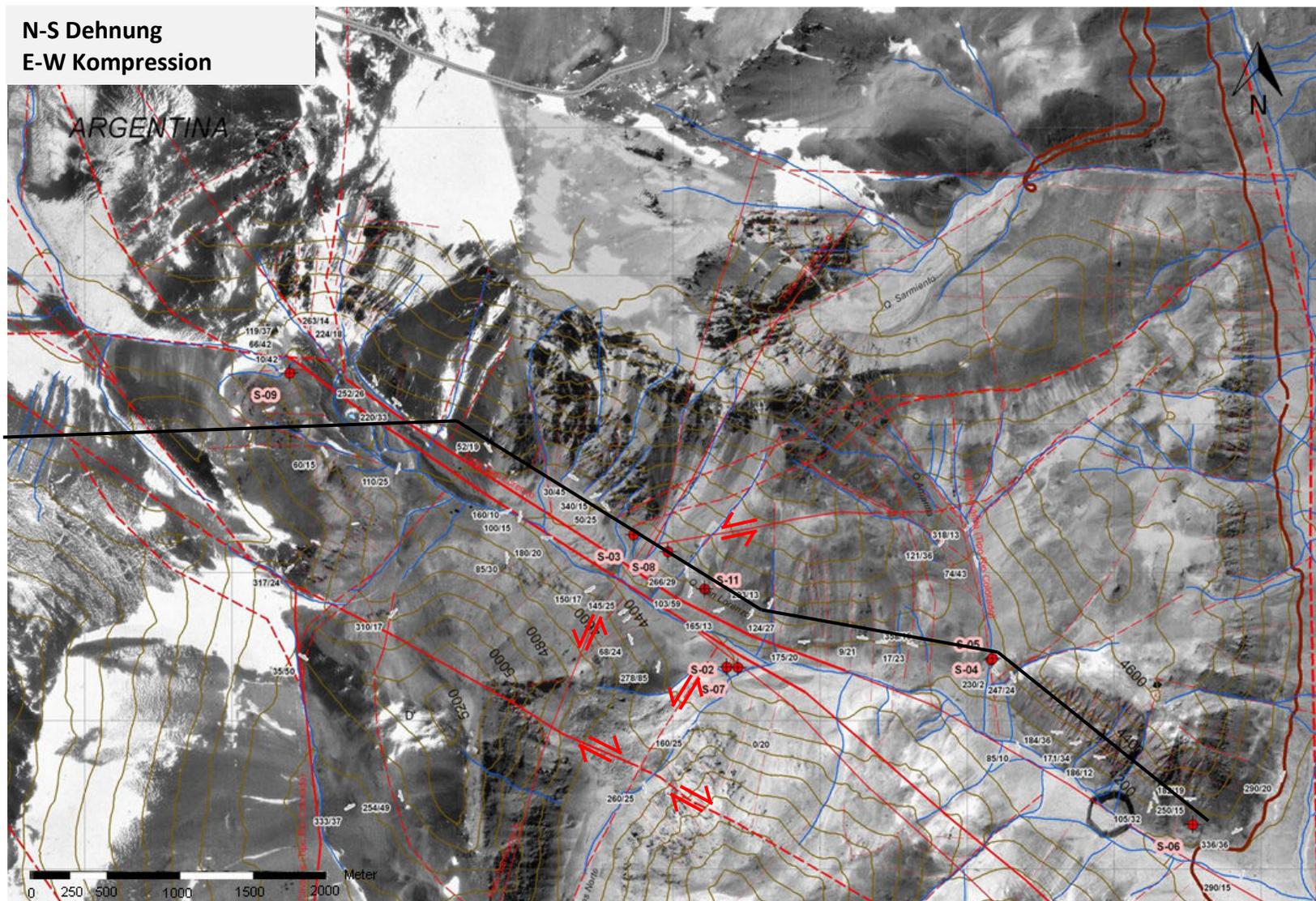


Abbildung 55: Verlauf der Tunneltrasse im Untersuchungsgebiet, sowie Störungen und Bohrungen. Die Karte, mit Ausnahme der Tunneltrasse, wurde von der Firma Geoconsult ZT GmbH erstellt.

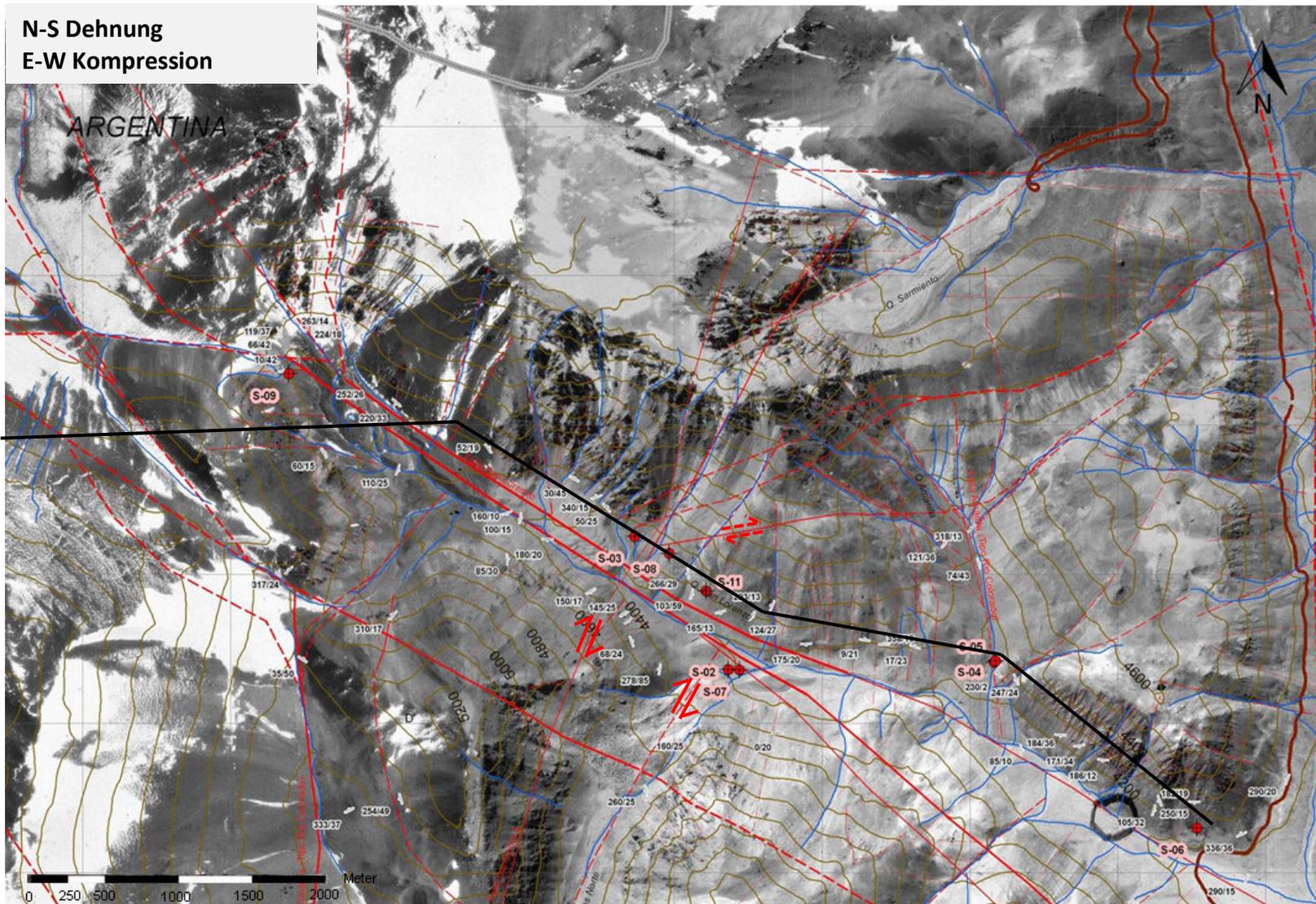
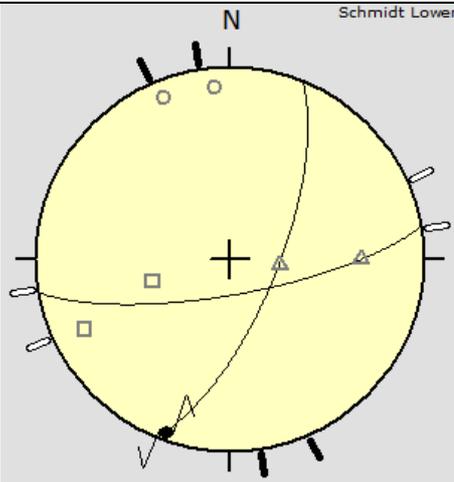
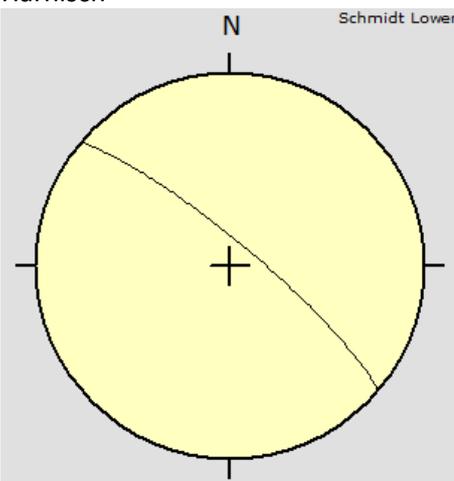
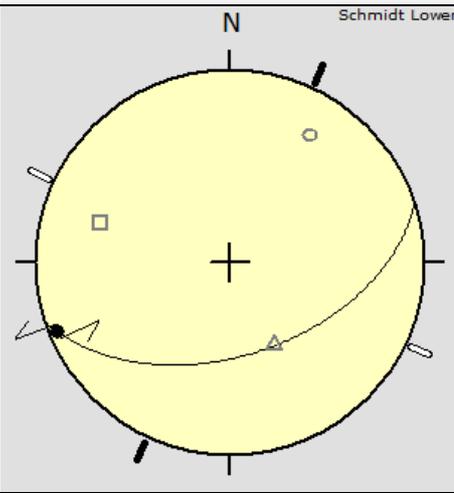


Abbildung 56: Verlauf der Tunneltrasse im Untersuchungsgebiet, sowie Störungen und Bohrungen. Die Karte, mit Ausnahme der Tunneltrasse, wurde von der Firma Geoconsult ZT GmbH erstellt.

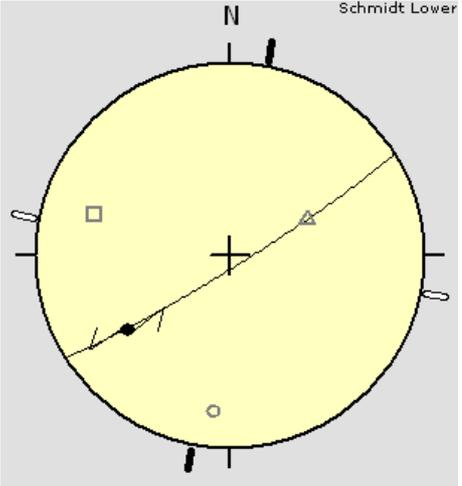
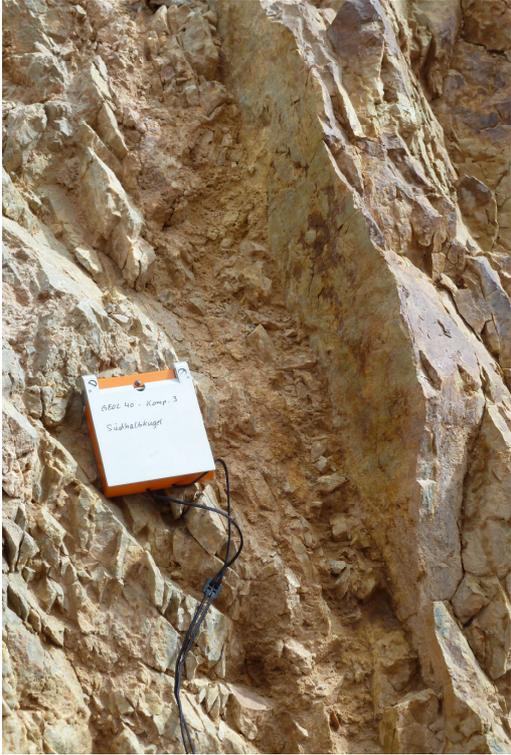
A.1 Anhang

A.1.1 Aufschlussprotokolle

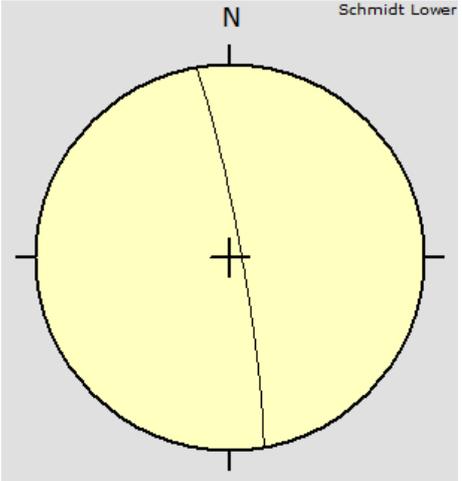
SSC001	03.04.2012		
			 <p>Schmidt Lower</p> <p>Harnisch</p>  <p>Schmidt Lower</p> <p>Kluft</p>
Höhe	4.060 m		
Koordinaten	423790	6651134	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
170/75	?	sinistral	040/80
112/70	200/05	sinistral	

SSC002	03.04.2012		
			 <p>Schmidt Lower</p>
Höhe	4.077 m		
Koordinaten	423880	6651210	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
162/50	248/05	sinistral	

SSC003	03.04.2012		
--------	------------	--	--

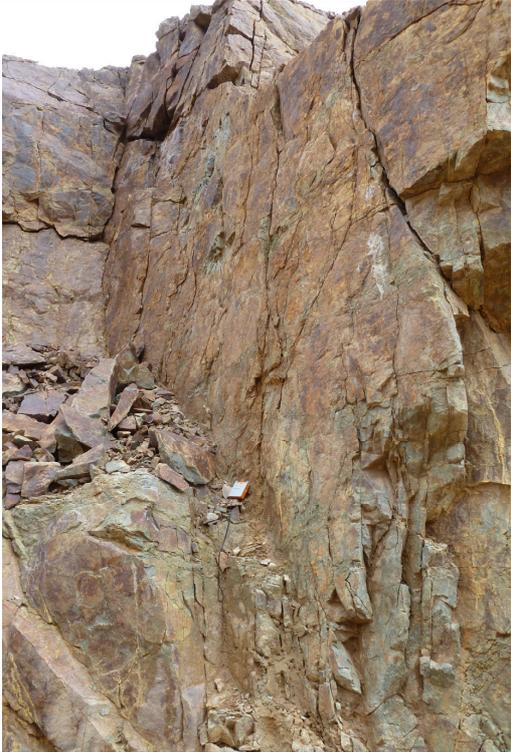
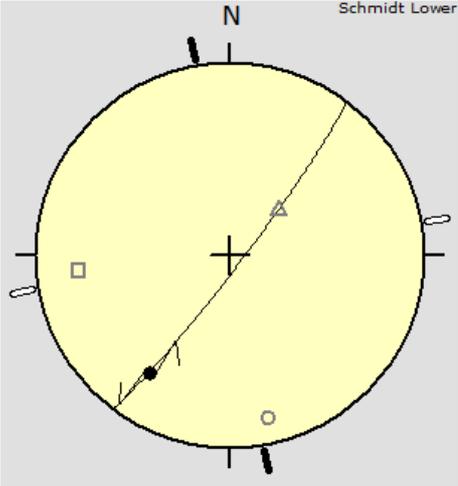


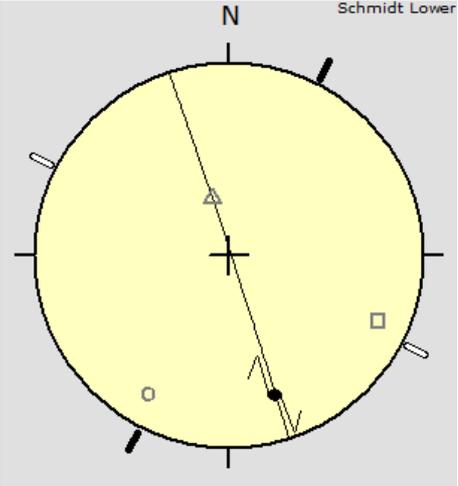
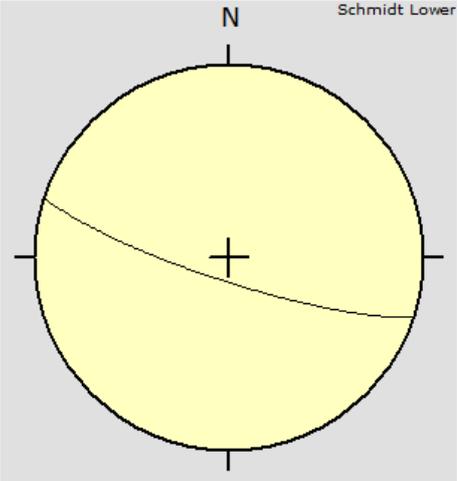
Harnisch



Klüfte

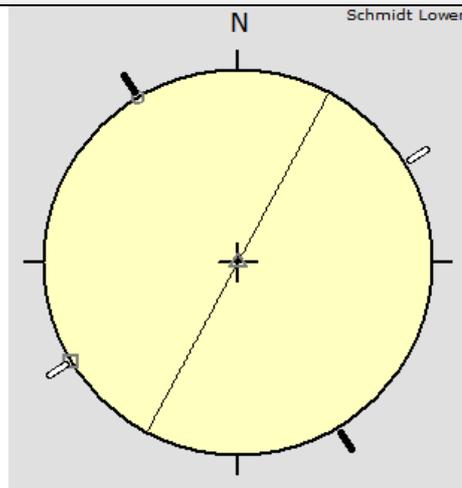
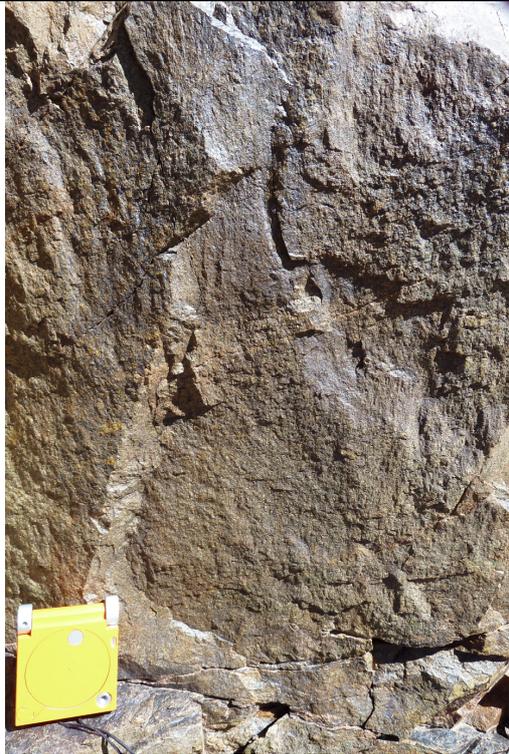
Höhe	4.133 m		
Koordinaten	424136	6652115	UTM 19J
Harnisch	Lination	Bewegungssinn	Klüfte
148/85	260/35	sinistral	080/85

SSC004		03.04.2012	
			
Höhe	4.136 m		
Koordinaten	424088	6651817	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
127/85	214/27	sinistral	

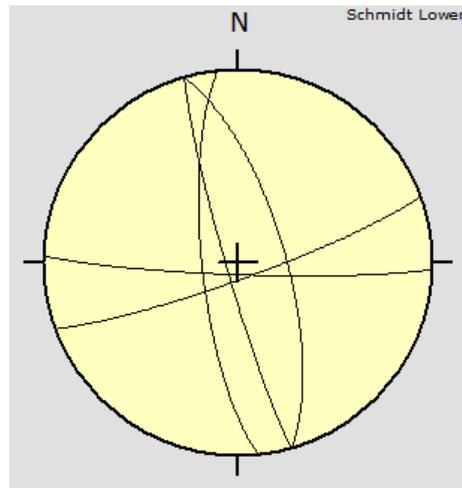
SSC005		03.04.2012	
			 <p>Schmidt Lower</p> <p>Harnisch</p>  <p>Schmidt Lower</p> <p>Kluft</p>
Höhe	4.138 m		
Koordinaten	423943	6651526	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
072/89	162/25	dextral	198/80

SSC006

04.04.2012

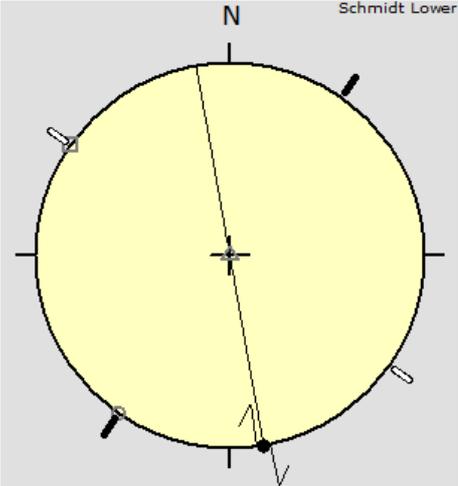


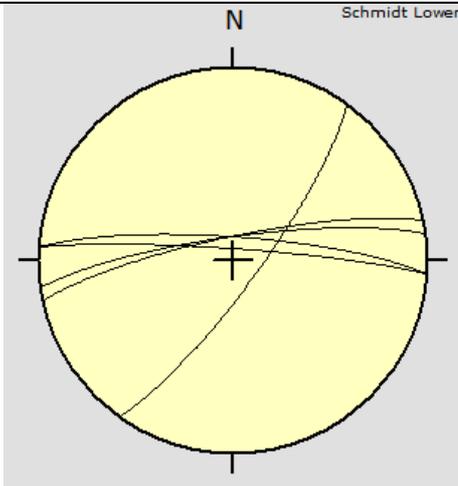
Harnisch

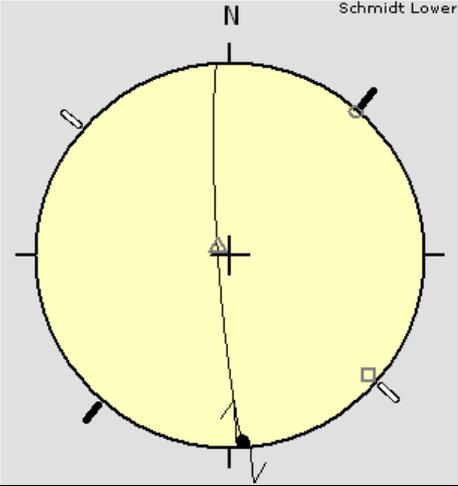


Klüfte

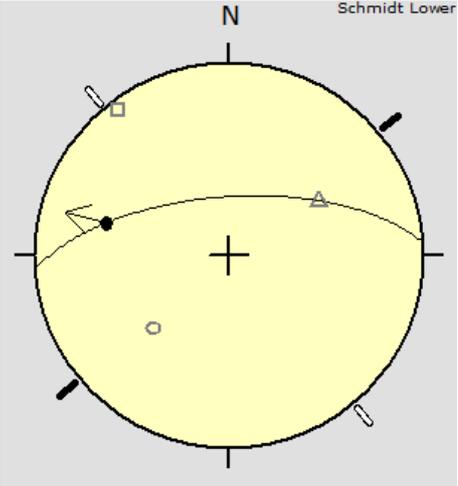
Höhe	4.091 m		
Koordinaten	423497	6650839	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
118/90	?	Abschiebung	182/85
			160/85
			074/70
			264/75
			254/85

SSC007	04.04.2012		
			
Höhe	4.200 m		
Koordinaten	423042	6650868	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
080/90	170/00	dextral	

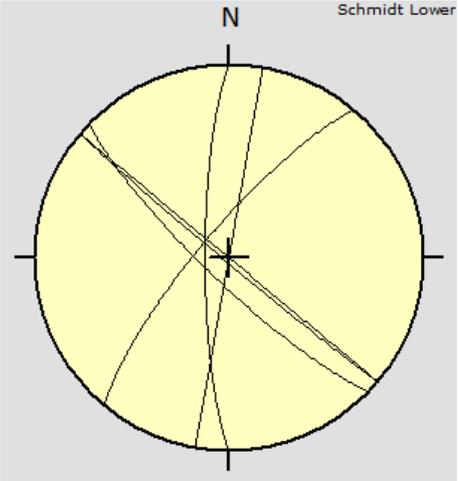
SSC008	04.04.2012		
			
Höhe	4.130 m		
Koordinaten	423280	6651463	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
			348/80
			352/80
			004/80
			128/80
			126/79
			004/85

SSC009	04.04.2012		
			
Höhe	4.129 m		
Koordinaten	423296	6651475	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
266/85	176/04	dextral	

SSC010	05.04.2012	
--------	------------	--

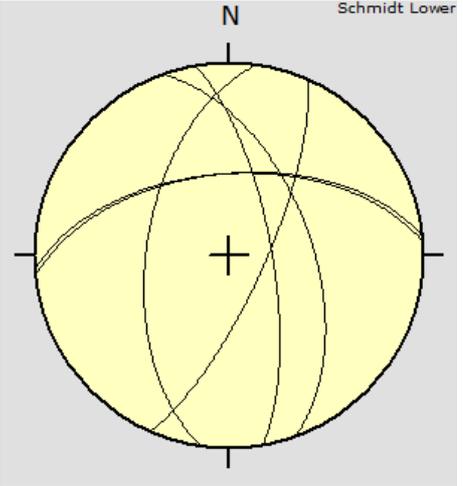


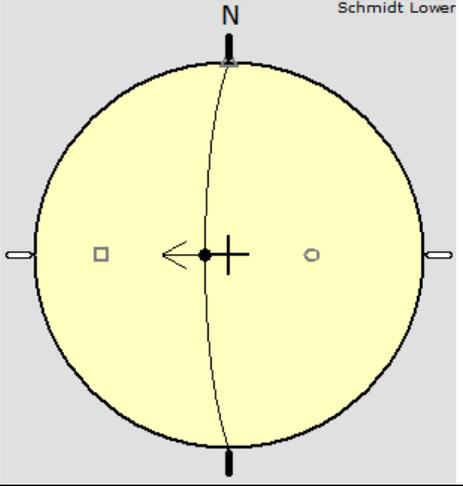
Harnisch



Klüfte

Höhe	4.152 m		
Koordinaten	422821	6651777	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
356/65	285/35	Aufschiebung	220/98
			224/80
			220/90
			270/80
			280/90
			310/78

SSC011	05.04.2012		
			
Höhe	4.210 m		
Koordinaten	422852	6651844	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
			278/55
			354/55
			356/55
			070/55
			080/72
			114/75

SSC012	05.04.2012		
			
Höhe	4.218 m		
Koordinaten	422859	6651864	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
270/80	270/80	Aufschiebung	

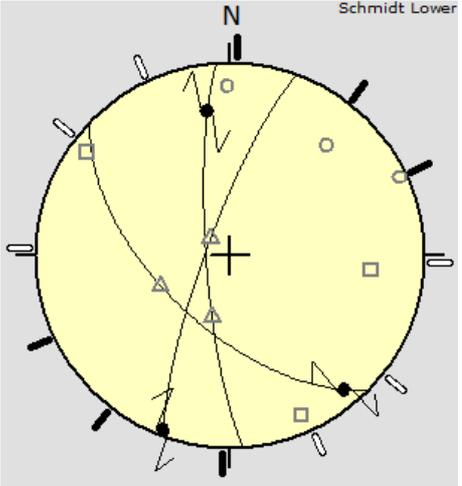
SSC013	05.04.2012		
---------------	------------	--	--



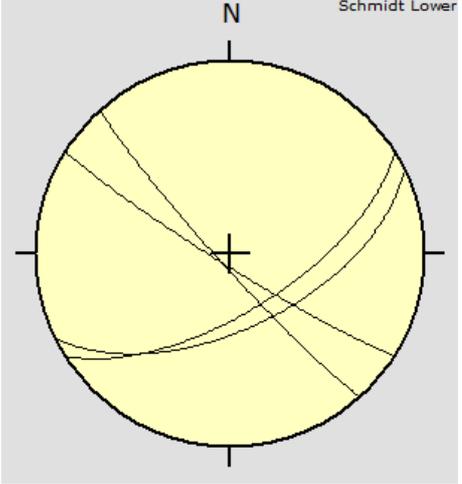
290/80



266/80

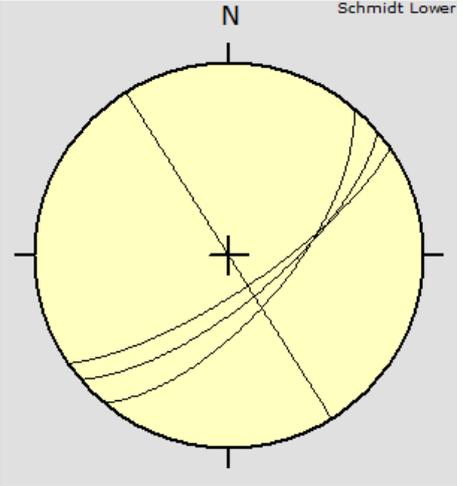


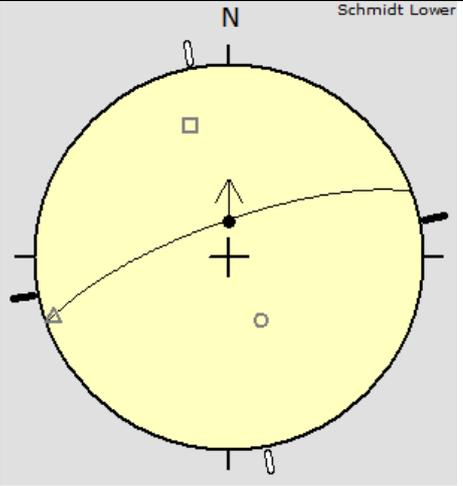
Harnische

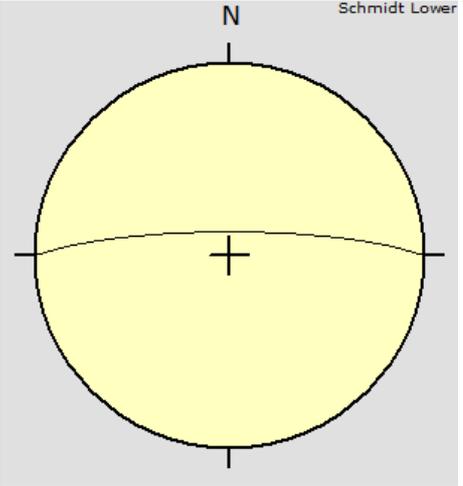


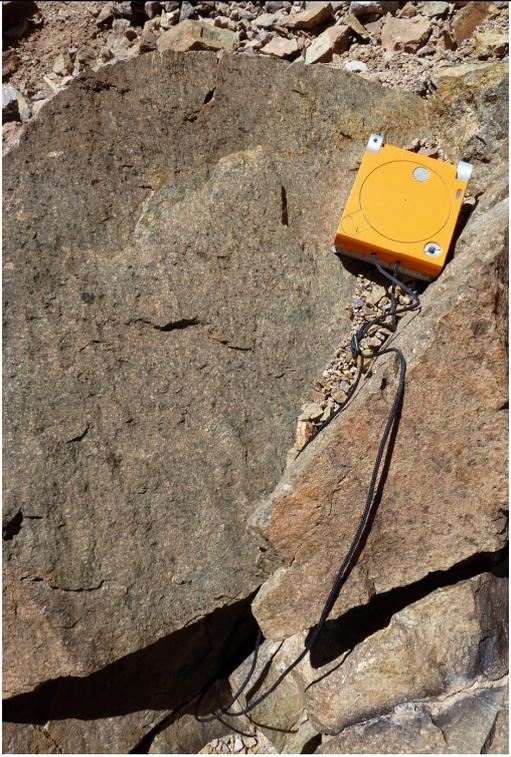
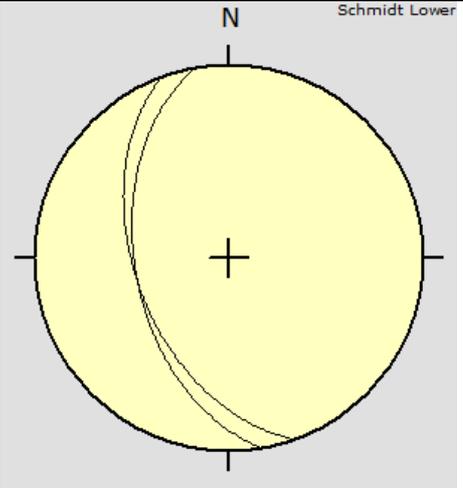
Klüfte

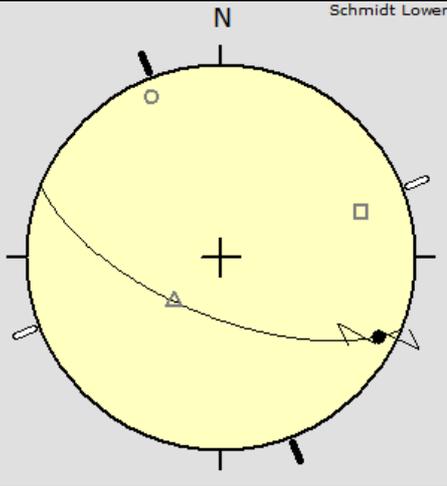
Höhe	4.221 m		
Koordinaten	422855	6651868	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
290/80	201/04	dextral	148/65
266/80	351/25	dextral	154/58
224/60	140/10	dextral	212/85
			228/85

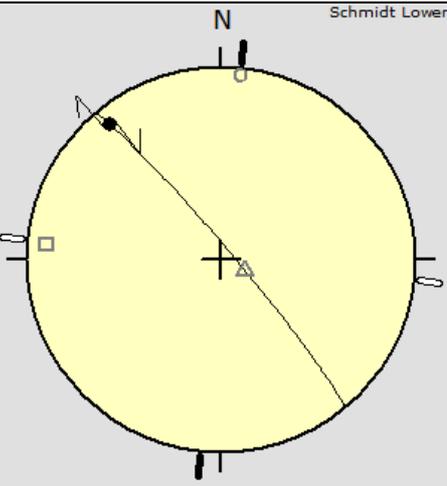
SSC014	05.04.2012		
			
Höhe	4.247 m		
Koordinaten	422895	6651883	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
			130/65
			146/75
			140/70
			238/90

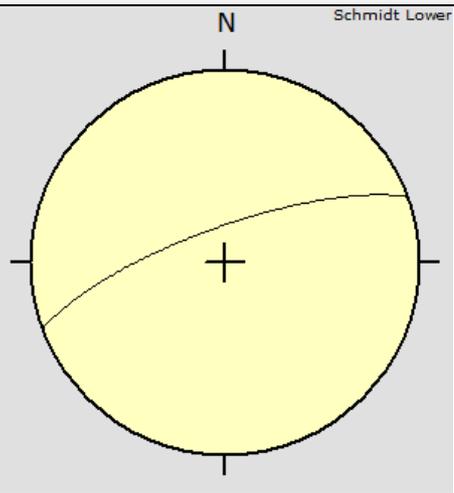
SSC015	05.04.2012		
			
Höhe	4.244 m		
Koordinaten	422843	6651904	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
340/75	360/75	Abschiebung	

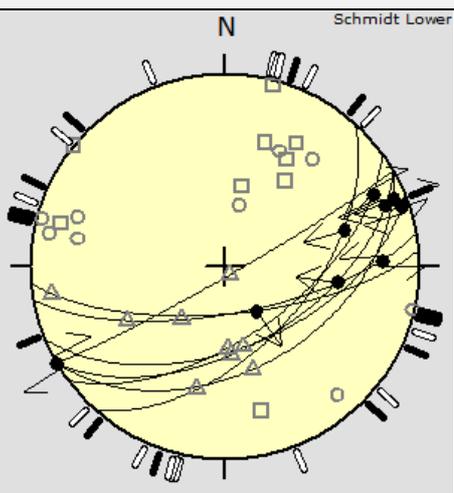
SSC016	06.04.2012		
			
Höhe	4.227 m		
Koordinaten	422251	6651462	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
			360/80

SSC017	06.04.2012		
			
250/50			
Höhe	4.261 m		
Koordinaten	422251	6651412	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
260/50	?	Abschiebung	
250/50	?	Abschiebung	

SSC018	06.04.2012		
 <p>202/65</p>			
Höhe	4.266 m		
Koordinaten	422194	6651392	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
202/65	117/10	dextral	

SSC019	06.04.2012		
			
Höhe	4.280 m		
Koordinaten	422182	6651373	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
050/85	324/10	dextral	

SSC020	06.04.2012		
			
Höhe	4.300 m		
Koordinaten	422064	6651322	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
340/75		dextral	

SSC021	16.04.2012		
			
Höhe	4.326 m		
Koordinaten	420776	6652684	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
132/55	073/36	Aufschiebung	
144/60	064/16	Aufschiebung	
150/45	068/07	Aufschiebung	
158/55	071/04	Aufschiebung	
150/55	069/13	Abschiebung	
150/86	240/00	dextral	
175/70	145/67	Abschiebung	
170/70	098/41	dextral	
170/70	088/20	Abschiebung	

SSC022	16.04.2012		
Höhe	4.327 m		
Koordinaten	420801	6652687	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
150/55	065/07	sinistral	
160/50	249/01	dextral	
145/85	155/85	Abschiebung	
165/85	165/85	Abschiebung	

SSC023	16.04.2012		
Höhe	4.333 m		
Koordinaten	420795	6652698	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
130/55	058/24	dextral	
130/60	043/05	dextral	
148/30	235/02	Abschiebung	
160/85	206/83	Abschiebung	
200/90	290/88	Abschiebung	

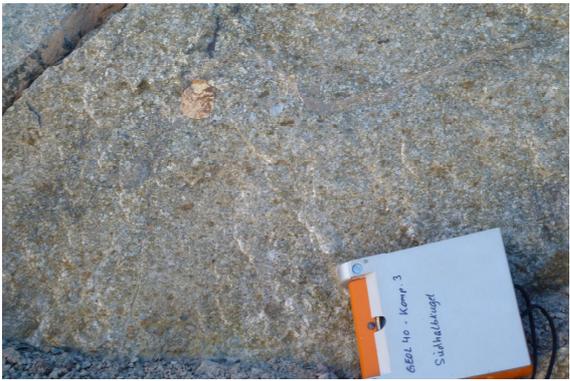
SSC024	16.04.2012		
Höhe	4.338 m		
Koordinaten	420804	6652716	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
190/60	223/56	Aufschiebung	
150/50	076/18	dextral	
190/80	195/80	Abschiebung	

SSC025	16.04.2012		
Höhe	4.343 m		
Koordinaten	421111	6652774	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
178/70	228/61	Aufschiebung	

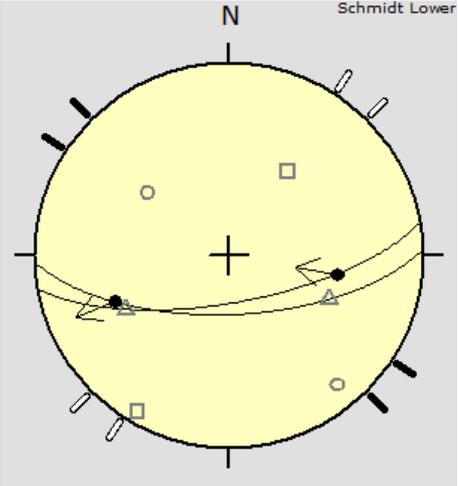
SSC026	16.04.2012		
--------	------------	--	--



170/70



178/65



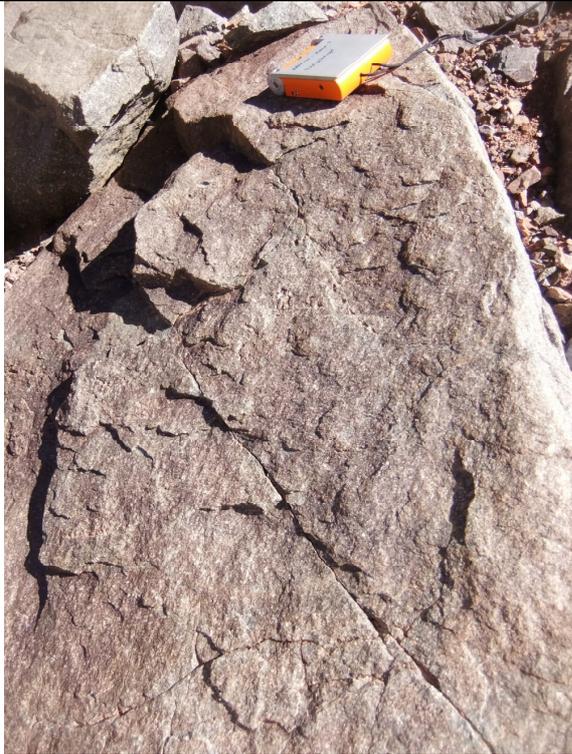
Höhe	4.349 m		
Koordinaten	421163	6652777	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
178/65	248/37	dextral	
170/70	100/43	Aufschiebung	

SSC027	16.04.2012		
Höhe	4.341 m		
Koordinaten	421158	6652764	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
200/60	272/28	sinistral	
180/90	270/88	Abschiebung	

SSC028	16.04.2012		
Höhe	4.341 m		
Koordinaten	421193	6652766	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
215/45	210/45	Aufschiebung	
180/85	254/70	Aufschiebung	

SSC029

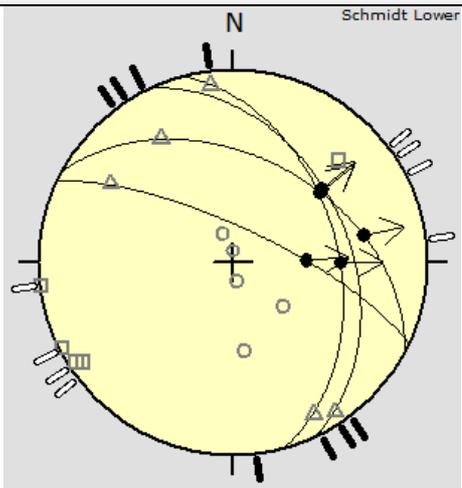
17.04.2012



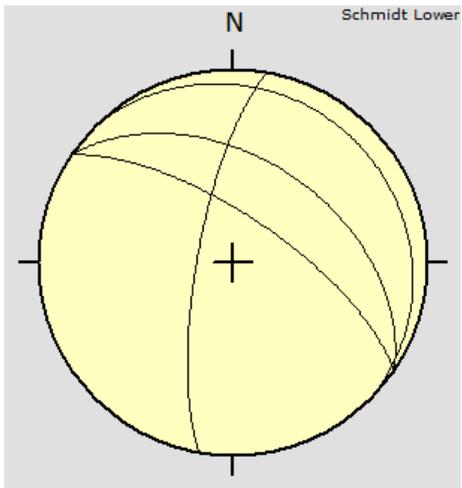
065/40



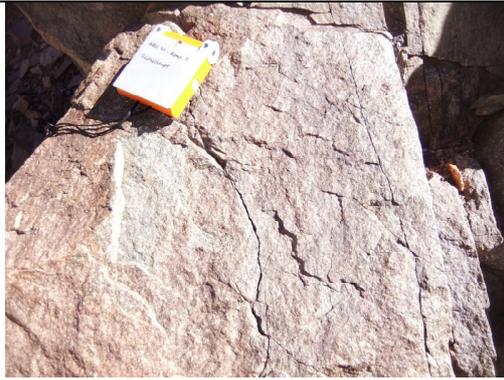
075/45



Harnische



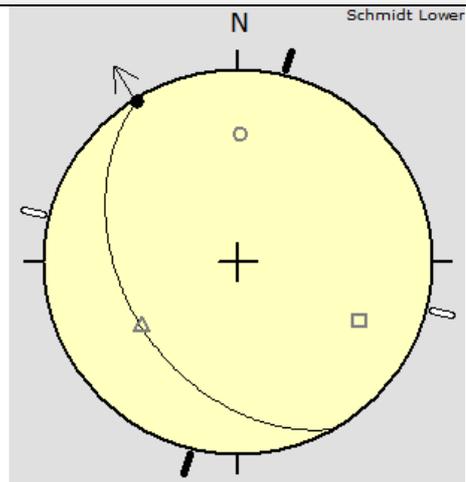
Klüfte



028/44

Höhe	4.438 m		
Koordinaten	419841	6652528	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
028/44	078/32	Abschiebung	280/75
075/45	090/44	Abschiebung	034/70
075/45	051/42	Abschiebung	034/45
025/75	088/59	Abschiebung	045/12
065/40	050/40	Abschiebung	

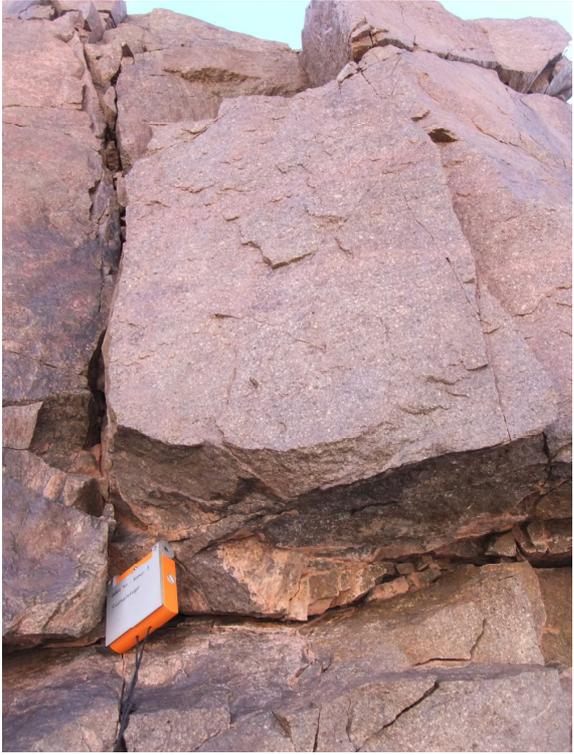
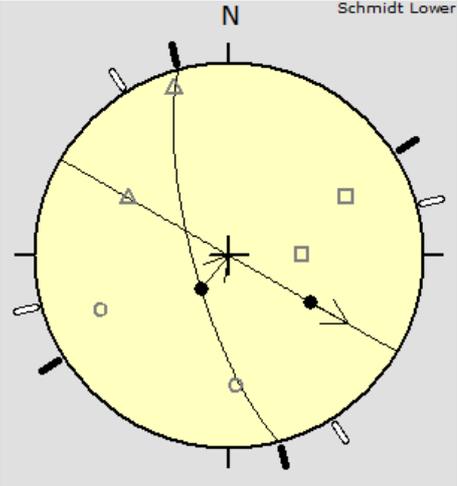
SSC030 17.04.2012



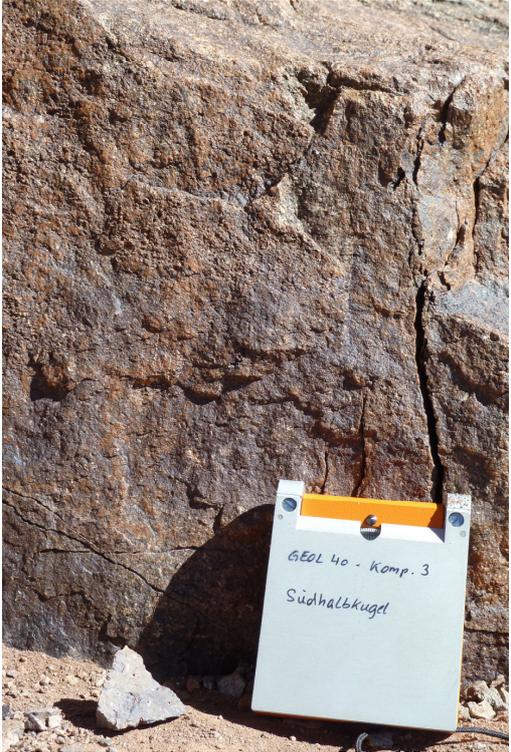
Höhe	4.449 m		
Koordinaten	419821	6652530	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
240/40	328/02	Abschiebung	

SSC031	17.04.2012		
Höhe	4.462 m		
Koordinaten	419801	6652543	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
050/35	090/20	Abschiebung	

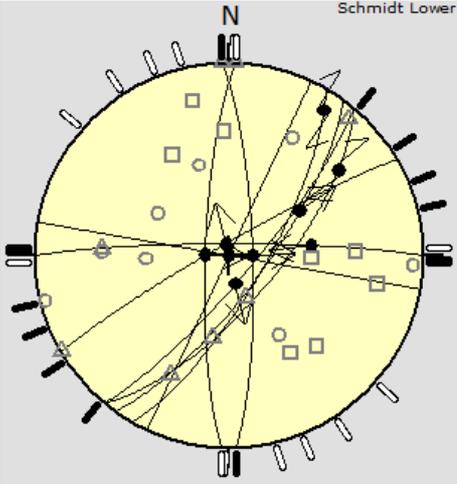
SSC032	17.04.2012		
115/25			
Höhe	4.464 m		
Koordinaten	419786	6652545	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
085/20	085/20	Abschiebung	045/10
115/25	090/25	Aufschiebung	330/80
025/85	090/40	Aufschiebung	
120/10	120/10	Aufschiebung	

SSC033		17.04.2012	
			
Höhe	4.460 m		
Koordinaten	419762	6652558	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
255/75	090/60	Aufschiebung	
030/90	130/50	Abschiebung	

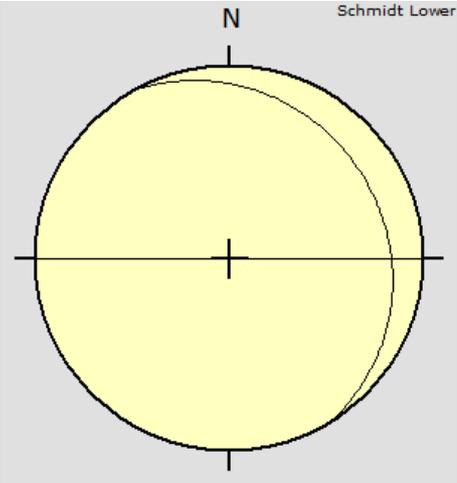
SSC034	18.04.2012		
--------	------------	--	--



130/80

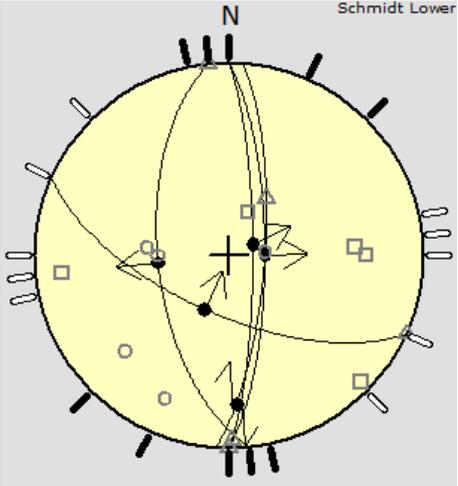
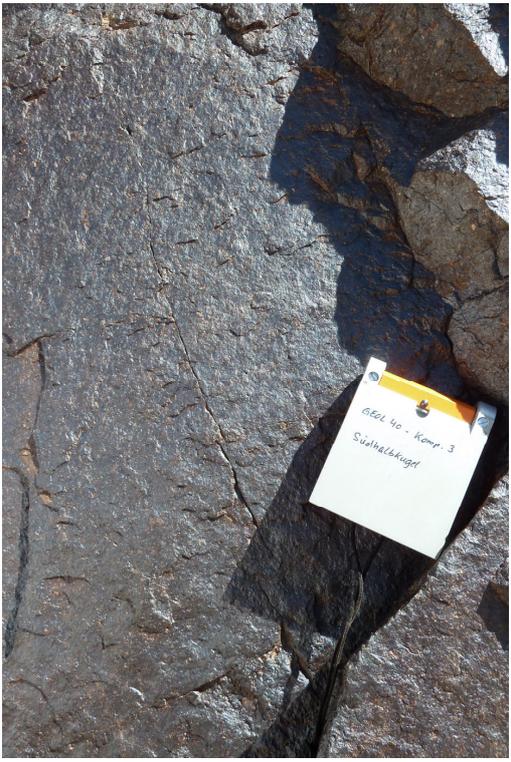


Harnische

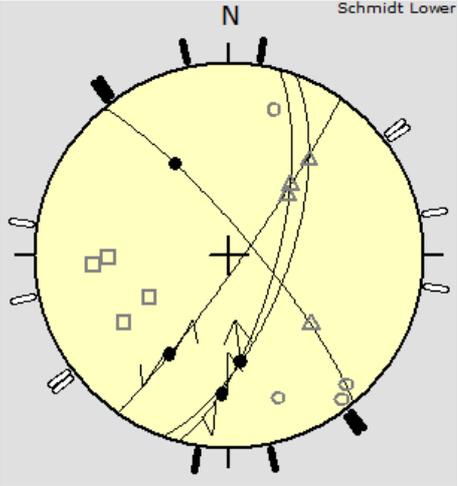


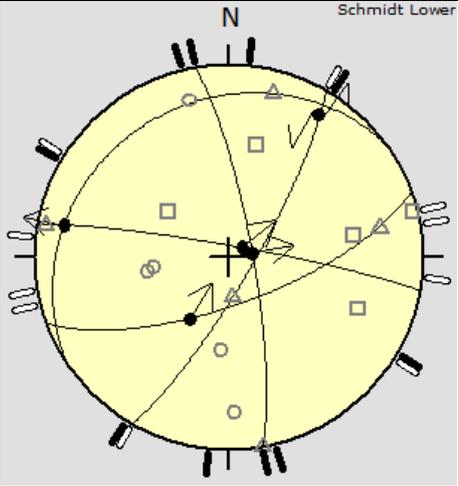
Klüfte

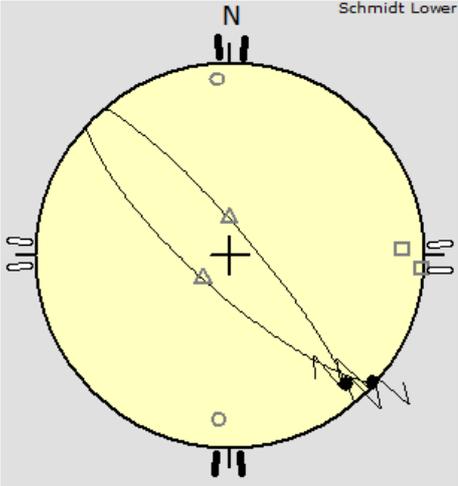
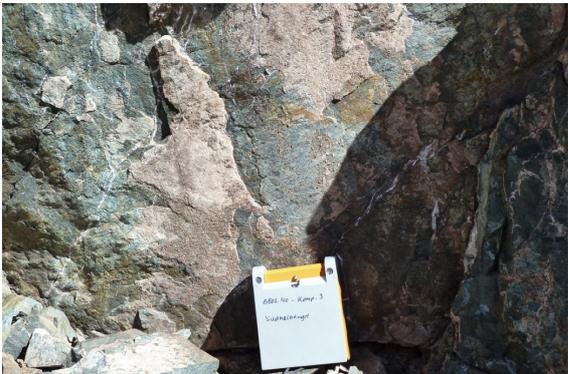
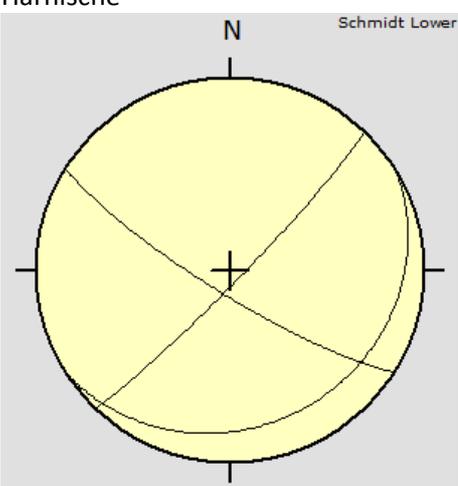
Höhe	4.448 m		
Koordinaten	419644	6652742	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
130/70	048/30	Dextral	060/20
130/80	160/75	Abschiebung	000/90
120/75	036/10	Dextral	
126/75	068/50	Abschiebung	
330/85	134/85	Abschiebung	
088/80 ?	090/85	Abschiebung	
272/80	272/80	Aufschiebung	
115/90	120/90	90°	
000/85	80/55	Aufschiebung	
010/90	090/90	90°	

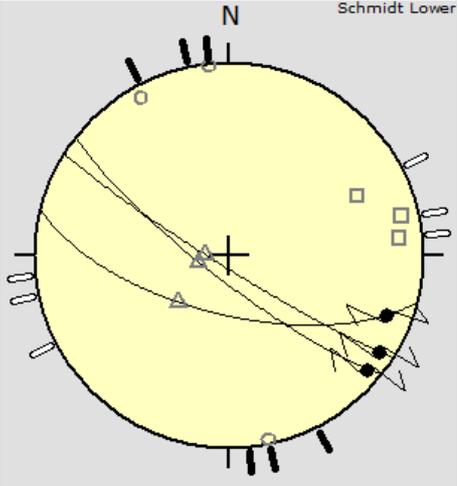
SSC035		18.04.2012	
 <p>264/60</p>			
 <p>090/75</p>			

Höhe	4.477 m		
Koordinaten	419588	6652799	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
090/80	072/75	Abschiebung	
090/75	088/80	Abschiebung	
094/75	164/20	Dextral	
264/60	264/60	Abschiebung	
204/65	204/65	Aufschiebung	

SSC036	18.04.2012		
			
Höhe	4.474 m		
Koordinaten	419610	6652747	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
050/80	345/40	Aufschiebung	
125/85	215/40	Sinistral	
110/65	190/50	Aufschiebung	
105/70	185/30	sinistral	

SSC037	18.04.2012		
			
Höhe	4.477 m		
Koordinaten	419588	6652802	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
325/20	275/35	Abschiebung	
010/85	075/85	Abschiebung	
080/80	080/80	Abschiebung	
120/80	050/10	Sinistral	
160/70	230/65	Aufschiebung	

SSC038		18.04.2012	
 <p>222/75</p>		 <p>Schmidt Lower</p>	
 <p>050/80</p>		 <p>Schmidt Lower</p> <p>Harnische</p>	
		Klüfte	
Höhe	4.476 m		
Koordinaten	419552	6652847	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
222/75	138/00	dextral	212/80
050/80	130/10	dextral	134/85
			148/20

SSC039		18.04.2012	
 <p>180/55</p>			
 <p>192/65</p>			
Höhe	4.501 m		
Koordinaten	419521	6652907	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
194/65	098/20	Dextral	
212/85	114/10	Dextral	
218/80	130/08	Dextral	
248/55	110/10	Sinistral	
192/65	112/25		
158/60	090/15	Dextral	
180/55	090/05	Dextral	

SSC040

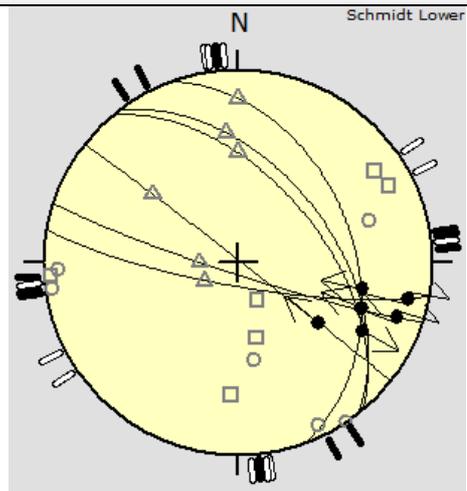
18.04.2012



050/55



198/85





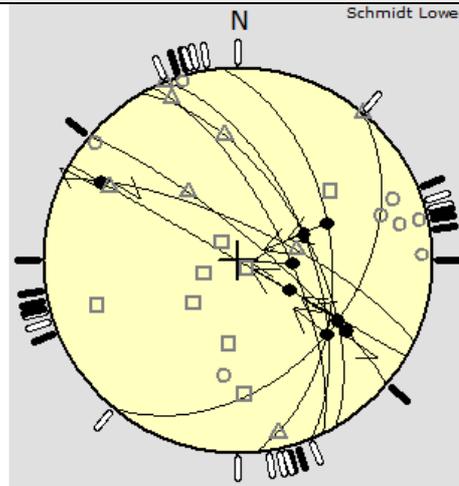
038/89

Höhe	4.475 m		
Koordinaten	419506	6652913	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
070/40	100/30	Abschiebung	
052/50	112/35	Abschiebung	
038/89	110/45	Abschiebung	
198/85	114/15	Dextral	
190/80	112/10	Dextral	
050/55	122/30	Dextral	

SSC041 18.04.2012



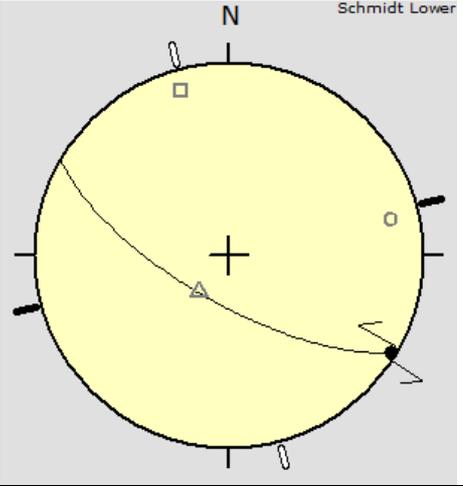
210/90





068/60

Höhe	4.477 m		
Koordinaten	419459	6652959	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
040/80	123/34	Abschiebung	
064/70	093/67	Abschiebung	
068/60	068/60	Abschiebung	
210/90	120/65	Abschiebung	
060/60	121/40	Abschiebung	
085/50	067/49	Abschiebung	
025/75	300/20	Dextral	
130/40	130/40	Aufschiebung	

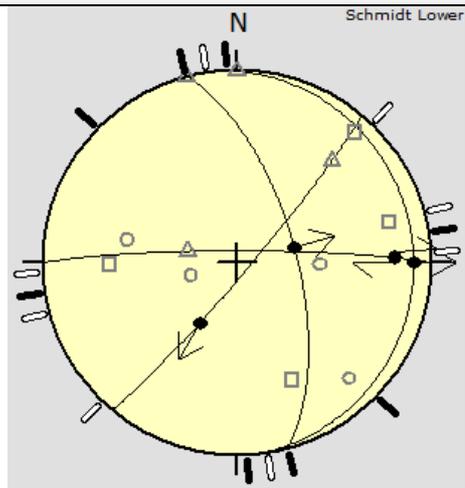
SSC042	18.04.2012		
			
Höhe	4.478 m		
Koordinaten	419443	6653015	
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
210/70	121/03	Sinistral	

SSC043

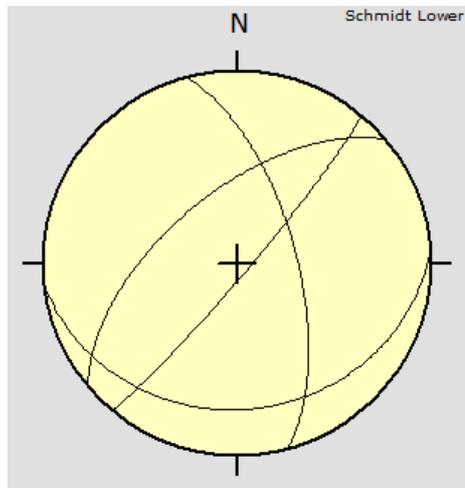
18.04.2012



000/85

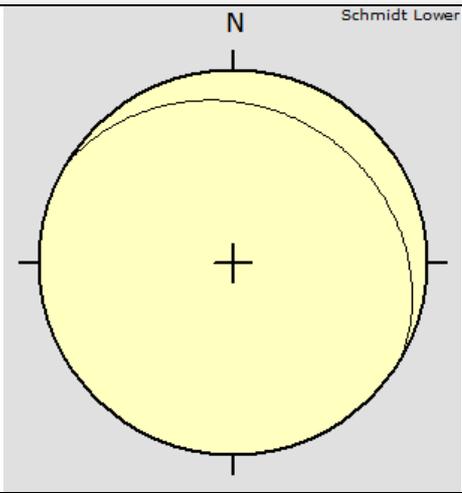


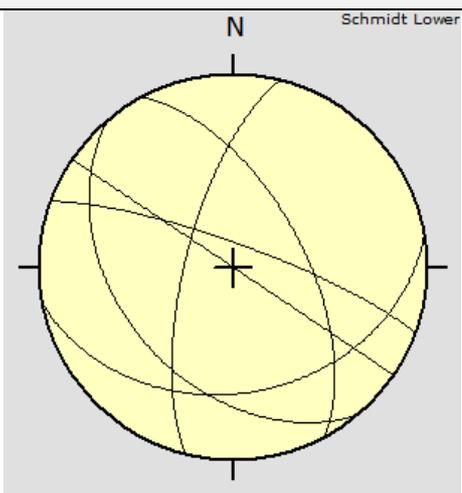
Harnische

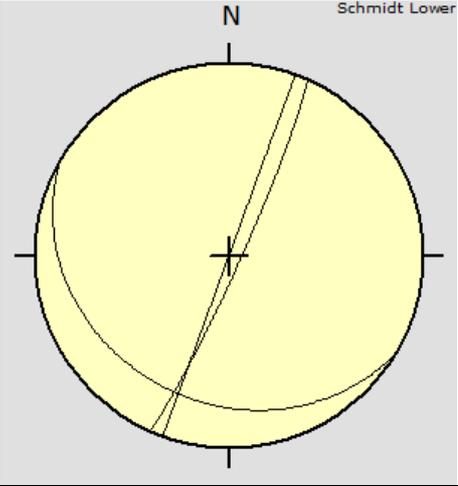


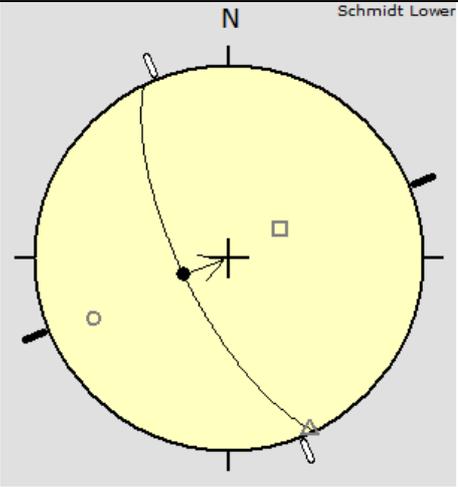
Klüfte

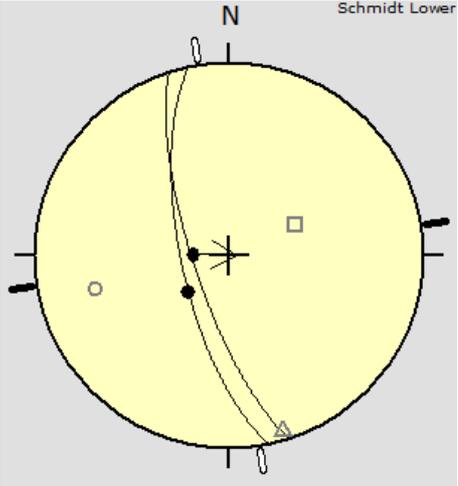
Höhe	4.483 m		
Koordinaten	419526	6652902	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
085/10	090/10	Abschiebung	075/65
075/65	075/65	Abschiebung	320/60
000/85	088/20	Dextral	130/85
130/85	211/60	Abschiebung	175/25

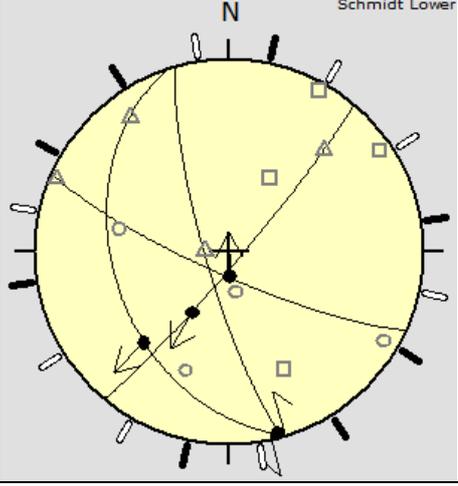
SSC044	18.04.2011		
			
Höhe	4.438 m		
Koordinaten	419569	6652914	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
			030/20

SSC045	20.04.2012		
			
Höhe	4.624 m		
Koordinaten	418776	6653872	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
			062/60
			230/40
			034/90
			284/70
			170/35
			020/80

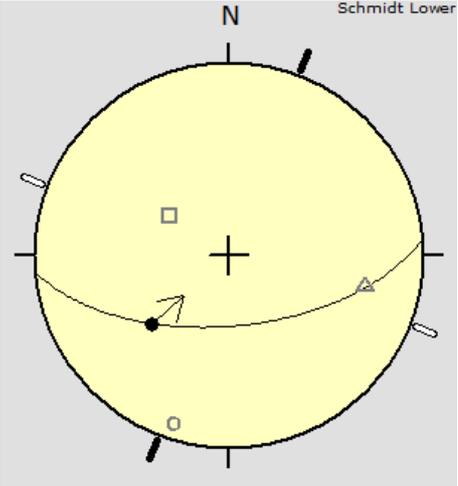
SSC046	20.04.2012		
			
Höhe	4.637 m		
Koordinaten	418820	6653858	
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
			110/90
			210/25
			114/85

SSC047	20.04.2012		
			
Höhe	4.643 m		
Koordinaten	418836	6653878	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
244/70	251/70	Aufschiebung	

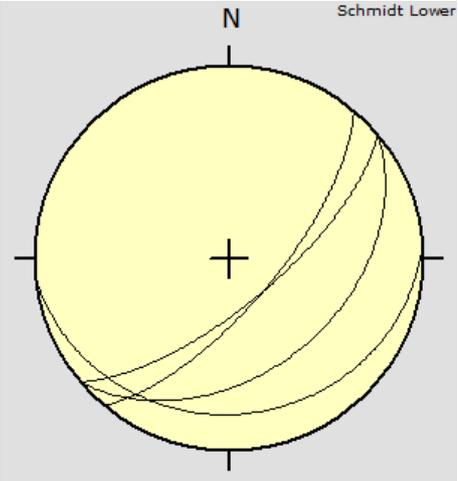
SSC048	20.04.2012		
			
258/70			
Höhe	4.604 m		
Koordinaten	418892	6653827	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
252/75	272/75	Aufschiebung	
258/70	229/67		

SSC049	20.04.2012		
			
130/85			
Höhe	4.562 m		
Koordinaten	419279	6653801	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
204/80	178/80	Aufschiebung	
254/80	165/03	Sinistral	
252/40	223/36	Abschiebung	
130/85	211/60	Abschiebung	

SSC050	20.04.2012		
--------	------------	--	--



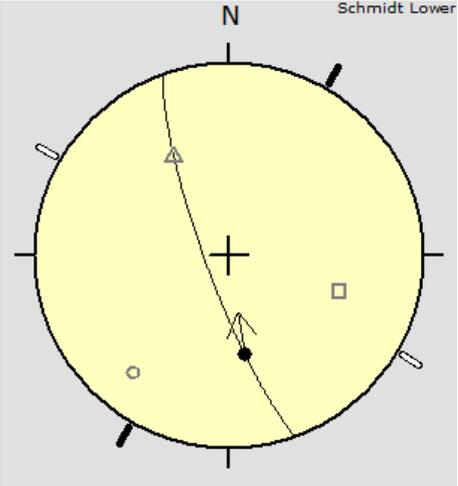
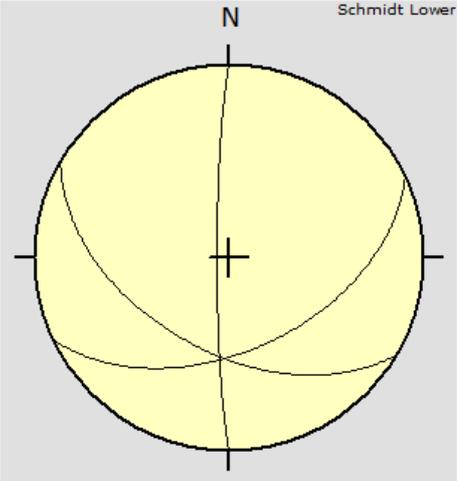
Harnisch

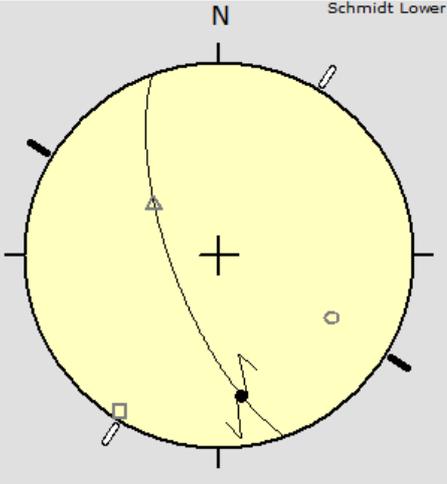


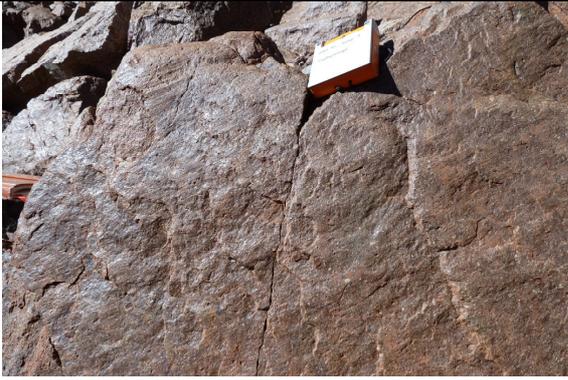
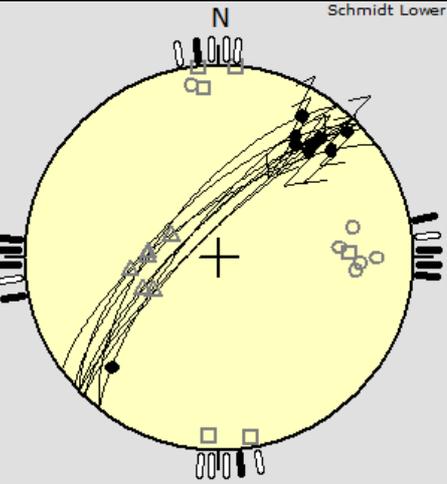
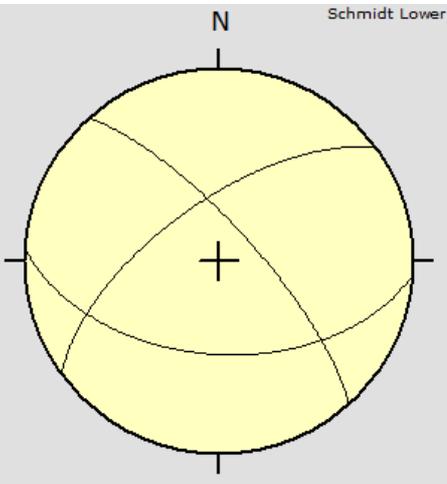
Klüfte

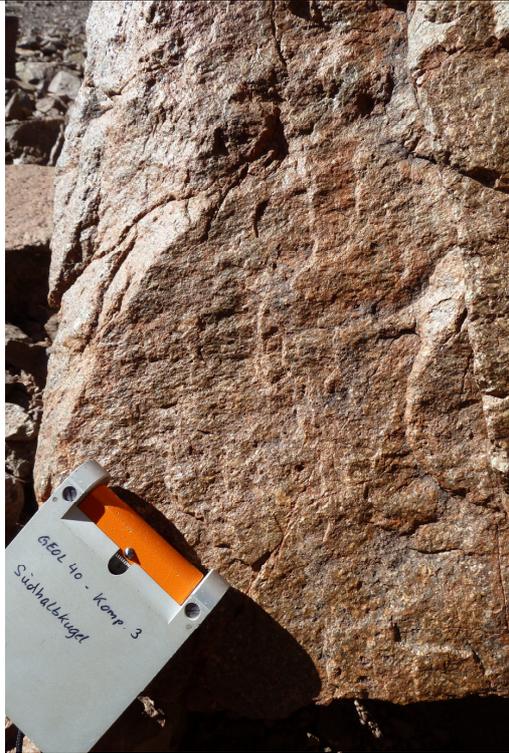
Höhe	4.640 m		
Koordinaten	418836	6653874	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
175/60	228/46	Aufschiebung	130/70
			140/70
			175/20
			140/40

SSC051	20.04.2012		
			<p>Schmidt Lower</p>
Höhe	4.613 m		
Koordinaten	418865	6653838	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
200/60	176/58	Aufschiebung	

SSC052		20.04.2012			
		 <p>Schmidt Lower</p> <p>Harnisch</p>			
		 <p>Schmidt Lower</p> <p>Klüfte</p>			
		Höhe	4.577 m		
		Koordinaten	419277	6653832	UTM 19J
		Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
250/80	171/47	Aufschiebung	155/50		
			270/85		
			210/50		

SSC053	20.04.2012		
			
Höhe	4.540 m		
Koordinaten	419459	6653680	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
250/70	171/27	Sinistral	

SSC054	21.04.2012		
			
316/65			
			
		Klüfte	

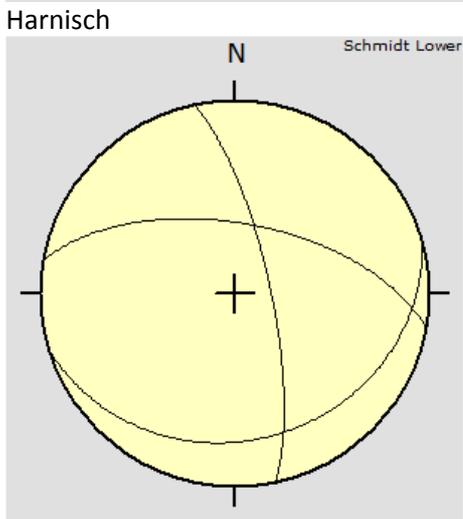
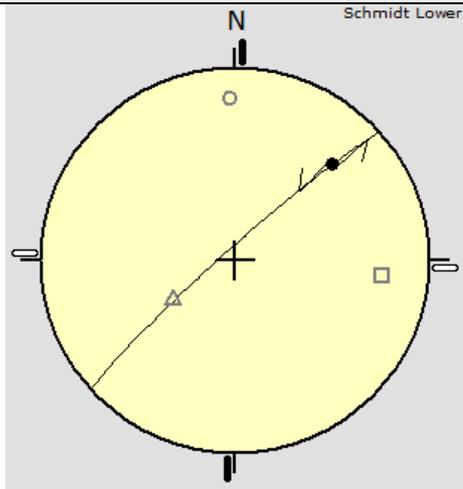


324/70

Höhe	4.516 m		
Koordinaten	419526	6651473	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
324/70	046/21	Dextral	324/65
318/70	045/08	Dextral	048/75
308/75	224/22		184/50
316/75	040/20		
314/80	039/25		
316/65	032/27	Dextral	
308/65	030/16	Dextral	
314/75	034/30	Sinistral	
316/80	040/29	Dextral	

SSC055	21.04.2012		
Höhe	4.548 m		
Koordinaten	419635	6651498	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
160/80	160/80		
312/75	312/75	Aufschiebung	
015/60	344/56	Abschiebung	

SSC056	21.04.2012		
--------	------------	--	--

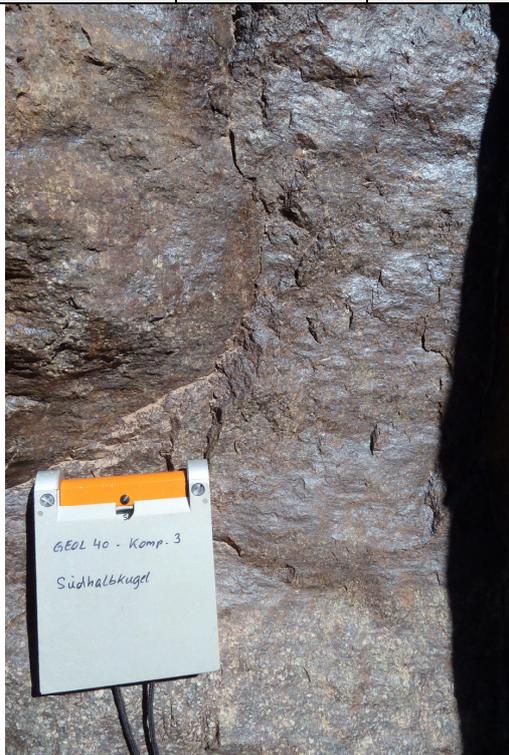


Klüfte

Höhe	4.539 m		
Koordinaten	419726	6651699	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
318/85	045/30	Sinistral	078/75
			010/60
			164/25

SSC057

21.04.2012



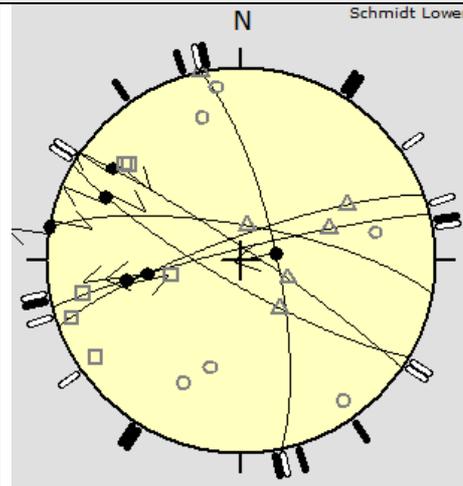
010/75



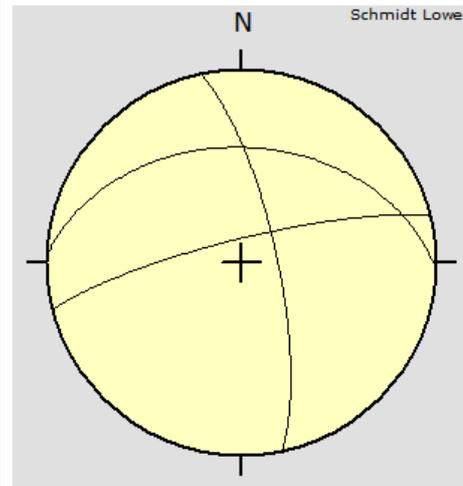
346/85



034/85



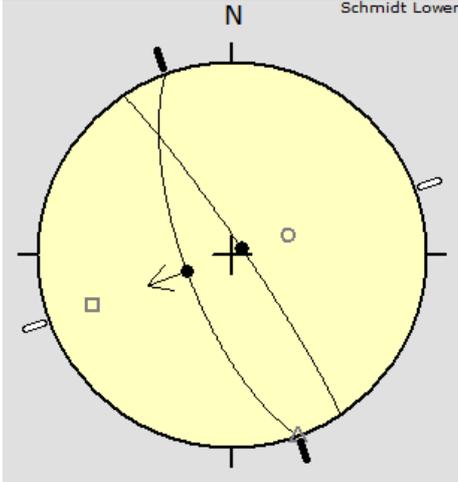
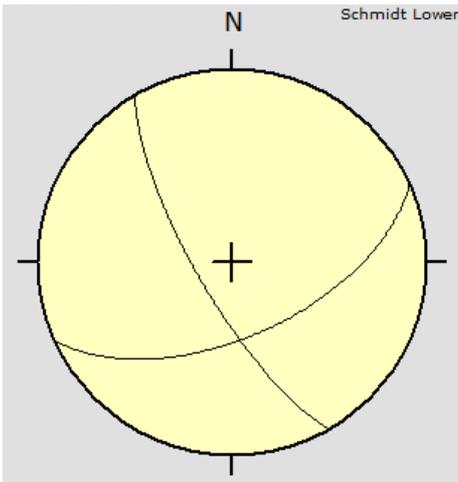
Harnische



Klüfte

Höhe	4.526 m		
Koordinaten	419802	6651793	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
078/75	078/75	Aufschiebung	078/75
010/75	280/00	Dextral	346/80

340/80	262/50	Sinistral	002/40
346/85	260/40	Sinistral	
034/85	306/20	Dextral	
210/80	295/24	Dextral	

SSC058	21.04.2012		
		 <p>Schmidt Lower</p> <p>Harnische</p>  <p>Schmidt Lower</p> <p>Klüfte</p>	
Höhe	4.487 m		
Koordinaten	420031	6652047	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
056/85	056/85		240/75
250/70	250/70	Abschiebung	156/58

SSC059

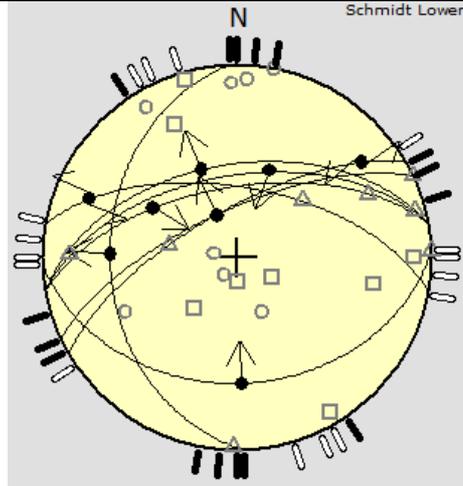
21.04.2012



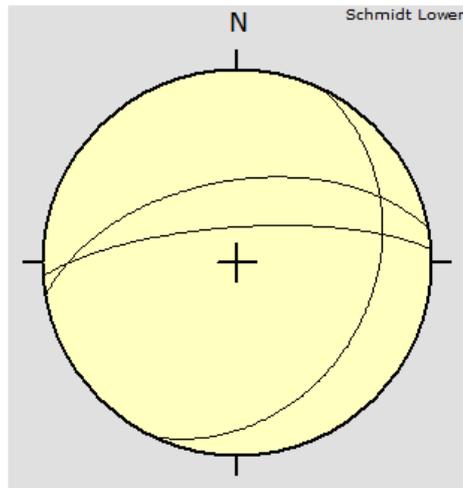
010/60



350/50



Harnische

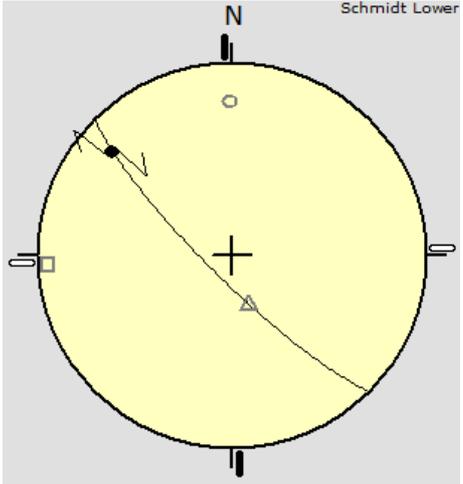


Klüfte



268/35

Höhe	4.556		
Koordinaten	419534	6651406	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
350/60	301/48	Aufschiebung	116/30
010/60	292/19	Sinistral	350/55
330/70	052/20	Sinistral	356/75
350/50	338/49	Abschiebung	
335/70	335/70	Abschiebung	
268/35	272/35	Abschiebung	
350/55	020/50	Aufschiebung	
178/35	178/35	Aufschiebung	

SSC060	21.04.2012		
			
Höhe	4.549 m		
Koordinaten	419770	6651685	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
225/80	311/19	Dextral	

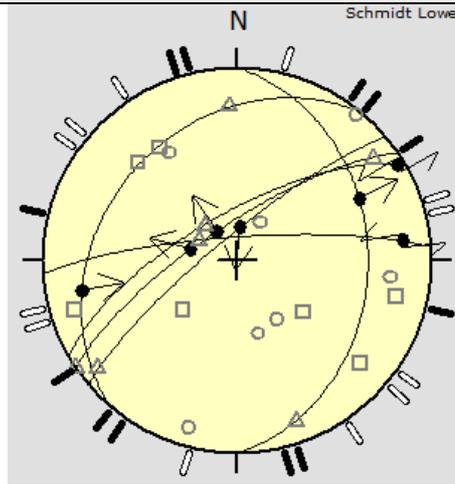
SSC061	21.04.2012		
--------	------------	--	--



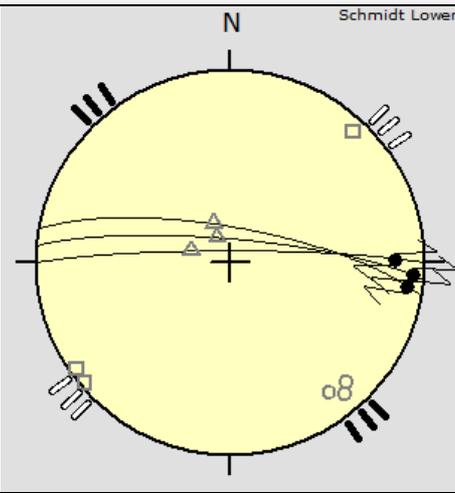
356/80

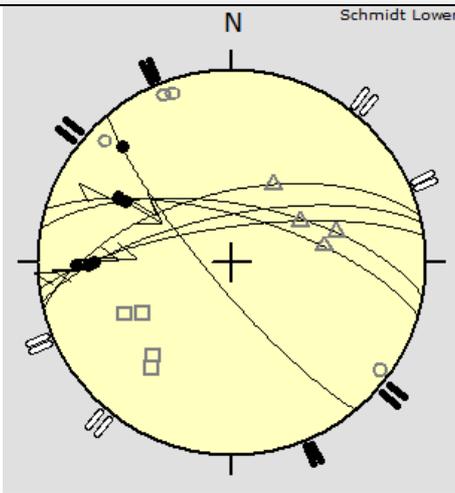
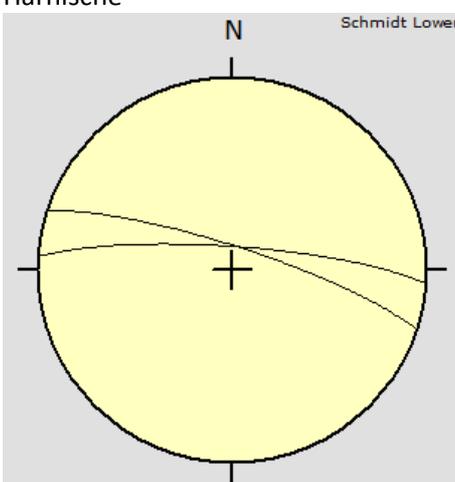


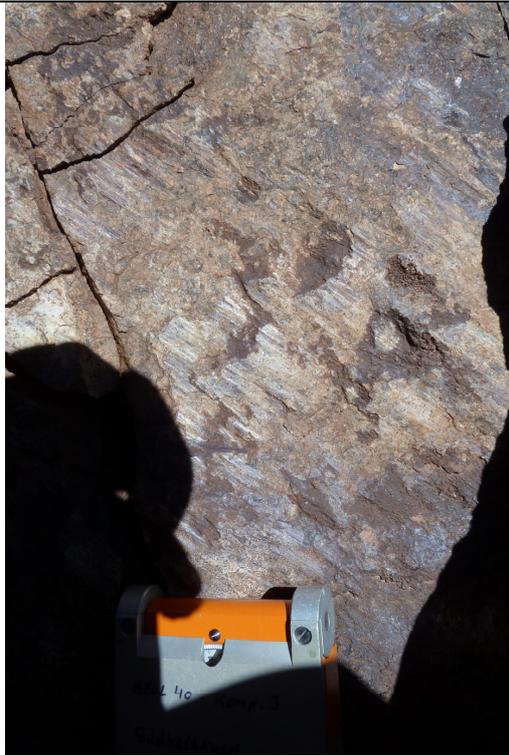
310/30



Höhe	4.531 m		
Koordinaten	419787	6651775	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
090/33	063/30	Sinistral	
320/80	005/76	Sinistral	
330/70	059/04	Sinistral	
356/80	083/15	Sinistral	
326/75	326/75	Abschiebung	
326/75	284/70	Abschiebung	
310/30	259/20	Abschiebung	

SSC062	21.04.2012		
			
Höhe	4.628 m		
Koordinaten	419810	6651788	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
005/80	094/06	Dextral	
010/75	098/09	Dextral	
000/85	089/16	Dextral	

SSC063	21.04.2012		
			
346/60	<p>Harnische</p> 		



352/70

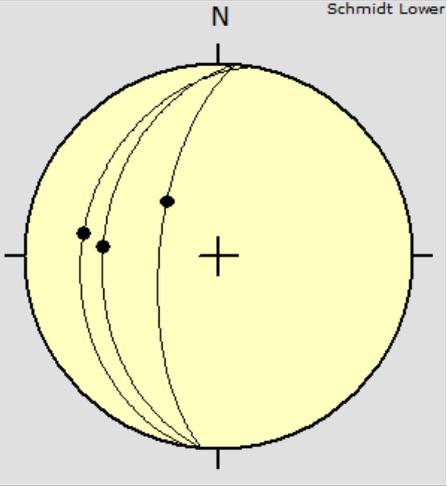


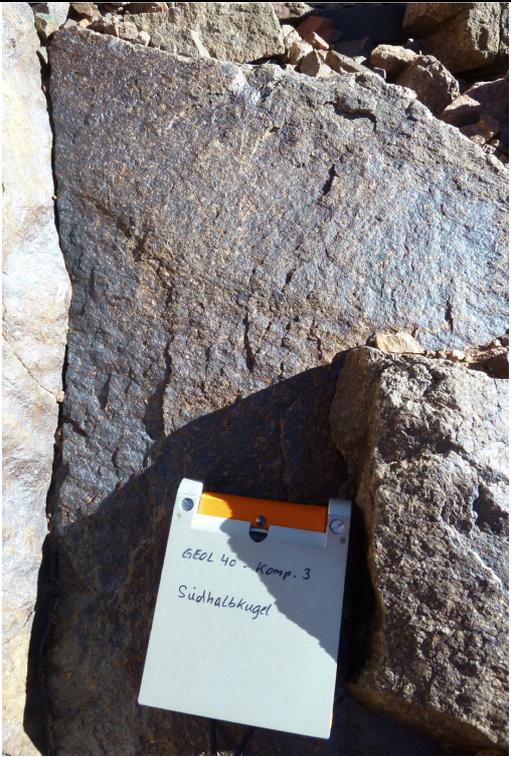
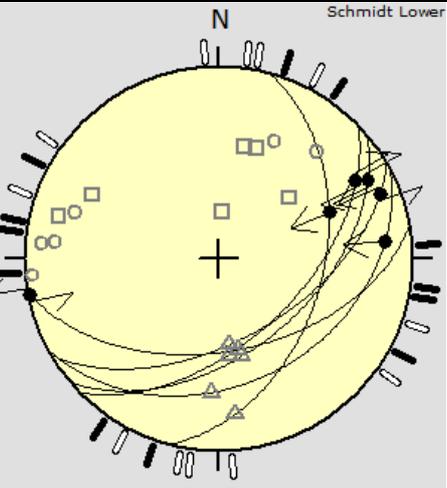
010/65

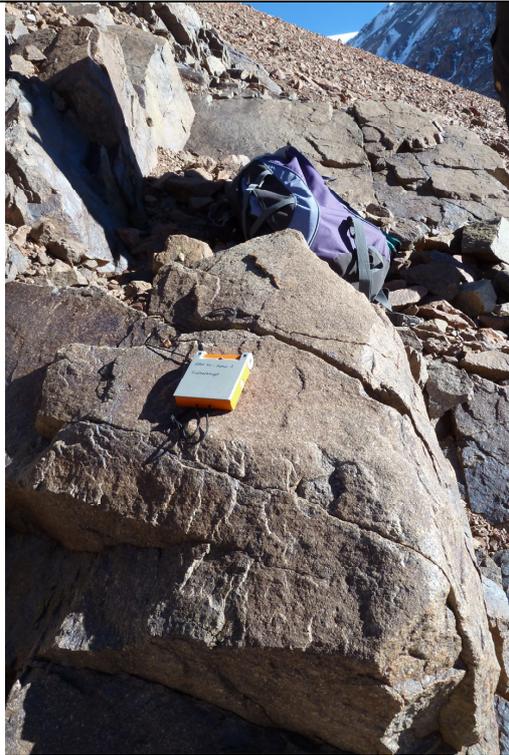
Klüfte

Höhe	4.524 m		
Koordinaten	419890	6651827	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
016/70	300/33	Dextral	004/80
346/60	269/21	Dextral	018/80
352/75	270/30	Dextral	
348/70	269/27		

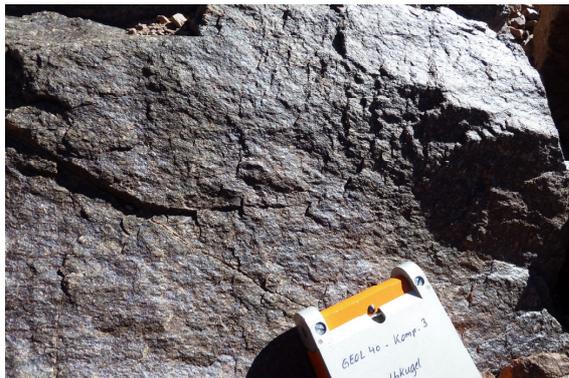
230/80	317/19		
010/65	300/37	Dextral	

SSC064	21.04.2012		
			
275/65			
Höhe	4.467 m		
Koordinaten	420024	6652111	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
280/30	280/30		
275/40	275/40		
275/65	317/58		

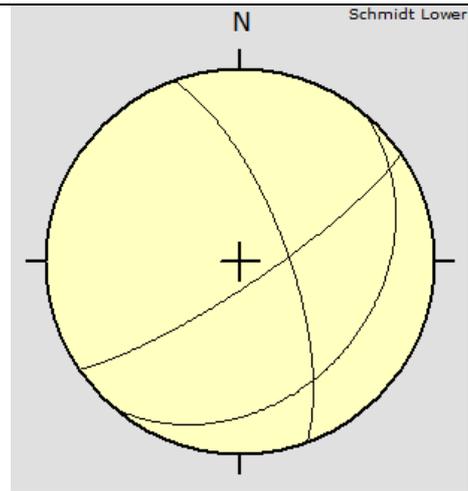
SSC065	22.04.2012		
			
105/45		Harnische	



170/50



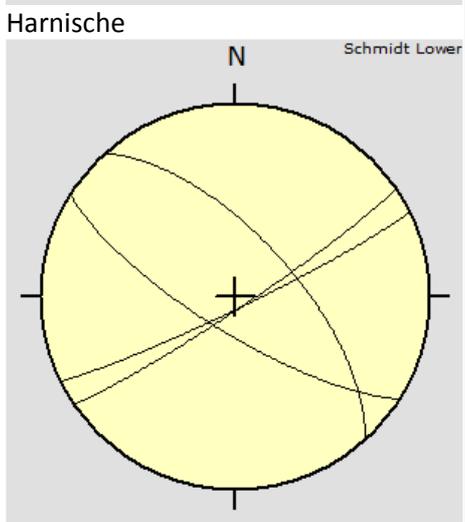
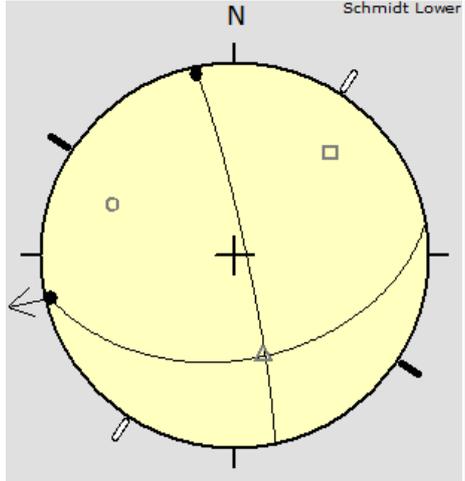
136/55



Klüfte

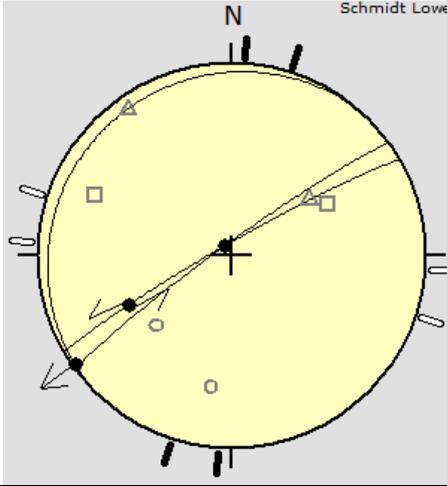
Höhe	4.321 m		
Koordinaten	419906	6652467	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
152/35	084/15	Aufschiebung	146/80
140/50	062/14	Dextral	070/70
105/45	067/38	Aufschiebung	130/30
170/50	259/01	Sinistral	
150/55	068/11	Sinistral	
136/55	060/20	Dextral	

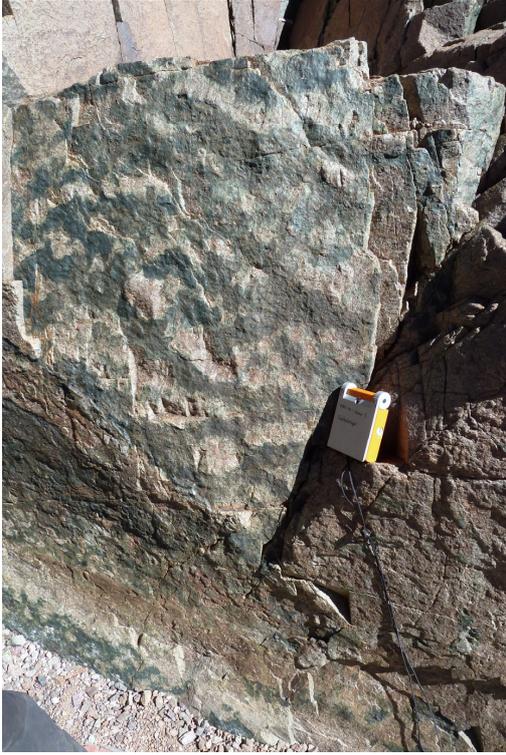
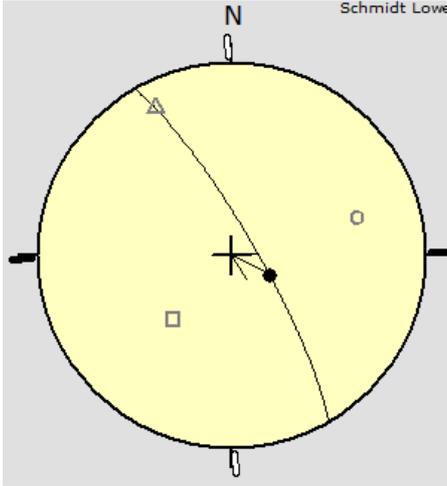
SSC066	22.04.2012		
--------	------------	--	--

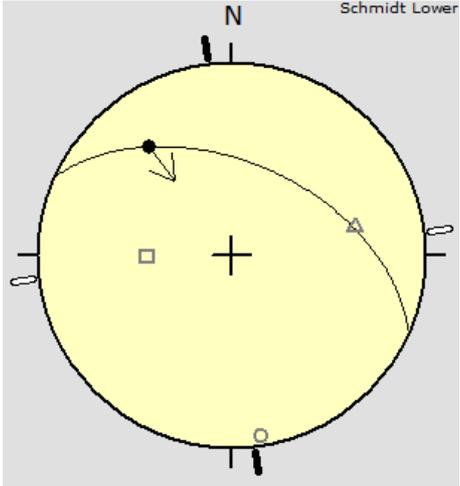
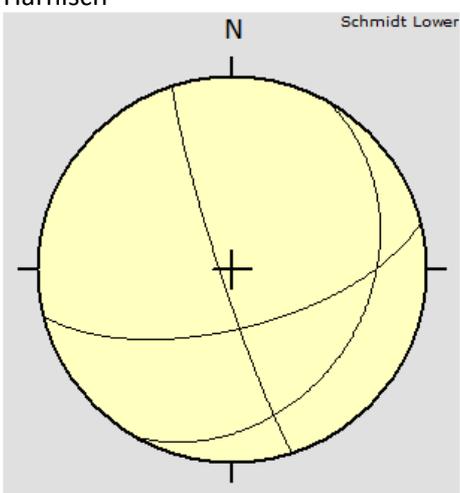


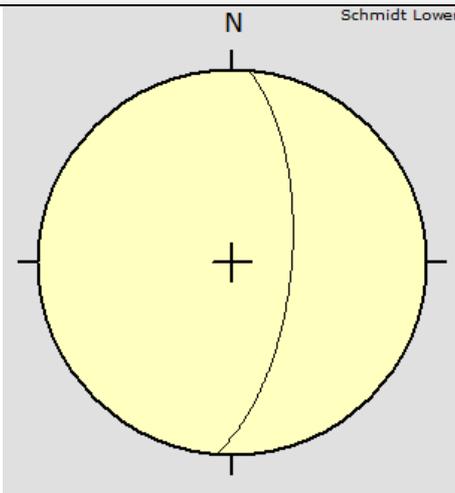
Klüfte

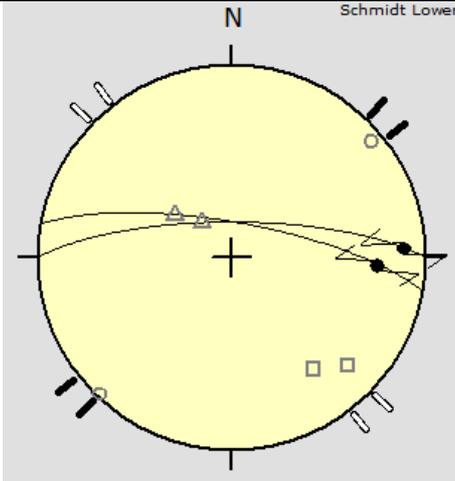
Höhe	4.478 m		
Koordinaten	419759	665247	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
170/45	257/03	Abschiebung	212/75
078/85	348/04		146/85
			154/85
			048/65

SSC067		22.04.2012	
			
330/85			
Höhe	4.448 m		
Koordinaten	420067	6652137	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
330/85	244/41	Sinistral	
312/08	235/02	Sinistral	
324/85	324/85		

SSC068		22.04.2012	
			
Höhe	4.559 m		
Koordinaten	419305	6651108	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
060/80	117/72	Aufschiebung	

SSC069		22.04.2012	
 <p>024/50</p>		 <p>Harnisch</p>  <p>Klüfte</p>	
Höhe	4.631 m		
Koordinaten	419109	6651371	UTM 19J
Harnisch	Lination	Bewegungssinn	Klüfte
024/50	323/30	Aufschiebung	166/65
			252/85
			120/30

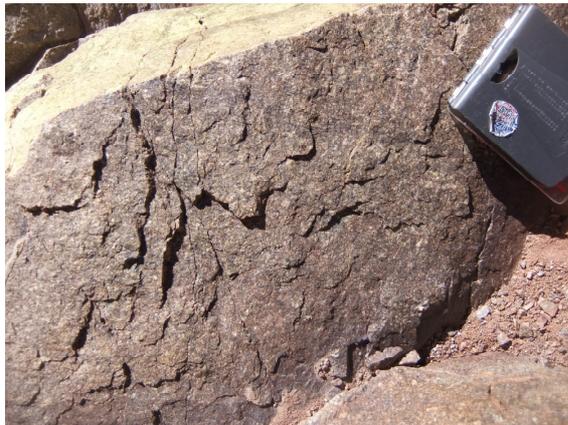
SSC070	22.04.2012		
			 <p style="text-align: right; font-size: small;">Schmidt Lower</p>
			Kluft
Höhe	4.623 m		
Koordinaten	419125	6651416	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
			095/65

SSC071	22.04.2012		
			 <p style="text-align: right; font-size: small;">Schmidt Lower</p>
360/75			
Höhe	4.630 m		
Koordinaten	419114	6651431	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
360/75	087/12	Sinistral	
010/75	093/26	Sinistral	

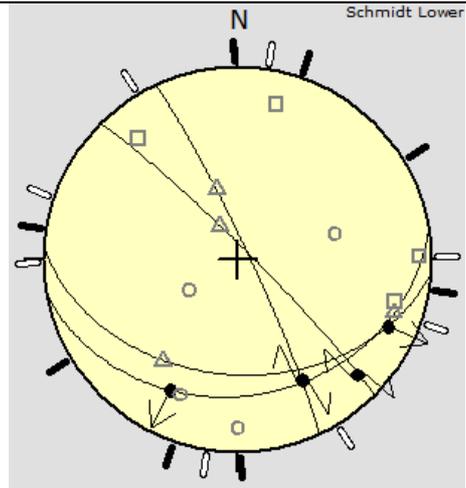
SSC072	22.04.2012		
--------	------------	--	--



184/40



170/30



Höhe	4.484 m		
Koordinaten	419749	6652448	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
045/85	134/15	Dextral	
065/85	152/30	Dextral	
170/30	207/25	Abschiebung	
184/40	114/16	Abschiebung	

SSC073

22.04.2012



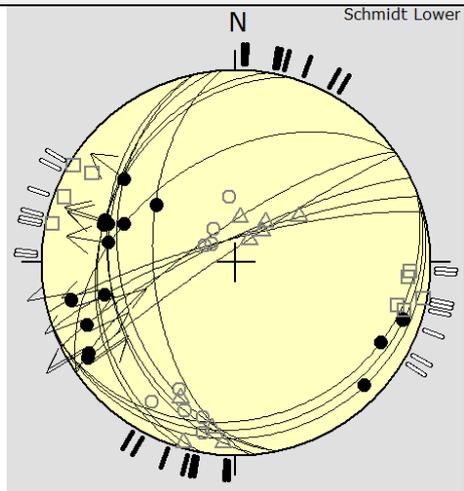
325/45



250/15



286/30





280/30



266/55



258/35

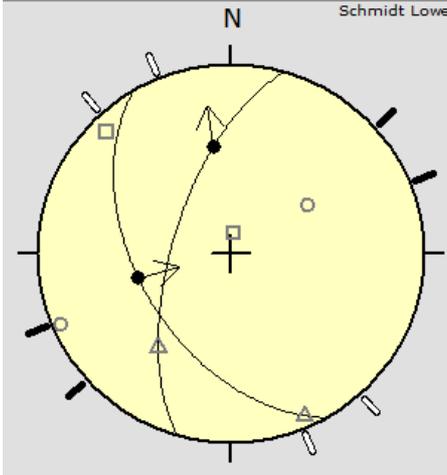


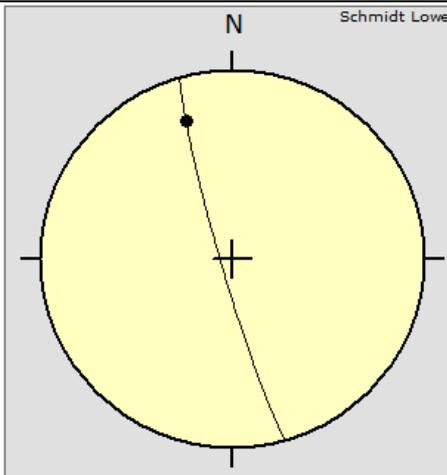
160/15

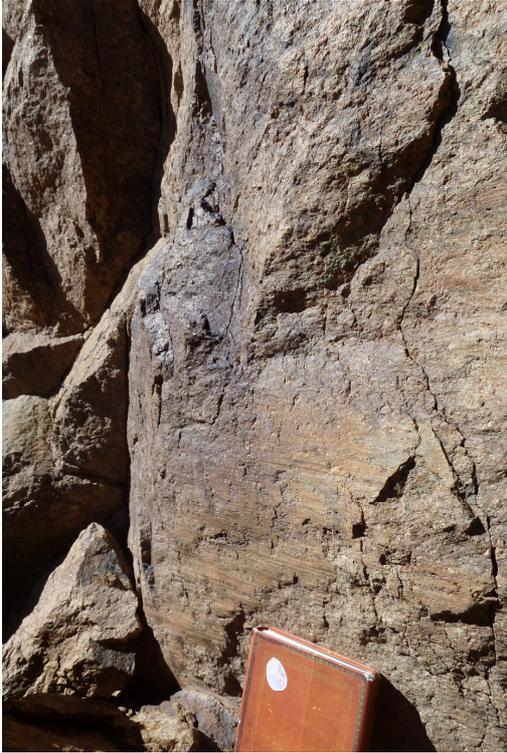
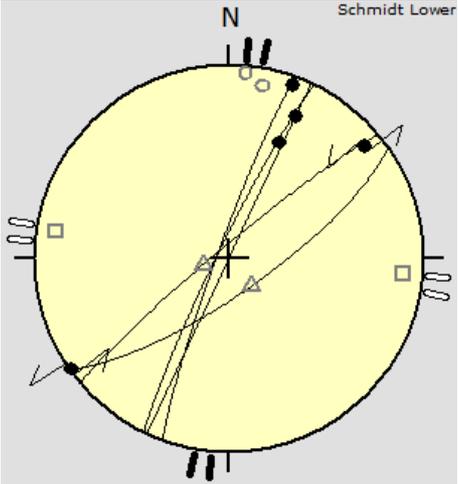
Höhe	4.462 m		
Koordinaten	420080	6652999	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
340/80	256/31	Sinistral	
325/75	238/12	Sinistral	
345/80	257/14	Sinistral	
326/85	237/10	Sinistral	
158/20	119/16		
325/45	289/39		
286/30	286/30		
334/80	247/18	Sinistral	
280/30	288/30	Abschiebung	
258/40	307/29	Abschiebung	
266/55	306/48		
264/35	279/34	Abschiebung	
162/10	134/09		
258/35	287/32	Abschiebung	
160/15	109/10		

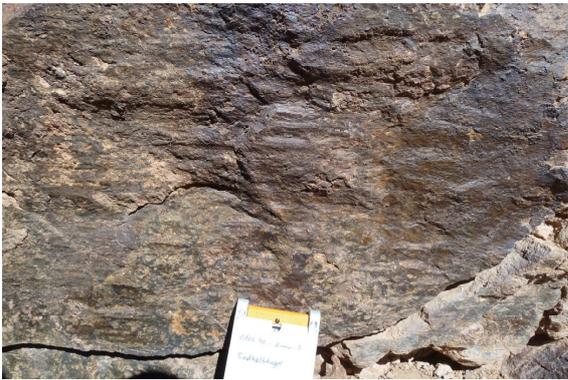
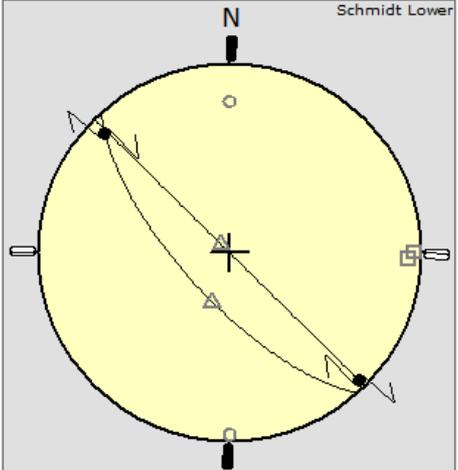
SSC074	22.04.2012		
Höhe	4.633 m		
Koordinaten	419109	6651336	UTM 19J
Harnisch	Lination	Bewegungssinn	Klüfte
060/40	137/11	Abschiebung	

SSC075	22.04.2012		
Höhe	4.622 m		
Koordinaten	419127	6651396	UTM 19J
Harnisch	Lination	Bewegungssinn	Klüfte
015/50	088/19		

SSC076		23.04.2012	
			
240/50			
Höhe	4.434 m		
Koordinaten	420175	6653092	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
240/50	255/49	Aufschiebung	
268/65?	351/42	Abschiebung	

SSC077		23.04.2012	
			
Höhe	4.171 m		
Koordinaten	422936	6651070	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
254/85	342/24		

SSC078	23.04.2012		
			
145/75			
Höhe	4.180 m		
Koordinaten	423024	6650933	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
295/90	025/20		
290/85	020/05		
145/75	235/01	Sinistral	
320/85	050/10	Sinistral	
296/85	023/35		

SSC079	23.04.2012		
			
228/70			
Höhe	4.195 m		
Koordinaten	422918	6651035	UTM 19J
Harnisch	Lineation	Bewegungssinn	Klüfte
045/90	135/05	Dextral	
228/70	314/10	Dextral	

Literaturverzeichnis

- ANDERSON, M., ALVARADO, P., ZANDT G. & S., BECK (2007): Geometry and brittle deformation of the subducting Nazca Plate, central Chile and Argentina. Universität von Arizona, USA.
- ANDEWEG, B. (2002): Cenozoic tectonic evolution of the Iberian Peninsula: effects and causes of changing stress fields. Universität Amsterdam.
- ARMIJO, R., RAULD, R., THIELE, R., VARGAS, G., CAMPOS, J., LACASSIN, R. & E., KAUSEL (2010): The Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. American Geophysical Union.
- CHARRIER, R., PINTO, L. & RODRÍGUEZ, M.P. (2007): 3 Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile.
- CHARRIER, R., BAEZA, O., ELGUETA, S., FLYNN, J.J., GANS, P., KAY, S.M., MUNOZ, N., WYSS, A.R. & E., ZURITA (2002): Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). Journal of South American Earth Sciences 15 (2002) 117-139. Pergamon.
- DEWEY, J.F. & S.H., LAMB (1992): Active tectonics of the Andes. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V.
- FARÍAS, M., COMTE, D., CHARRER, R., MARTINOD, J., DAVID, C., TASSARA, A., TAPIA, F. & FOCK, A. (2010): Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. American Geophysical Union.
- FRUTOS, J. (1981): Andean tectonics as consequence of sea floor spreading. - Tectonophysics, 72, T21-T32.
- GEOZ (2010): Spannung. < <http://www.geoz.com/deu/d/Spannung>> (Zugriff: 22.02.2013)
- GEOZ (2012): Subduction Roll-Back. <http://www.geoz.com/deu/d/subduction_roll-back> (Zugriff: 12.12.2012).

HÖFER-ÖLLINGER, G. (2009): Geological and geotechnical investigation programs in Andean Mountains – a cultural, contractual and logistic challenge. Wals/Salzburg: Geoconsult ZT GmbH.

ONCKEN, O. & H. ECHTLER (2002): Die Anden ein natürliches Labor der Plattentektonik. Potsdam: GFZ.

TUNNELTALK (2011): Andes link a priority for Chile-Argentina-Brazil.
<<http://www.tunneltalk.com/Chile-Argentina-Dec11-Agua-Negra-makes-infrastructure-priority-list.php>> (Stand: November 2011) (Zugriff: 2012-22-06)

WIKIPEDIA (2012): Paso de Agua Negra. <http://de.wikipedia.org/wiki/Paso_de_Agua_Negra>
(Stand: 2012-01-04) (Zugriff: 2012-18-05).