

Leading in Education, Research and Decision Support Competence Center Environment and Sustainability

COGEAR: COupled seismogenic GEohazards in Alpine Regions

COGEAR

MODULE 3:

Generic studies on rock slope dynamics Del. No.: 3b.2.4.1

Authors: Heynen, M.

Engineering Geology, ETH Zürich

April 1, 2010

Einfluss lokaler Geländegegebenheiten auf die seismische Stabilität eines Felshanges (Seetalhorn, VS)

The influence of topographic amplification and local site conditions on the seismic stability of rock slopes (Seetalhorn, VS)

Masterarbeit eingereicht an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich

> Erstellt von: Martin Heynen

Betreut durch: Dr. Edward A. Button Dr. Jeffrey R. Moore

Zürich, den 1. April 2010

Copyright

Copyright, Masterarbeit, Departement Erdwissenschaften, ETH Zürich

`Der Autor ist mit der Vervielfältigung dieser Arbeit im privaten und wissenschaftlichen Bereich einverstanden. Ohne Einverständnis des Autors ist die Erstellung mehrfacher Kopien oder die Verwendung zu kommerziellen Zwecken hingegen ausdrücklich untersagt.

Falls Daten und Resultate aus dieser Arbeit für weitere wissenschaftliche Studien gebraucht werden, ist die übliche wissenschaftliche Zitierweise anzuwenden.`

Martin Heynen CH-3931 Lalden maheynen@gmail.com

Zusammenfassung

Steile Talseiten in teils stark geklüftetem Gestein führen in den Schweizer Alpentälern zu Bergstürzen und Hanginstabilitäten und somit zu einer Bedrohung für Menschen und Infrastruktur. Das Verständnis der Mechanismen und der Auslösefaktoren, welche Felsversagen auslösen ist, wichtig um einen besseren Schutz zu gewährleisten. Der Kanton Wallis besitzt das höchste Erdbebenpotential in der Schweiz. Erdbeben der Magnitude 6 oder grösseres werden alle 100 Jahre erwartet, doch wegen der grossen Wiederkehrzeit wird diese Gefahr oft nicht genug berücksichtigt. Diese Arbeit zeigt den Einfluss von Erdbeben auf Hanginstabilitäten in der Region oberhalb Grächen.

Das Untersuchungsgebiet umfasst einen ca. 13 km² grossen kristallinen Berghang, welcher zum Grossteil eine der grössten bekannten tiefgreifenden gravitativen Hanginstabilitäten im Schweizer Alpenraum bildet. Multidisziplinäre Untersuchungen, bestehend aus einem gründlichen Literaturstudium, geologischer und geomorphologischer Kartierung unter Berücksichtigung strukturgeologischer Gegebenheiten, Trennflächenkartierung, Gesteinscharakterisierung und Identifizierung der Versagensmechanismen, sowie Satelliten gestützte und terrestrische Fotogrammmetrie wurden verwendet, um die im Forschungsgebiet vorkommenden morphologischen Erscheinungsformen und Versagensmechanismen aufzunehmen und zu beschreiben. Zur langfristigen Überwachung wurden im Bereich der `Plattja` mehrere Extensometer-Messsysteme installiert und eine Präzisionsnivellierung durchgeführt.

Die geomechanische Disposition hat gezeigt, dass die statische Stabilität stark von der Persistenz der charakterisierten Kluftsystemen abhängt. Im gesamten Untersuchungsgebiet ist Gleiten auf der Schichtung statisch nicht gegeben, jedoch kann an steil stehen Klüften planares Gleiten (Ost- Wände) und Keilgleiten (Nordwände) vorkommen. Blockkippen kann im Forschungsgebiet vorkommen, falls steil einfallende Klüfte eine Persistenz von über 25m aufweisen, bei den gemessenen Kluftabständen.

Historische Untersuchungen haben die Sensitivität des Forschungsgebietes auf Erdbeben in der Vergangenheit gezeigt. Die Runnout-Berechnung, für einen bekannten Bergsturz, welcher 1755 durch ein Erdbeben der Magnitude 6 ausgelöst wurde, haben ein losgelöstes Volumen von ~1.5 Millionen m³ ergeben. Im identifizierten Abrissgebiet beim `Durlochhorn`, war es möglich die Stabilität eines durch regionale Klüfte gebildeten Keiles zu berechnen. Pseudostatische Berechnungen ergaben dafür minimale horizontale Beschleunigungen von 0.14g bis 0.22g um den Bergsturz auszulösen. Solche Beschleunigungen sind durch das seismische Potential des Wallis gegeben.

Bei der `Plattja` wurden praktisch ideale Voraussetzung zur Anwendung der rigorosen Newmarkberechnung gefunden. Diese Region ist charakterisiert durch grosse meist frei stehende Blöcke, welche auf der mit 20° fallenden Schichtungsfläche gleiten. Repräsentative Erdbeben Grundschwingungen wurden verwendet um die potentielle seismische Verschiebung der Blöcke zu berechnen. Die aufgenommen Bodenbeschleunigungen beim L`Aquila Erdbeben 2009 (Station AQG) wurden verwendet um das maximal zu erwartende

I

Erdbeben in der Region von Grächen zu simulieren. Die Analysen zeigen, dass die Newmark-Berechnungen stark vom angenommenen basalen Reibungswinkel abhängen. Bei trockenen Bedingungen konnten maximale Verschiebungen von bis zu 8.3 cm, bei nassen Bedingungen vertikalen bis zu cm berechnet werden. Die Berücksichtigung der 30.3 Beschleunigungskomponente zeigt nur einen kleinen Einfluss für die Analyse bei der `Plattja`, da bei der Bestimmung des basalen Reibungswinkels eine grössere Unsicherheit entsteht als der Effekt der durch die vertikale Komponente entsteht. Der Einfluss der topographischen Verstärkung konnte durch die in-situ Messungen des SED nicht quantifiziert werden. Daher wurde dafür eine Verstärkung von 50% zusätzlich zu den Eingangsbeschleunigungen angenommen, was ein üblicher Wert für Bergspitzen darstellt. Für den Schlimmsten Fall, bei nassen Bedingungen und mit topographischer Verstärkung, zeigten die Newmarkberechnung Verschiebungen von bis zu 2.7 m.

Vereinfachte Newmarkberechnung werden oft gebraucht um seismisch induzierte Verschiebungen effizient abzuschätzen. Die Vergleiche der verschiedenen Analysetechniken haben gezeigt, dass solche vereinfachten Analysen nur in kleinen Verhältnissen, von maximaler zu kritischer Beschleunigung, zuverlässig sind. Die existierenden Methoden berücksichtigen die Zeit oberhalb der kritischen Beschleunigung nicht, welche eine der wichtigsten Parameter bei der rigorosen Newmark darstellt. Um diesem Problem gerecht zu werden wurde eine neue modifizierte Newmarktechnik eingeführt, welche eine gute Übereinstimmung mit der rigorosen Newmarkanalyse, über einen ausgedehnteren Bereich, zeigt.

Erdbeben weisen eine spezifische Polarisierung der Wellenabstrahlung am Erdbebenherd auf Verbruchsorientierung bezieht (directionality Effekt). Lokale und sich auf die Geländegegebenheiten und topographische Verstärkung können diesen Effekt weiter modifizieren. Besonders bei hohen Geländebeschleunigungen, kann durch die Orientierung des Hanges, einen grosser Einfluss auf induzierte Verschiebungen entstehen. Die Variation der Richtungsabhängigkeit konnte mit einer Reihe verschiedener Grundschwingungen gezeigt werden. Dabei wurden die orthogonalen horizontalen Beschleunigungen kombiniert um bestimmte Argumente durch eine vollständige Rotation darzustellen. Die Resultate haben einen unterschiedlichen Grad an Polarisierung gezeigt, mit unterschiedlich starken erwarteten Newmarkverschiebungen. Diese Methode zeigt alle möglichen zu erwartenden Verschiebungen und macht Sinn, falls die Orientierung der Grundschwingung bezüglich des Hanges nicht bekannt ist.

Um eine paläo-seismische maximale Bodenbeschleunigung (PGA) für das Untersuchungsgebiet zu ermitteln, wurde die Stabilität von ausgewählten Blöcken gegenüber Schaukeln/ Überkippen berechnet. Die Resultate ergaben eine maximal zu erwartende Beschleunigung von 0.4g. Da im Forschungsgebebiet viele solcher noch aufrechten Blöcke gefunden wurden und Abschätzungen der Intensität früherer Erdbeben keine höheren Werte ergaben, kann davon ausgegangen werden, dass diese PGA nie erreicht wurde.

||

Abstract

The steep valley walls and fractured rock slopes of Alpine Switzerland create considerable exposure to natural hazards affecting both humans and critical infrastructure. Understanding the mechanisms and triggering factors that cause rock slope failures is critical for alleviating such hazards. The area of Kanton Wallis has the highest seismic activity in Switzerland. Magnitude 6 or greater earthquakes occur roughly every 100 years, but because of the relatively long recurrence interval, co-seismic rock slope hazards are often not fully appreciated. This research addresses seismically-induced rock slope failures ranging in scale from rockfalls to rock slides at a representative study area near Grächen, VS. The results are used to comment on co-seismic rock slope hazards throughout the region, a subject not commonly considered until now.

The study area above Grächen includes roughly 13 km² of crystalline rock slopes adjacent to and resting on one of the largest known deep seated gravitational slope deformations in the Swiss Alps. In order to conduct meaningful seismic slope stability analyses, extensive site characterization was performed utilizing a multidisciplinary approach. The investigation included; historical literature studies, geological and geomorphological mapping, structural and discontinuity measurements, rock mass characterization, satellite and terrestrial remote sensing analyses as well as, hazard identification. To allow for continued long-term monitoring, benchmark extensometer arrays were installed across relevant fractures at the `Plattja` site, spatially referenced with precision leveling measurements.

The geotechnical disposition of the study area showed that static slope stability depends strongly on the assumed persistence of the discontinuity sets. Sliding on foliation is statically stable, but sliding on steep discontinuities can occur in a planar mode (west facing walls) or in a wedge geometry (north facing walls). Stability analysis for block toppling showed that blocks are stable when the persistence of critical structure sets K₃ and K₄ does not exceed ~25 m, using measured joint spacings.

Historical reviews show that the research area is sensitive to earthquakes, and numerous landslides have been reported during past events. Runout analysis conducted for a known rock avalanche, triggered by the 1755 magnitude 6 earthquake, revealed a failed volume of roughly 1.5 million m³. In the identified release area of the `Durlochhorn` it was possible to investigate the stability of a wedge defined by regional discontinuity sets. Pseudo-static analysis revealed a minimum horizontal acceleration ranging from 0.14g to 0.22g needed to trigger the rock avalanche, which lies well within the seismic potential for the Wallis.

Ideal conditions for rigorous Newmark analysis were found at the `Plattja` site, where large distinct rock blocks slide on a gently-dipping basal plane. A number of representative earthquake input motions were selected to model potential co-seismic displacement of these

blocks. The 2009 L'Aquila (M_w 6.3) earthquake ground motions (station AQG), simulate the maximum expected earthquake. Results showed that displacement calculated by Newmark analyses depend strongly on the basal friction angle assumed for the sliding surface. Under dry conditions, maximum displacement of 8.3 cm was determined, while under wet conditions this value increased to 30.3 cm. Consideration of the vertical component of acceleration is of minor importance for analyses at 'Plattja', since the error in determining the basal friction angle is much greater than the effect of vertical acceleration. The role of topographic amplification could not be determined directly from in-situ measurements, and was assumed in this work to add 50% to the input acceleration, which is a commonly used maximum value for hill tops. In a worst case scenario, under wet conditions with topographic amplification, modeled Newmark displacements increased to 2.7 m.

Simplified Newmark analyses are often used to quickly estimate seismically induced slope displacements. Comparisons conducted in this work of different techniques showed, that such simplifications are primarily valid for small peak acceleration to critical acceleration ratios. Existing methods do not consider the time spent above the critical yield acceleration, which is one of the most important parameters in rigorous Newmark analysis. To upgrade these simplified techniques, a new modified Newmark analysis was introduced, that shows good fit with rigorous analyses over a broad range of displacements.

Nearly all earthquakes produce intrinsic polarization of ground motion, caused by fault directivity, local site effects, or topographic amplification. In such cases and especially for high yield accelerations, the orientation of the slope can have a large impact on the induced displacements (the so-called directionality effect). The directional variability in ground acceleration was computed for a number of representative input motions by combing the orthogonal horizontal components, then decomposing the ground motions at specified increments through a full 360° rotation. The results indicate variable degrees of ground motion polarization and strong variations in the predicted Newmark displacements. This method is presented as a tool for estimating probable ground displacements when the orientation of the input motions with respect to the slope is not known.

Finally, in order to obtain an estimate of paleo-seismic peak ground acceleration (PGA) for the research area, a rocking / overturning analysis was carried out for selected precariously balanced rock blocks. The results indicate a predicted maximum past PGA of 0.4g. Since the investigated blocks remain upright today, and since there are many similar blocks throughout the study area, it is assumed that this PGA value has not been reached in the time since the Last Glacial Maximum. This finding is in accordance with shaking intensity estimates from previous historical earthquakes.

Inhaltsverzeichnis

<u>1.</u>	EINLEITUNG	1
1.1	MOTIVATION UND ZIELSETZUNG	2
1.2	Untersuchungsgebiet	2
1.3	TEKTONISCHER ÜBERBLICK	3
1.4	GEOLOGISCHE ÜBERSICHT	3
1.5	GEOMORPHOLOGISCHER ÜBERBLICK	3
1.6	Hydrogeologischer Überblick	4
1.7	Überblick: Historische Relevanzen	4
<u>2.</u>	METHODEN	6
		_
2.1	FELDMETHODEN	7
2.1.	GELANDECHARAKTERISIERUNG	7
2.1.	2 FOTOGRAMMETRISCHE METHODE	16
2.1.	3 DEFORMATIONSMESSUNGEN	16
2.2	ANALYSEMETHODEN	18
2.2.	1 ORTHOFOTOS	18
2.2.	2 DIPS 5.1	18
_		
<u>3.</u>	GELANDECHARAKTERISIERUNG	23
2.1		24
3.1	ALLGEMEIN	24
3.1.	TEKTONISCHE DISPOSITION Monnue, Kunnetische Disposition	24
3.1. 2 1	2 INTORPHO- REIMATISCHE DISPOSITION	20
5.1. 2 1		27
3.1.3.1		27
⊃.⊥.⊃.1		50
3.1. 2 1	7 SEIGNISCHE DISDOSITION	31
3.1. 3.3	A DETRAN	55 26
3.2		35
5.2. 2 7		25
2.2.	2 SEISMISCHE DISPOSITION	36
3.2. 3 3		30 27
3.3		37 27
3.3. 2.2		37 דנ
3.3. 2.2		37 20
3.3. 2.2		38 0 c
2.2.		39
5.4		40
э.4.		40

3.4.2 GEOTECHNISCHE DISPOSITION	41
3.4.3 GEOMECHANISCHE DISPOSITION	48
3.4.4 SEISMISCHE DISPOSITION	51
4. STABILITÄTS- ANALYSEN	52
4.1 GEBIRGSEIGENSCHAFTEN	53
4.2 HISTORISCHE UNTERSUCHUNGEN	53
4.2.1 RUNOUT `DURLOCH- KEIL` MIT DAN-W	55
4.2.2 Stabilität `Durloch- Keil` mit Swedge	56
4.3 SEISMISCHE UNTERSUCHUNGEN	57
4.4 STABILITÄTSANALYSE DER VERSAGENSMECHANISMEN	58
4.4.1 PLANARES GLEITEN	58
4.5 KLUFTÖFFNUNGSMESSUNGEN	61
5. RESULTATE	62
5.1 SCHAUKELN	63
5.2 PLANARES GLEITEN	64
5.2.1 IRPINIA 1980	65
5.2.2 VAL COMINO 1984	68
5.2.3 L'Aquila 2009: ANT	70
5.2.4 L'Aquila 2009: AQG	71
5.3 NEUE VEREINFACHTE NEWMARK METHODE	74
6. ERGEBNISSE	76
7. DANKSAGUNG	79
8. REFERENZEN	80
9. ANHANG	86
9.1 GELÄNDECHARAKTERISIERUNG	87
9.2 KLUFTÖFFNUNGSMESSUNGEN	92
9.3 HISTORISCHE UNTERSUCHUNGEN	100
9.3.1 ROUNOUT- ANALYSE	101
9.4 ERDBEBENANALYSE	101
9 4 1 IRPINIA 1980	102
9.4.2 VALCOMINO 1984	102
9.4.3 L'AQUILA FROBEREN 2009 ANT	104
9.4.4 L'AQUILA ERDREBEN 2009: AQG	105
9.4.5 NEUE VEREINFACHTE NEWMARK ANALYSE	100
	100

Abbildungsverzeichnis

KAPITEL 2: METHODEN

ABBILDUNG 1: TAPE EXTENSOMETER PU15	17
ABBILDUNG 2: NIVELLEMENT, PLATTJA N- SEITE	17
ABBILDUNG 3: PLANARES GLEITEN AUF SCHICHTUNG, `PLATTJA`	19
ABBILDUNG 4: GLEITEN AN STEILEN KLÜFTEN, `PLATTJA` N- WAND	19
ABBILDUNG 5: (ROTATIONS-) BLOCKKIPPEN, `PLATTJA` N- WAND	19
ABBILDUNG 6: PLANARES GLEITEN, DIPS 5.1	20
ABBILDUNG 7: KEILGLEITEN, DIPS 5.1	21
ABBILDUNG 8: KIPPEN, DIPS 5.1	21
ABBILDUNG 9: VERSCHIEDENE ARTEN VON DIREKTEM BLOCKKIPPEN UND	
ROTATIONSRUTSCHUNGEN[HARRISON UND HUDSON, 2000]	22
KAPITEL 3: GELÄNDECHARAKTERISIERUNG	
ABBILDUNG 10: SEDIMENTE DER ST. NIKLAUSMULDE MIT PROFIL	25
ABBILDUNG 11: STRUKTURELLE KLÜFTE	25
ABBILDUNG 12: FALTENACHSEN (RICHTUNG)	25
ABBILDUNG 13: EISBEDECKUNG, LGM	26
ABBILDUNG 14: ENTSPANNUNGSBRÜCHE, `PLATTJA` N- WAND	26
ABBILDUNG 15: AUFSCHLUSS VON DEN SEDIMENTEN DER ST. NIKLAUSMULDE	29
ABBILDUNG 16: GROSSSTRUKTUREN	30
ABBILDUNG 17: LINEAMENTE	30
ABBILDUNG 18: GSI BESTIMMUNG	31
ABBILDUNG 19: ERDBEBEN M6+ IM WALLIS	33
ABBILDUNG 20: PROFIL BEI KALPETRAN	35
ABBILDUNG 21: KLÜFTE BEI KALPETRAN	36
ABBILDUNG 22: PROFIL GRÄCHNERBERG [NOVERRAZ ET AL. 1998]	37
ABBILDUNG 23: HANGBEWEGUNGEN DES DSGSD (GRÄCHEN) [RECHTS IPTA MESSUNGEN UM PLATTJA]	39
ABBILDUNG 24: LUFTAUFNAHME DER PLATTJA	41
ABBILDUNG 25: ÜBERSICHT KLUFTSYSTEME 3D (ISOMETRISCH)	41
ABBILDUNG 26: SEETALHORN, GIPFELAUFBAU (OST- WEST, NORD- SÜD, STEREOPLOT)	43
ABBILDUNG 27: KLUFTSYSTEME, SEETALHORN	43
ABBILDUNG 28: DISTELHORN, STEREOPLOT	44
ABBILDUNG 29: KLUFTSYSTEME, DISTELHORN	44
ABBILDUNG 30: KLUFTSYSTEME, DURLOCHHORN	45
ABBILDUNG 31: DURLOCHHORN NORD SEITE, STEREOPLOT	45
ABBILDUNG 32: KLUFTSETS PLATTJA N- WAND	46
ABBILDUNG 33: KLUFTAUFNAHME MIT NIVELLEMENT UND HANGNEIGUNG DURCH 3D MODELL	46
ABBILDUNG 34: KLUFTSYSTEME, PLATTJA, [NIVELLEMENT]	47
ABBILDUNG 35: KLUFTSYSTEME, PLATTJA N- WAND [SHAPE METRIX]	47
ABBILDUNG 36: KLUFTSETS PLATTJA, ZUSAMMENGEFASST	47
ABBILDUNG 37: GLEITEN/ BLOCKKIPPEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET	48
ABBILDUNG 38: GLEITEN, GEOMETRISCHE AUSWERTUNG	48
ABBILDUNG 39: MODELL STEIL STEHENDER KLÜFTE	49
ABBILDUNG 40: K3/K4 KEIL	49
ABBILDUNG 41: BLOCKKIPPEN, GEOMETRISCHE ANALYSE SEETALHORN	50
ABBILDUNG 42: BLOCKKIPPEN AUF SCHICHTUNG	50

KAPITEL 4: STABILITÄTS- ANALYSEN

ABBILDUNG 43: SPANNNUNG DURCH BLOCKKIPPEN	50
ABBILDUNG 44: PROFIL FÜR DEN BERGSTURZ VON 1755	53
ABBILDUNG 45: MODELL DES `DURLOCH- KEILS`	54
ABBILDUNG 46: RUNOUT REIBUNGSMODELL	56
ABBILDUNG 47: K _D ALS FUNKTION VON K _{AC} UND A _{SHC}	57
ABBILDUNG 48: PLANARES GLEITEN: PLATTJA	59
ABBILDUNG 49: F(HANGNEIGUNG, REIBUNGSWINKEL)	60
ABBILDUNG 50: K _H : F(HANGNEIGUNG,REIBUNGSWINKEL)	60
ABBILDUNG 51: KORRIGIERTES 3D MODELL DER PLATTJA	61
KAPITEL 5: RESULTATE	
ABBILDUNG 52: MODELL, BLOCKSCHAUKELN	63
ABBILDUNG 53: IRPINIA 1980: VEREINFACHTE ANALYSE NACH KRAMER	66
ABBILDUNG 54: IRPINIA 1980: VEREINFACHTE ANALYSE NACH AMBRASEYS, MENUE, JIBSON ET AL.	66
ABBILDUNG 56: NEWMARK VERSCHIEBUNGEN, ZUSAMMENSTELLUNG	67
ABBILDUNG 55: ORIENTIERUNGSABHÄNGIGE VERSCHIEBUNGEN DURCH TOPOGRAPHIEEFFEKT	67
ABBILDUNG 57: EFFEKT DER VERTIKALEN BESCHLEUNIGUNG BEI TROCKENEN UND NASSEN BEDINGUNGEN	68
ABBILDUNG 58: HISTOGRAMM, AUSLENKUNGSWINKEL	68
ABBILDUNG 59: GELÄNDEBESCHLEUNIGUNG FÜR NEIGUNG =20 ⁰ , REIBUNG =24 ⁰	69
ABBILDUNG 60: VISUALISIERUNG DER PAGANICA VERWERFUNG [GEER-016, 2009]	70
ABBILDUNG 61: NEWMARK- BERECHNUNGEN (EINGABESCHWINGUNG: L`AQUILA AQG)	71
ABBILDUNG 62: VEREINFACHTE ANALYSE, NASSE BEDINGUNGEN	72
ABBILDUNG 63: VEREINFACHTE ANALYSE, TROCKENE BEDINGUNGEN	72
ABBILDUNG 64: HISTOGRAMM, AUSLENKUNGSWINKEL FÜR L`AQUILA AQG	73
ABBILDUNG 65: VERGLEICH DER VEREINFACHTEN NEWMARKMETHODEN, FÜR TROCKENE BEDINGUNGEN	75
ABBILDUNG 66: VERGLEICH DER VEREINFACHTEN NEWMARKMETHODEN, FÜR NASSE BEDINGUNGEN	75
KAPITEL 9: ANHANG	
ABBILDUNG 67: KARTIERUNG, ÜBERSICHT GRÄCHNERBERG	90
ABBILDUNG 68: KARTIERUNG, ÜBERSICHT SEETALHORN	91
ABBILDUNG 69: VERSUCHSAUFBAU EXTENSOMETER PN + PO	92
ABBILDUNG 70: VERSUCHSAUFBAU EXTENSOMETER PU	92
ABBILDUNG 71: `DURLOCHKEIL` BERECHNUNGEN MIT SWEDGE	100
ABBILDUNG 72: RUNOUT VOELLMY MODELL	101
ABBILDUNG 73: RUNOUT, GESCHWINDIGKEIT UND ABLAGERUNGSMÄCHTIGKEIT FÜR VOELLMY MODELL	101
ABBILDUNG 74: IRPINIA ERDBEBEN 1980: EINGANGSWELLE	103
ABBILDUNG 75: VAL COMINO ERDBEBEN 1984: EINGANGSSCHWINGUNGNG	104
ABBILDUNG 76: L`AQUILA ERDBEBEN 2009, ANT: EINGANGSSCHWINGUNGEN	105
ABBILDUNG 77: L`AQUILA ERDBEBEN 2009, AQG, EINGANGSSCHWINGUNG	107
ABBILDUNG 78: NEUE VEREINFACHTE NEWMARK ANALYSE, L`AQUILA ERDBEBEN 2009, AQG, TROCKENE	
BEDINGUNGEN	108
ABBILDUNG 79: NEUE VEREINFACHTE NEWMARK ANALYSE, L`AQUILA ERDBEBEN 2009, AQG, NASSE	
BEDINGUNGEN	108

Tabellenverzeichnis

KAPITEL 3: GELÄNDECHARAKTERISIERUNG

TABELLE 1: SPANNUNGSACHSEN MATTERTAL	24
TABELLE 2: GESTEINSPARAMETER	28
TABELLE 3: KLUFTSYSTEM, SEETALHORN	43
TABELLE 4: KLUFTSYSTEM, DISTELHORN	44
TABELLE 5: KLUFTSYSTEM, DURLOCHHORN	45
TABELLE 6: KLUFTSYSTEM, PLATTJA	47
<u>KAPITEL 4: STABILITÄTS- ANALYSEN</u>	
TABELLE 7: GESTEINSPARAMETER MIT GSI- ANPASSUNG, MITTELWERTE	53
TABELLE 8: RUNOUT- BERECHNUNGEN (VEREINFACHT)	54
TABELLE 9: RUNOUT EINGABEPARAMETER UND RESULTATE FÜR MODELLIERUNGEN	55
TABELLE 10: ERDBEBEN- PARAMETER DER VERSCHIEDENEN EVENTS [CM/S ²]	57
TABELLE 11: STATISCHE UND PSEUDOSTATISCHE BERECHNUNG	59
TABELLE 12: EXTENSOMETER, ÜBERBLICK	61
KAPITEL 5: RESULTATE	
TABELLE 13: STATISCH- UND PSEUDOSTATISCHE BERECHNUNG, REIBUNG =24	65
TABELLE 14: VERSCHIEBUNGSBERECHNUNGEN FÜR L`AQUILA AQG [CM]	72
TABELLE 15: VERGLEICH DER VEREINFACHTEN NEWMARK ANALYSEMETHODEN	74
KAPITEL 9: ANHANG	
TABELLE 16: NIVELLEMENT, VERMESSUNG	87
TABELLE 17: KLUFTÖFFNUNGSMESSUNGEN	93
TABELLE 18: VEREINFACHTE NEWMARK ANALYSE: IRPINIA ERDBEBEN 1980	102
TABELLE 19: VEREINFACHTE NEWMARK ANALYSE, L`AQUILA ERDBEBEN 2009, AQG, TROCKENE E	BEDINGUNGEN
	106

List of figures

CHAPTER 2: METHODS

FIGURE 1: TAPE EXTENSOMETER SETUP, PU15	17
FIGURE 2: LEVELLING SETUP, PLATTJA N- FACE	17
FIGURE 3: PLANAR SLIDING ON FOLIATION, `PLATTJA`	19
FIGURE 4: SLIDING ON STEEP PLANES, `PLATTJA` N- FACE	19
FIGURE 5: (ROTATIONAL-) TOPPLING, `PLATTJA` N- FACE	19
FIGURE 6: PLANAR SLIDING, DIPS 5.1	20
FIGURE 7: WEDGE SLIDING, DIPS 5.1	21
FIGURE 8: TOPPLING, DIPS 5.1	21
FIGURE 9: TOPPLING AND SLUMPING BY HARRISON AND HUDSON (2000)	22
CHAPTER 3: SITE CHARACTERIZATION	
FIGURE 10: SEDIMENTS OF ST. NIKLAUS, WITH PROFILE	25
FIGURE 11: STRUCTURAL JOINTS	25
FIGURE 12: FOLD AXIS (STRIKE)	25
FIGURE 13: ICE COVER AT LGM	26
FIGURE 14: DECOMPRESSION JOINTS, `PLATTJA` N- FACE	26
FIGURE 15: OUTCROP OF THE SEDIMENTS FROM ST. NIKLAUS	29
FIGURE 16: LINEAMENTS, EAST- MATTERTAL	30
FIGURE 17: LINEAMENTS, SEETAL- RIDGE	30
FIGURE 18: GSI DISPOSITION	31
FIGURE 19: EARTHQUAKE M6+ IN WALLIS	33
FIGURE 20: PROFILE, KALPETRAN	35
FIGURE 21: JOINT SETS, KALPETRAN	36
FIGURE 22:: PROFILE SLOPE OF GRÄCHEN [NOVERRAZ ET AL. 1998]	37
FIGURE 23: SLOPE MOVEMENTS DSGSD / IPTA MEASUREMENTS ON PLATTJA	39
FIGURE 24: AERIAL PICTURE, PLATTJA	41
FIGURE 25: MODEL OF JOINT SETS IN 3D	41
FIGURE 26: SEETALHORN WITH MAIN JOINTS	43
FIGURE 27: JOINT SETS, SEETALHORN	43
FIGURE 28: DISTELHORN WITH MAIN JOINTS	44
FIGURE 29: JOINT SETS, DISTELHORN	44
FIGURE 30: JOINT SETS, DURLOCHHORN	45
FIGURE 31: DURLOCHHORN N- FACE, MAIN JOINTS	45
FIGURE 32: JOINT TRACES WITH PRECISION LEVELING AND SLOP DIP FORM 3D MODEL	46
FIGURE 33: JOINT SETS N- FACE OF PLATTJA	46
FIGURE 34: JOINT SETS, PLATTJA, [NIVELLEMENT]	47
FIGURE 35: JOINT SETS, PLATTJA N- FACE [SHAPE METRIX]	47
FIGURE 36: JOINT SETS, PLATTJA, ALL TOGETHER	47
FIGURE 37: SLIDING/ TOPPLING IN THE RESEARCH AREA	48
FIGURE 38: SLIDING, GEOMETRICALLY	48
FIGURE 39: MODEL, SIDING ON STEEP JOINTS	49
FIGURE 40: K3/ K4 WEDGE	49
FIGURE 41: TOPPLING, GEOMETRICALLY	50
FIGURE 42: TOPPLING ON FOLIATION	50
FIGURE 43: BLOCK TOPPLING STESS	50

CHAPTER 4: STABILITY ANALYSIS

FIGURE 44: PROFILE FOR 1755 LANDSLIDE	53
FIGURE 45: MODEL OF `DURLOCH- WEDGE`	54
FIGURE 46: RUNOUT MODEL, FRICTIONAL	56
FIGURE 47: K _D AS FUNCTION OF K _{AC} AND A _{SHC}	57
FIGURE 48: PLANAR SLIDING ON PLATTJA	59
FIGURE 49: FOS: F(DIP,FRICTION)	60
FIGURE 50: K _H : F(DIP,FRICTION)	60
FIGURE 51: SCALED 3D MODEL OF PLATTJA	61
CHAPTER 5: FINDINGS	
FIGURE 52: MODEL OF ROCKING	63
FIGURE 53: IRPINIA 1980: SIMPLIFIED DISPLACEMENT ANALYSIS BY KRAMER	66
FIGURE 54: IRPINIA 1980: SIMPLIFIED DISPLACEMENT ANALYSIS BY AMBRASEYS, MENUE, JIBSON ET AL.	66
FIGURE 56: NEWMARK DISPLACEMENT, TIME HISTORY	67
FIGURE 55: DIRECTIONALITY EFFECT, PARTLY CAUSED BY TOPOGRAPHIC AMPLIFICATION	67
FIGURE 57: EFFECT OF THE VERTICAL EARTHQUAKE COMPONENT BY DRY AND MOIST CONDITIONS	68
FIGURE 58: HISTOGRAM, ANGLE OF EXCURSION (VAL COMINO 1984)	68
FIGURE 59:YIELD ACCELERATION FOR DIP = 20° , FRICTION = 24°	69
FIGURE 60: VISUALISATION OF PAGANICA FAULT [GEER-016, 2009]	70
FIGURE 61: NEWMARK DISPLACEMENT (INPUT MOTION: L`AQUILA AQG)	71
FIGURE 62: SIMPLIFIED ANALYSIS, WET CONDITIONS	72
FIGURE 63: SIMPLIFIED ANALYSIS, DRY CONDITIONS	72
FIGURE 64: HISTOGRAM, ANGLE OF EXCURSION (L'AQUILA AQG)	73
FIGURE 65: COMPARISON FROM SIMPLIFIED NEWMARK ANALYSIS, DRY CONDITIONS	75
FIGURE 66: COMPARISON FROM SIMPLIFIED NEWMARK ANALYSIS, WET CONDITIONS	75
CHAPTER 9: ATTACHEMENT	
FIGURE 67: MAPPING OVERVIEW, GRÄCHNERBERG	90
FIGURE 68:MAPPING OVERVIEW, GRÄCHEN	91
FIGURE 69: EXTENSOMETER SETUP: PN +PO	92
FIGURE 70: EXTENSOMETER SETUP: PU	92
FIGURE 71: `DURLOCHWEDGE`, ANALYSIS WITH SWEDGE	100
FIGURE 72: RUNOUT VOELLMY MODEL	101
FIGURE 73: RUNOUT VELOCITY AND DEBRIS THICKNESS, VOELLMY MODEL	101
FIGURE 74: IRPINIA EARTHQUAKE 1980: INPUT MOTION	103
FIGURE 75:VAL COMINO EARTHQUAKE 1984: INPUT MOTION	104
FIGURE 76: L`AQUILA EARTHQUAKE 2009, ANT: INPUT MOTION	105
FIGURE 77: L`AQUILA EARTHQUAKE 2009, AQG, INPUT MOTION	107
FIGURE 78: NEW SIMPLIFIED NEWMARK ANALYSIS; L'AQUILA EARTHQUAKE 2009. AQG, DRY CONDITIONS	108
FIGURE 79:NEW SIMPLIFIED NEWMARK ANALYSIS; L'AQUILA EARTHQUAKE 2009. AQG, WET CONDITIONS	108

List of tables

CHAPTER 3: SITE CHARACTERIZATION

TABLE 1: STRESS TENSORS, MATTERTAL	24
TABLE 2: ROCK PARAMETERS	28
TABLE 3: JOINT SETS, SEETALHORN	43
TABLE 4: JOINT SETS, DISTELHORN	44
TABLE 5: JOINT SETS, DURLOCHHORN	45
TABLE 6: JOINT SETS, PLATTJA	47
TABLE 7: GSI SCALING OF ROCK PROPERTIES (MEAN VALUES)	53
TABLE 8: RUNOUT ANALYSIS (SIMPLIFIED)	54
TABLE 9: RUNOUT FOR DIFFERENT MODEL INPUT PARAMETER AND RESULTS	55
TABLE 10: EARTHQUAKE PARAMETERS FROM THE DIFFERENT EVENTS [CM/S ²]	57
TABLE 11: STATIC AND PSEUDOSTATIC ANALYSIS	59
TABLE 12: EXTENSOMETER, OVERVIEW	61
TABLE 13: STATIC AND PSEUDO STATIC ANALYSIS, FRICTION=24	65
TABLE 14: DISPLACEMENT CALCULATIONS FOR L'AQUILA AQG [CM]	72
TABLE 15: COMPARISON FROM THE SIMPLIFIED NEWMARK ANALYSIS METHODS	74
TABLE 16: NIVELLEMENT, ALL MEASUREMENT POINTS	87
TABLE 17: EXTENSOMETER MEASUREMENTS	93
TABLE 18: SIMPLIFIED NEWMARK ANALYSIS, IRPINIA EARTHQUAKE 1980	102
TABLE 19: SIMPLIFIED NEWMARK ANALYSIS: L `AQUILA EARTHQUAKE 2009, AQG, DRY CONDITIONS	106

1. Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Für die Charakterisierung von Hanginstabilitäten wird ein grosser technischer und ökonomischer Aufwand betrieben, mit dem Ziel einen höheren Schutz in alpinen Regionen zu gewährleisten. Dabei wird das Augenmerk auf verschiedene Dispositionen gelegt, wie Geologie, Geomorphologie, Tektonik oder Hydrologie.

Tektonisch aktive Gebiete besitzen ein erhöhtes Erdbebenpotential, welches je nach Disposition zu beträchtlichen Erdbebenbeschleunigungen führen kann. Das Wallis gilt als tektonisch aktivste Region der Schweiz mit erwarteten horizontalen Beschleunigungen von bis zu 0.15g. Geländegegebenheiten können zudem zu Topographischer- und Geländeverstärkung führen und somit zu höheren Beschleunigungen führen.

Hauptziel dieser Masterarbeit ist eine geologisch- geotechnische Beurteilung von Erdbeben induzierten Hanginstabilitäten, am Beispiel der Region Grächen durchzuführen.

Mit den gesammelten seismischen Daten des SED und Feldarbeit soll der Topographieund der Geländeeffekt von Erdbeben genauer bestimmt werden, um (dynamische) Analysemethoden zu ermöglichen. Die Kombination von Topographie- und Geländeverstärkung sind in der Forschung (Felsmechanik) noch nicht ins Detail geklärt. In der Schweiz ist der Einfluss von Erdbeben auf Hanginstabilitäten erst seit wenigen Jahren ein Thema. Daher könnte diese Arbeit für ein besseres Verständnis in diesem Themengebiet beitragen.

1.2 Untersuchungsgebiet

Das Forschungsgebiet befindet sich um das Seetalhorn bei Grächen. Die Gemeinde liegt auf einem Osthang auf 1617 m.ü.M., im Kanton Wallis, am Eingang des Saaserund Mattertals. Das Tourissmusdorf zählt ca. 1300 Einwohner, welche jährlich etwa 0.5 Millionen Gäste beherbergen.

2

1.3 Tektonischer Überblick

Tektonisch gesehen befindet sich das Untersuchungsgebiet in den oberen Penninischen- Decken, genauer in der Bernhard- Decke. Dabei sind vor allem drei Formationen aufgeschlossen. Die Randa Gneise, die Siviez- Mischabel Decke und Gesteine der Mulde von St. Niklaus.

Das Wallis gilt als tektonisch aktiv. Aufgrund von differentiellen Spannungsregimen nördlich und südlich der Rohne- Simplon- Störung, kann es zu meist untiefen (<15 km) Erdbeben kommen. Südlich der Rohne Simplon Störung sind maximale vertikale Spannungen und eine N-S Extension für Erdbeben verantwortlich. Oberhalb des Penninischen- Verbruchs kommt es so zu Normalverwerfungen, durch Extension verbunden mit der Südbewegung der Penninischen Decken und/ oder verstärkt durch die Hebung der Alpen [H.R. Mauer et al., 2007].

1.4 Geologische Übersicht

Durch die tiefgreifende gravitative Hanginstabilität (DSGSD) von Grächen und durch Vergletscherungen, wird ein Grossteil der Geologie durch Quartär geprägt. Nur im Gebiet um das Seetalhorn sind anstehende Gesteinsformationen aufgeschlossen. Dabei bilden vor allem die Augengneise von Randa und Chlorit Muskovit Gneise der Siviez Mischabel- Decke die Berggipfel. Etwas unterhalb sind karbonatführende Chlorit Sericit Gneise der Mulde von St. Niklaus aufgeschlossen. Da die tiefgreifende Hanginstabilität von Grächen wenig erforscht wurde, ist die Grenze dieser nicht klar und daher schwierig abzuschätzen was anstehend ist.

1.5 Geomorphologischer Überblick

Die tiefgründige gravitative Hanginstabilität von Grächen umfasst etwa eine Fläche von 13 km² und gilt damit als zweitgrösste dieser Art in der Schweiz. Auf einer Höhe von ca. 2650 m.ü.M zwischen Seetal- und Distelhorn kann ein Doppelrücken (evtl. ein Counterscarp) beobachtet werden. Noverraz et al. (1998) konnten zeigen, dass sich der DSGSD seit 1930 mit durchschnittlich 5 mm/ Jahr bewegt, wobei lokal auch grössere Bewegungen stattfinden können. Ebenfalls wurde versucht die Grenzen der DSGSD zu zeigen, da dies aber im Gebiet des Durlochhorns nicht auf Messungen beruht, sind die Grenzen hier nicht als fix anzunehmen und bedürfen weiteren Abklärungen.

Zwischen Seetal- und Durlochhorn existiert ein Blockgletscher. Allgemein ist die Permafrostgrenze in diesem Gebiet sehr tief. Das flächenmässig weit ausgedehnte Bergsturzmaterial ermöglicht eine Auskühlung des Bodens und so die Bildung von Permafrost.

Wie bereits erwähnt, ist ein Grossteil der Oberfläche mit Bergsturzmaterial bedeckt. Grosse Felssturzkegel sind bis nach Grächen ersichtlich und zeugen von früheren Fels-/ Bergstürzen. Vielfach können auch Verbrüche zu lokalen Instabilitäten führen und die für die Region typischen Felsmonolithen bilden, ohne dass grössere Bewegungen stattfinden. Für das Dorf selber scheint vom Durlochhorn die grösste Gefahr auszugehen.

1.6 Hydrogeologischer Überblick

Grächen ist bekannt, für seine vielen Trinkwasserquellen, welche aus lehmreichen Schichten zum Teil mitten im DSGSD entspringen.

Neben der tiefgreifenden Sackung ist zu erwähnen, dass Grächen als regenärmstes Dorf der Schweiz, mit etwa 523 mm/y (Maximum im November mit 55 mm, Minimum im Januar mit 32mm), gilt. Die speziellen Gegebenheiten im Forschungsgebiet, wie DSGSD mit lehmreichen Schichten und dem flächenmässig weit ausgedehnten Permafrost, können zu unerwarteten, teils tiefgreifenden Wasserwegen führen.

1.7 Überblick: Historische Relevanzen

Es gibt viele Hinweise auf dem Grächnerberg, welche für eine Fels- und Bergsturz reiche Vergangenheit sprechen. Für diese Arbeit ist eine gewisse Relevanz zu Erdbeben gefragt. Diese konnte über mehrere Quellen aufgezeigt werden [Noverraz F. et al., 1998] [Schnidrig A.L., 1949/50]:

Grächenbiel ist ein alter (sehr) grosser Bergsturz

- Das Durlochhorn scheint ein Teil des Grächner- DSGSD zu sein und einen Versatz von ca. 700m zu haben (Interpretation von Noverraz).
- Erdbeben (Brig, Mw 6.1) von 1755 hat den südlichen Teil des Dorfes zerstört, durch einen Bergsturz vom Durlochhorn.

Beim **Erdbeben** (Törbel, M_w 6.4) von 1855 zerstörte ein **Bergsturz** mehrere Gebäude in Grächen. <u>Dr.Chr. Heusser:</u> … "der Boden nirgendwo so zerrissen gewesen sei und solch gefährlichen Sturz habe befürchten lassen,…" <u>Domherr Ruppen:</u> "Eine Einsenkung von ungefähr anderthalb Schuh durchzieht den Wald ob Grächen und zeigt ringsum die Grenzen des sinkenden Bodens…" Diese historischen Beschreibungen deuten darauf, dass ein Erdbeben der Magnitude 6+ auf dem Grächnerberg zu differentiellen Bodenbewegungen und damit zu Rissen im Boden, sowie zu Setzungen führt.

Im Forschungsgebiet gilt der Murgangzug des Rittigrabens als geologisch aktivste Region. Starkniederschlagsereignisse aber auch klimatische Veränderungen führen zu erhöhter Murgangaktivität in diesem Gebiet und sorgen zum Teil für beträchtliche Schäden. [Stoffel et al., 2005].

2. Methoden

Um das Ziel der Arbeit zu erreichen sind verschiedene Methoden verwendet worden. Diese sollen unter diesem Kapitel erläutert werden. Generell kann zwischen Feld- und Analysemethoden unterschieden werden. Zudem wird unter den einzelnen Punkten gezeigt, auf was und weshalb darauf geachtet wurde.

2.1 Feldmethoden

2.1.1 Geländecharakterisierung

Zur Bestimmung der geologischen Disposition sind Felsmessungen und Feldbeobachtungen gemacht worden, damit die unterschiedlichen geotechnischen Einheiten charakterisiert werden können. Eine Geländecharakterisierung gibt einen genauen Einblick in die Gegebenheiten der Region und zeigt Aspekte, welche als kritisch gegenüber Instabilitäten zu betrachten sind. Mit ArcGIS wurden diese Elemente visualisiert und der genaue Standpunkt festgehalten werden (Abb.67 +68). Folgende Dispositionen wurden unterschieden:

2.1.1.1 Geologische Disposition

Die Geologische Disposition beinhaltet einige wichtige Aspekte, welche für Hanginstabilitäten verantwortlich sein können.

Ob Massenbewegungen stattfinden hängt oft von der Art des Gesteins und dessen Verwitterbarkeit ab. Verwitterung besteht dabei nicht nur in der in situ physikalischen und chemischen Alteration, sondern auch in der Bildung von deren Produkt, dem Regolith. Dabei können auch die Wasserwege beeinflusst werden, was sich auf die Stabilität auswirken kann. [Maharaj, 1995; Wakatsuki et al., 2005].

Lithologisch, strukturell beinhalten Falten, Verwerfungen, Scherzonen, Brüche, Exfoliationsklüfte und Schichtung kritische Strukturen. Je nach Topographie und Hangneigung können solche Strukturen stabilisierend oder sich als ungünstig für die Stabilität erweisen. Die Schichtabfolge kann je nach lithologischem Aufbau kritisch wirken. Aber auch die Orientierung der Schichtung wirkt sich auf die Stabilität aus. In Hängen bei welchen die Schichtung aus dem Hang zeigt, sogenannte Outdip- slopes, sind gegenüber Indip- slopes viel anfälliger auf Hanginstabilitäten, bei den gleichen Rahmenbedingungen.

7

Im `Kleinen` bestimmt die Klüftungsrichtung zur Hangneigung und deren Richtung ob oder wie sich ein Aufschluss verhält.

2.1.1.2 Geotechnische Disposition

Neben der Bestimmung der Eigenschaften des intakten Gesteins sind vor allem die Diskontinuitäten eines Gesteins für die Stabilität eines Hanges entscheidend. Unter Diskontinuitäten versteht man jegliche Separation im Gestein, welche keine effektive Zugkrafft aufweist: Klüfte, Trennflächen, Schieferungs- und Schichtungsflächen.

Bestimmung nach Klassischer Methode:

Lage und Orientierung:

In einem ersten Schritt wird angenommen, dass Diskontinuitäten planar sind. Damit kann mit dem Streichen und Fallen die Orientierung angegeben werden. Mittels stereographischer Projektion können Diskontinuitäts- Sets erkannt und als solche bestimmt werden.

Durchgängigkeit:

Die laterale Ausdehnung einer Diskontinuität wird mit der Durchgängigkeit beschrieben. Sie zeigt deren Dimensionen und die zu erwartenden Gesteinsbrücken an. Im Allgemeinen wird dazu die (optisch) zugängliche Ausdehnung einer Fläche beschrieben. Daher kann von einer Minimum Persistenz gesprochen werden.

Abstände und Frequenz:

Die Abstände zwischen den einzelnen Diskontinuitäten und einer Scanline wird als Spacing bezeichnet. Die Frequenz ist der reziproke Wert des Spacings. Vielfach wird aber auch das Spacing eines Kluftsets angegeben. Dabei wird der mittlere Abstand eines Sets rechtwinklig zu seiner Orientierung berechnet.

Rauigkeit:

Die Oberfläche einer Diskontinuität ist im Allgemeinen nicht eine perfekt planare Ebene. Um dem Rechnung zu tragen, werden meist zwei Angaben gemacht. Im Meter-Bereich spricht man von der Kurvatur/ Welligkeit. Diese versucht mit einer Wellenform die grobe Ausdehnung zu beschreiben. Im Millimeter- Zentimeterbereich wird die Rauigkeit meist mit dem JRC (Joint Roughness Coefficient) angegeben [Hoek, 2000][Braton und Choubey, 1977].

Öffnung:

Darunter versteht man die Distanz rechtwinklig zu den Diskontinuitätsflächen. Die Änderung der Öffnung in einer Diskontinuität kann auf den Versagensmechanismus Aufschluss geben, aber auch auf die anzunehmende Ausdehnung.

Blockgrösse:

Durch die Bestimmung von Diskontinuitäts- Sets wird die zu erwartende Blockgrösse berechnet. Dabei ist es meist hilfreich beide, die mittlere und die maximale Blockgrösse zu errechnen.

Bei der Gesteinscharakterisierung wird versucht sowohl qualitative wie auch quantitative Gesteinseigenschaften zu finden. Da meist die Zeit, das Geld oder die Möglichkeiten fehlen `alle` Gesteinseigenschaften herauszufinden, wurden in der Vergangenheit viele verschiedene Klassifikationsschemen entwickelt. Je nach Anwendung werden folgende Systeme am häufigsten verwendet: RQD, RMR, SMR, Q und GSI.

Hoek (1994) hat den GSI (Geological Strenght Index) eingeführt, welcher in Kombination mit den intakten Gesteinseigenschaften eine Abschätzung der Beanspruchbarkeit vom Gestein geben kann. Da das Spacing der Diskontinuitäten im Vergleich zur Grösse der einzelnen Strukturen im Untersuchungsgebiet klein ist, wurde für die vorliegende Arbeit dieses System gewählt um Aufschlüsse zu charakterisieren.

Die einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins wurde in einem ersten Schritt nach Hoek & Brown (1997) eingeschätzt. Aufgrund der bereits vorhanden Untersuchungen vom Augengneis und den Paragneisen der Region vom Mattertal [Thélin Ph., 1987; Willenberg H., 2004; Züger D., 2007]wurde auf eine eigene ausführliche Untersuchung mit Schmidt Hammer oder Point Load Test verzichtet.

2.1.1.3 Tektonische Disposition

Durch Scher- Zug- oder Kompressionsverformung entstehen bei tektonischen Prozessen duktile und spröde Störungszonen im Gestein, was im Festgestein zu Spannungsveränderungen führt. Die daraus entstehenden Strukturen wie Falten, Verbrüche oder Scherzonen können vielfach mit Hanginstabilitäten verknüpft werden

9

[Kellog, 2001; Badger, 2002]. Dabei müssen solche Störungszonen nicht voll persistent sein. Einstein et al. (1983) haben gezeigt, dass eine komplexe Interaktion zwischen präexistenten Diskontinuitäten und spröder Bruchpropagation durch intakte Gesteinsbrücken geschehen kann. Die Scherbeanspruchbarkeit entlang potentieller Versagensflächen ist teilweise durch den Fehler im intakten Gestein, anderseits durch Scheren entlang Diskontinuitäten bestimmt. Dieser Fehlermechanismus wird nach Jennings (1970) "step- path failure" genannt.

Falten oder geneigte Schichtung können stabilisierend wirken, Verbrüche dagegen die Entwicklung von Instabilitäten begünstigen. Fasani et al. (2004) haben gezeigt, dass die Bruchsysteme, welche für die Stabilität wichtig sind, stark von einem Verbruch abhängig sein können. Entlang ungünstig orientierter Kluftflächen bezüglich der Hangorientierung, können sich Kluftkörper ausbilden und sich aus dem Gesteinsverband lösen. Der Auslösemechanismus kann danach die Grösse des Versagens bestimmen [Brideau et al., 2009].

2.1.1.4 Geomorphologische Disposition

Der Hangwinkel kann einen grossen Einfluss auf die Hangstabilität hat. Je nach Art der Massenbewegung auch die Bewegunsmechanismen und die Kinematik ändern, werden unterschiedliche Hangwinkelspektren für kritisch betrachtet (Minimum Winkel):

- Sackungen: >0- 30 Grad
- Rutschungen (slumps): 5- 20 Grad
- Murgänge: 5- 30 Grad
- Fels-, Bergstürze: 25- 50 Grad

Daneben kann die Hangform in steilen Gebieten einen grossen Einfluss auf die Hangstabilität haben. In konvergenten Hängen können anfallende Wasser zusammenfliessen, so dass sich der Porenwasserdruck während der Schneeschmelze oder heftigen Niederschlägen stark erhöhen kann. Bei durch Erdbeben induzierte Hanginstabilitäten sind divergente Hangformen kritischer, da sich dort seismische Wellen reflektieren und polarisieren können.

2.1.1.5 Hydrologische Disposition

Bei Starkniederschlag Ereignissen oder Schneeschmelze kann der Porenwasserdruck im Gestein stark ansteigen und zum Versagen führen. In geklüftetem Gestein kann dies zur Reduktion der auf eine Trennfläche wirkende Normalkraft und damit zur Reduktion der Scherkraft führen [Atusushi et al., 2008]. Cho und West (2000) zeigten aber auch, dass die vertikale Druckkomponente, welche in Klüften beim Aufstauen von Wassersäulen entstehen kann, ebenfalls einen Einfluss auf die Hangstabilität hat.

Folgende Eigenschaften eines Niederschlags beeinflussen hauptsächlich die Wahrscheinlichkeit eines Hanginstabilitäts Ereignisses: 1. Totale Niederschlagsmenge 2. Sturmdauer 3. Kurzzeit Intensität 4. Antecedent storm precipitation. Typischerweise weisen höhere Bergregionen grössere Niederschlagsmengen auf. Somit könnte die Höhe über Meer einer Region ebenfalls als begünstigend für Hanginstabilitäten angesehen werden.

Die wichtigste physikalische Eigenschaft in Bezug auf Hangstabilität ist, die Eigenschaft des Bodens Wasser durch den Hang zu leiten und die Menge Wasser welche ein Boden aufnehmen kann. Handelt es sich um geklüftetes Gestein müssen seine Struktur, die Orientierung der Brüche und ihre Persistenz beachtet werden.

Bei den oben genannten physikalischen Eigenschaften ist sowohl die Infiltration wie auch der unterirdische Abfluss von Bedeutung, denn der Porenwasserdruck den sie generieren können wirkt sich negativ auf die Hangstabilität aus.

2.1.1.6 Morpho- Klimatische Disposition

Die Tiefenerorsion von Gletschern und Flüssen oder die fortschreitende Erosion des Hangfusses durch Flüsse sind eher langsam ablaufende Prozesse [Haeber et al., 1997; Baumgartner, 2007]. Dennoch bewirken sie eine Veränderung im Spannungszustand von Gesteinsmassen.

In glazial überprägten Tälern können durch das Abschmelzen der Gletscher und die damit verbundene Entlastung Spannungsänderungen im Gestein entstehen. Dabei können oberflächenparallele Klüfte entstehen, so genannte Exfoliationsklüfte, welche massgeblich an der Stabilität von Talflanken beteiligt sind. [Hoek und Bieniawski, 1984; Bahat et al., 1999].

2.1.1.7 Seismische Disposition

Der Auslösemechanismus `Erdbeben` wird noch weniger verstanden als zum Beispiel Regenstürme. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Frequenz niedriger ist und nicht alle Parameter bis ins letzte Detail verstanden werden. Im Gegensatz zu niederschlagsinduzierten Hanginstabilitäten ist bei einem Erdbeben eine konvexe Hangform kritischer [Harp et al., 1982]. Viele der grössten Bergstürze in Festgestein wurden durch Erdbeben ausgelöst [Keefer, 2002], wobei ein starkes Erdbeben auch noch in über 100km Entfernung Instabilitäten auslösen kann.

Das Wallis zeigt die höchste Gefahrenstufe für Erdbeben in der Schweiz [Giardini et al., 2004]. Die Herdflächenlösungen sind im Wallis auf eine Abschiebung mit Extension senkrecht zum Streichen der Alpen zurückzuführen. Die Spannungsverteilung ist daher im südlichen Wallis Nord- Süd. Nach dem SED können in der Schweiz Erdbeben bis M_w = 7.2-7.5 erwartet werden. Die Gefahrenkarte der Schweiz zeigt die zu erwartende horizontale Beschleunigung bei einem Erdbeben. Im Wallis liegt diese bei 0.15g mit einem Intervall von 475 Jahren (10% alle 50 Jahre).

Bei einem Erdbeben ist nicht nur die Amplitude massgebend, sondern auch die Dauer. Die Raumwellen (P- danach S- Wellen) treffen vor den Oberflächenwellen (Rayleighund Love- Wellen) ein. Scherwellen und Oberflächenwellen werden als die zu beachtenden Faktoren eines Erdbebens angesehen. Bay et al. (2003) konnten zeigen, dass die Amplitude und die Dauer von Erdbebenwellen in der Schweiz in etwa 60-70km steigen, durch reflektierte Wellen an der Moho.

Bei Erdbeben spielen verschiedene Mechanismen eine tragende Rolle. Die wichtigsten werden im Folgenden kurz beschrieben:

Bodenbewegung

Erdbebenwellen verursachen horizontale und vertikale Bodenbeschleunigung, welche die Erdanziehungskraft übersteigen können. Die zyklische Beanspruchung des Bodens hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab, wie Magnitude und Frequenz sowie der Herdtiefe eines Erdbebens.

Die Frequenz einer Erdbebenwelle ist unter anderem von der Ausbreitungsgeschwindigkeit, welche durch das Gestein bestimmt wird, abhängig.

Durch die Bestimmung des Elastizitätsmoduls, der Poissonzahl, des Schermoduls und der Dichte kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit im entsprechenden Medium berechnet werden. Dies gilt für intaktes, homogenes Gestein, nicht aber für stark geklüftetes Gestein. Typische Geschwindigkeiten für einen homogenen, intakten Granit $v_p \sim 5.6-6.3 \text{ kms}^{-1}/v_s \sim 2.5-3.8 \text{ kms}^{-1}$, für Gneis $v_p \sim 6.5-7 \text{ kms}^{-1}/v_s \sim 3.4-4 \text{ kms}^{-1}$. Boore und Joyner (1997) haben aber gezeigt, dass auf Grund eines starken Geschwindikeitsgradienten diese Werte oberflächennah stark abnehmen können, so dass diese nur noch wenig höher als in Lockergesteinen mit $v_p \sim 1.5-2.5 \text{ kms}^{-1}/v_s \sim 0.1-0.5 \text{ kms}^{-1}$ sein können.

Die maximale Magnitude im Wallis wird mit bis zu 7.5 angegeben. Mit M6.4 war das Erdbeben von 1855 das Grösste in der Region, wobei dies nicht auf Messungen zurückzuführen ist. Die Herdtiefe ist im Wallis in meist <15 km Tiefe, da die Rohne-Simplon- Störung zum Grossteil für die Entstehung der Erdbeben verantwortlich ist [H.R. Mauer et al., 2007].

Ein Berghang versagt, wenn die Scherbelastung entlang einer potentiellen Fehlerfläche die Festigkeit des Materials übersteigt. Die Stabilität hängt dabei stark vom Oberflächengradient, der Dichte des Materials, seiner Kohäsion und Reibung, der Tiefe der Versagensfläche, sowie der Erdbeschleunigung zusammen [Carson und Kirkby, 1972].

Erdbeben können die Stabilität in zwei Weisen beeinflussen: 1) Seismisches Rütteln kann die Kohäsion und die Reibungsfestigkeit eines Materials durch Bodenverflüssigung herabsetzten. Dieses Phänomen ist im Rahmen dieser Arbeit nicht von grösserer Bedeutung. 2) Kurzlebige, episodische Wechsel von Normal- und Scherspannungen können ein Versagen verursachen.

Topographischer Effekt

Topographische Verstärkung von Bodenbeschleunigung ereignet sich, wenn sich seismische Wellen, die in der Basis einer topographischen Erhebung eingetreten sind, sich zurück in das Gestein reflektieren oder an die freie Oberfläche ablenken. So können sich seismische Wellen stufenweise nach oben fokussieren.

13

Schräg einfallende seismische Wellen können ein Verstärkungs- Maxima weg vom Bergrücken in Berghänge, welche vom Epizentrum weg zeigen, führen. Dabei sind vor allem die steilsten Hangpartien, sowie Knickpunkte betroffen [Meunier et al., 2008].

Das Abrunden von Berggraten kann ein typisches Zeichen von Gegenden, welche von Erdbeben beansprucht werden, sein. Zudem ist der Felsen in Bereichen von Bergrücken meist stärker Verwittert als entlang des Hanges [Havenith et al. 2003], was zu einer Abnahme der Wellengeschwindigkeit führt und damit zu einer Verstärkung der Welle.

Nach Lewrence et al. (1973) ist der Topographieeffekt eine Funktion der Grösse des Berges, aus welcher Richtung die Welle kommt und der Wellenlänge selber. Der Topographie- Effekt scheint weniger wichtig, falls die seismische Wellenlänge viel grösser ist als die Dimension des topographischen Hindernisses.

Scott et al. (2002) sagen, dass der Topographieeffekt kleine Variationen zeigen und in der Grössenordnung um 50% ist. Bouchon und Barker (1996) kommen in ihren Studien um das Northridge Erdbeben für den Topographieeffekt auf Werte von 45% (3.2 Hz), 60% (5 Hz), 66% (10 Hz) und 100% (15 Hz). Sitar und Clough (1983) ermittelten bis zu 70% topographische Amplifikation an Bergkämmen. Der Topographieeffekt scheint eine klare Funktion der Frequenz zu sein. Dabei kann topographische Beschleunigung zu einem Gradienten entlang der Oberfläche führen und zu Zugkräften in Strukturen führen, welche sich über Gebiete mit unterschiedlichen Beschleunigungen erstrecken [Brennan und Madabhushi 2009].

In einigen Studie wird beschrieben, dass die Frequenz der Verstärkung an Bergkämmen annähernd mit eingehenden Wellenlänge zur Breite des Berges verglichen werden kann [Geli L. et al., 1988]. Lawrence L. et al. (1973) beschreiben, dass es für Scherwellen möglich ist Resonanz zu bewirken, wenn Wellenlänge und halbe Bergbreite übereinstimmen.

Bei topographischen Erhebungen kann die vertikale Komponente einer eingehenden Welle von Bedeutung sein. Ingles et al. (2004) zeigten, dass vor allem im Festgestein der Effekt der vertikalen Komponente in einer grösseren Verschiebung resultiert, als in einer Newmark- Berechnung angenommen.

Geologische Faktoren

D.M. Boore and W. B. Joyner (1997) zeigten ebenfalls, dass selbst innerhalb des gleichen Gesteins, je nach dessen Klüftung die Geschwindigkeiten seismischer Wellen stark variieren. In stark geklüftetem Gestein können Geschwindigkeiten auftreten, wie sie für Lockergesteine typisch sind. Zudem konnte gezeigt werden, dass der Geschwindigkeitsgradient nahe der Oberfläche im Festgestein grösser ist als im Lockergestein.

Leider war es nicht möglich die genauen seismischen Geschwindigkeiten des Untergrundes bei der Plattja zu messen. Sicherlich kann in einem ersten Schritt angenommen werden, dass durch die starke Klüftung im Gebiet eine starke Geschwindigkeitsabnahme und damit eine Beschleunigung und Polarisation stattfindet.

Seismischer Koeffizient

Der seismische Koeffizient wird vor allem im Zusammenhang mit Limit Equilibrium Berechnungen von Hanginstabilitäten verwendet. Dabei dient er zur Ermittlung des Sicherheitsfaktors. Mit diesem Koeffizient kann eine seismische Kraft, statisch auf einen gleitenden Block übertragen werden.

Der Schweizerische Erdbebendienst (SED) publiziert für die gesamte Schweiz die unterschiedlichen seismischen Koeffizienten [Giardini et al., 2004]. Es ist darauf hinzuweisen, dass nur horizontale Komponenten angegeben werden, da diese als kritisch betrachtet werden. In einigen Publikationen konnte allerdings gezeigt werden, dass vor allem in Berghängen und nahe Berggräten die vertikale Beschleunigungskomponente von Bedeutung sein kann [Chen et al., 2003; Ingles et al., 2006] und so die Stabilität eines Hanges herabsetzten würde.

Wie bereits erwähnt, ist im Untersuchungsgebiet eine horizontale Beschleunigung von 1.5 m/s² zu erwarten. Für die vertikale Beschleunigung wird in der Literatur meist ein Wert von einem Drittel der horizontalen Komponente angenommen. Neuste Beobachtungen von Starkerdbeben zeigen jedoch, dass zum Teil die vertikale Beschleunigungen die horizontalen überschreiten können.

15

2.1.2 Fotogrammetrische Methode

Strukturelle und geometrische Daten geologischer Aufschlüsse können mit digitaler Fotogrammetrie mittels der Software Shape Metrix 3D (3G Software & Measurement GmbH, Graz, Österreich) ausgewertet werden. Das Fernerkundungsverfahren erstellt aufgrund zweier digitaler Fotos ein 3D Modell. Die Fotos müssen dabei mit einer vom Softwarehersteller kalibrierten Linse von unterschiedlichen Positionen aufgenommen werden, um ein stereoskopisches Bildpaar zu erstellen. Zur Kalibrierung und Orientierung des erstellte 3D Modells, müssen auf den Bildpaaren Kontrollpunkte mit bekanntem Abstand und Orientierung zu sehen sein. Mit diesen Voraussetzungen erlaubt das Modell Distanzen, Flächen, räumliche Orientierungen von Diskontinuitäten schnell und übersichtlich herauszulesen. Ebenfalls ist mit der Software (SMX Reconstructor) die Bestimmung der Frequenz von Kluftsystemen in einem Aufschluss möglich. Als Nachteil sind Darstellungen kleiner Strukturen in einem grossen Aufschluss zu bezeichnen, da diese durch die Auflösung der Fotos verloren gehen können. Die Qualität der Fotos ist stark von den Lichtverhältnissen abhängig. Zudem können mechanische Eigenschaften von Trennflächen meist nicht aus den Fotos bestimmt werden.

2.1.3 Deformationsmessungen

2.1.3.1 Tape- Extensometer

Um vermutete Deformationsraten im Untersuchungsgebiet der Plattja, sowie die Bewegungsmechanismen entlang ausgewählter Trennflächen zu verstehen und zu messen, wurde ein langfristiges Kluftüberwachungssystem installiert. Die Resultate der Messungen sollen helfen die kinematischen Verhältnisse auf der Plattja besser zu verstehen. Diese ersten Messungen können als Nullmessung verstanden werden.

Die Messungen wurden mit einem digitalen Tape- Extensometer der Firma Slope Indicator durchgeführt. Dieses Gerät ermöglicht eine schnelle und kostengünstige Messung zwischen zwei Punkten und findet sowohl im Tunnelbau und bei der Überwachung von Kluftöffnungsraten Anwendung.

Die Längenmessung bedarf vorweg zwei Messbolzen, die in der gewünschten Richtung der Messung angebracht werden. Danach kann die Schublehre gespannt werden und die Distanz auf Hundertstel Millimeter abgelesen werden. Wichtig bei wechselnden Umgebungsbedingungen ist, dass bei der Distanzmessung auch die Temperatur des Messbandes gemessen wird, was eine temperaturabhängige Längenkorrektur ermöglicht [Slope Indicator, 2008]. In dieser Arbeit wurde die Temperatur des Messbandes mit einem Laserthermometer auf 0.1°C bestimmt und jede Messung vier Mal vollzogen. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei den Messungen nicht um absolute Distanzen handelt, da der Abstand zwischen zwei Messpunkten gemessen wird, mit dem Ziel Kluftöffnungsraten für das Gebiet zu erhalten. Bei einer

Längenmessung ist darauf zu achten, dass das Band möglichst den Untergrund nicht berührt und falls dies unumgänglich ist möglichst nur ein Felskontakt entsteht. Ansonsten können bei Wiederholungsmessungen nicht die gleichen Bedingungen garantiert werden.



2.1.3.2 Nivellement

Abbildung 1: Tape Extensometer PU15 Figure 1: Tape extensometer setup, PU15

Nivellement wird normalerweise Strassenbau im verwendet und eignet sich vor allem um Höhenunterschiede zu erkennen (Genauigkeit ~0.5 cm) und Winkelmessungen durchzuführen (Genauigkeit ~0.5 Grad). Die Distanzen zwischen den einzelnen Punkten wurde zum Teil mit Lasermessungen, vor allem aber mit dem Massband vorgenommen (Genauigkeit des Massbandes ~2 cm).

Sowohl die Genauigkeit, als auch die Aufnahmegeschwindigkeit könnten mit einem Tachymeter stark verbessert werden, wenn man die Punkte zusätzlich mit Felsnägeln markieren würde.



Abbildung 2: Nivellement, Plattja N-Seite Figure 2: Levelling setup, Plattja Nface

2.2 Analysemethoden

2.2.1 Orthofotos

Luftbilder, welche eine Transformation in ein orthogonales Koordinatensystem erfahren, werden Orthofotos genannt. Diese erlauben eine grossräumige geologische Analyse von Strukturen. In ArcGIS implementiert entsteht eine winkel- und massstabgetreue Abbildung.

2.2.2 DIPS 5.1

Dips 5.1 (Rocscience Inc., Toronto, Ontario) ermöglicht eine Visualisierung der im Feld aufgenommenen Strukturdaten mittels Stereonetz. Dazu werden die Messdaten tabellarisch erfasst, um sie graphisch dazugestellten. Die Software bietet die Möglichkeit die Messdaten auf potentielles strukturelles Versagen zu analysieren, falls gewisse geomechanische Aspekte erfüllt sind.

2.2.2.1 Geomechanische Aspekte

Das Verhalten von Festgestein in Hängen kann sehr komplex sein. Die Bestimmung der verschiedenen Versagensmechanismen werden vor allem durch die vorhanden Diskontinuitäten, Störungszonen und die mechanischen Eigenschaften des Gesteins bestimmt. Wichtig ist, dass neben den verschiedenen Auslösemechanismen auch das mechanische Verhalten und die damit verbundenen Bewegungsmechanismen der Gesteinsmassen verstanden werden [Goodman und Kieffer, 2000].

Mit stereographischer Projektion können Kluftsysteme analysiert werden und eine Stabilitätsanalyse durchgeführt werden. Neben den Kluftflächenorientierungen sind dabei auch variierende Hangneigungen zu berücksichtigen. Die Stabilitätsanalyse erfolgt unter Anwendung der Software DIPS 5.1 [RocScience Inc., 2009]. Planaras Gleiten, Keilgleiten sowie Blockkippen können mit DIPS graphisch analysiert werden. Die dabei durchgeführte Analyse basiert auf den theoretischen und mathematischen Grundlagen einer kinematisch- mechanischen Auswertung zerklüfteter Gesteinsmassen im Lambert`schen Stereonetz [Hoek und Bray, 1977]. Interne Deformation und die damit verbundene Bildung zusätzlicher Klüften werden bei dieser Analysetechnik nicht berücksichtigt. Im Untersuchungsgebiet konnten die folgenden Versagensmechanismen beobachtet werden. Bei den Auswertungen wird man nicht auf alle eingehen können, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde. (einige Beispiel: Abb.3-5).



Abbildung 3: Planares Gleiten auf Schichtung, `Plattja` Figure 3: Planar sliding on foliation, `Plattja`



Abbildung 4: Gleiten an steilen Klüften, `Plattja`N-Wand

Figure 4: Sliding on steep planes, `Plattja` N-face



Abbildung 5: (Rotations-) Blockkippen, `Plattja` N- Wand

Figure 5: (Rotational-) Toppling, `Plattja` N-face

Gleiten von Kluftkörpern

Dabei werden vor allem drei verschiedene Versagensarten unterschieden [Duncan und Mah, 2005]:

Planares Gleiten:

Folgende Kriterien müssen erfüllt sein, um gleiten auf einer planaren Rutschfläche zu erfüllen [Harrison und Hadson, 2000]:



Abbildung 6: Planares Gleiten, Dips 5.1 Figure 6: Planar sliding, Dips 5.1

- Die Einfallsrichtung der potentiellen Gleitfläche sollte in einem Winkel von ±20°
 zur Einfallsrichtung des Aufschlusses stehen
- Der Einfallswinkel des Aufschlusses muss grösser sein als jener der potentiellen Gleitfläche
- Das Einfallen der potentiellen Gleitfläche muss grösser sein als der Reibungswinkel der Gleitfläche.
- Die potentielle Gleitfläche muss im den Hang austreten oder in einen Zugriss enden.

Planares Gleiten kann tritt nur dann auf, wenn die Gleitfläche voll ausgebildet ist [Goodeman und Kiefer, 2000]. Mit der Software Dips 5.1 berücksichtig die oben erwähnten Kriterien unter Verwendung des Reibungswinkels und einer Austrittsumhüllenden, welche die Polpunkte aller Kluftflächen einschliesst, die bei der untersuchten Aufschlussorientierung an der Oberfläche austreten [Lisle, 2004]. Eine solche Analyse beachtet neben den kinematischen Bedingungen zusätzlich den Aspekt der Reibung und bildet damit eine elementar kinematisch- mechanische Analyse.

Keilförmiges Gleiten:

Die Voraussetzung für keilförmiges Gleiten ist in der Natur in einem weiterem Spektrum gegeben als planares Gleiten. Folgende Bedingungen müssen gegeben sein:



Abbildung 7: Keilgleiten, Dips 5.1 Figure 7: Wedge sliding, Dips 5.1

- Zwei sich schneidende Diskontinuitäten.
- Das Einfallen der Intersektionslinie muss flacher als die Hangneigung, aber steiler als der durchschnittliche Reibungswinkel der potentiellen Gleitfläche sein.
- Die Intersektionslinie muss aus dem Hang ausbeissen um gleiten zu erlauben.

Nach Goodan und Kiefer (2000) kommt Keilgleiten vor allem in konvexen Hängen vor.

Kreisrundes Gleiten:

Stark geklüftetes oder verwittertes Gestein verliert seine Struktur und die Gleitfläche kann sich den Weg des geringsten Widerstandes suchen. Beobachtungen in solchem Gestein nehmen dabei eine kreisrunde Gleitfläche an.

Rotations Rutschung (Slumping)

Wittke (1965) und Kieffer (1998) beschrieben dieses Phänomen als rückwärtige Rotationsbewegung, bei der sich Festgestein von der original Fläche- zu Fläche-Anordnung zu einer Ecke- zu Fläche- Anordnung ändert.

Blockkippen (Toppling)

Gilt als tiefgreifende Versagensart für einen Festgesteinshang, bei welchem die Blöcke oder Säulen in Richtung Hang einfallen [Goodman und Kieffer, 2000]. Zudem muss ein zweites Set von orthogonalen Klüften die Säulen schneiden.



Abbildung 8: Kippen, Dips 5.1 Figure 8: Toppling, Dips 5.1
Blockkippen kann aber auch sekundär auftreten, z.B. als Folge von Gleiten an der Basis (so genanntes Slide base toppling). Direktes Blockkippen beruht auf der Theorie, dass ein Drehmoment entsteht sobald der Schwerpunkt eines Gesteinsblockes ausserhalb seiner Grundfläche liegt. Dabei müssen zwei Kluftsysteme vorhanden sein, welche sich so schneiden, dass ihr Intersektionslinear in die Anrissfläche hinein zeigt. Zudem muss mindestens ein Kluftsystem welches die basale Trennfläche für direktes Blockkippen bildet und dessen Einfallswinkel kleiner dem Reibungswinkel ist vorhanden sein.



Abbildung 9: Verschiedene Arten von direktem Blockkippen und Rotationsrutschungen[Harrison und Hudson, 2000] Figure 9: Toppling and slumping by Harrison and Hudson (2000)

Block Torsion

Ist eine Versagensart bei der ein einzelner Block wegen eines Widerstandes statt zu gleiten sich um diesen Widerstand dreht.

Durch das Auftreten von Rotationsbewegungen im Untersuchungsgebiet können Mechanismen ändern. Veränderte Spannungsverhältnisse können dabei neue Kluftrichtungen entstehe lassen oder bestehende verändern. 3. Geländecharakterisierung

Im vorliegenden Kapitel wird das Untersuchungsgebiet charakterisiert. Einige der Dispositionen gelten für das gesamt Forschungsgebiet und werden unter Allgemein behandelt. Der Hauptteil der Arbeit konzentriert sich auf die Region um das Seetalhorn, daher wird diesem Gebiet speziell Rechnung getragen.

Allgemein 3.1

Tektonische Disposition 3.1.1

Südlich der Rhone- Simplonstörung ist maximale vertikale Spannung und N-S Extension verantwortlich für Erdbeben in der Normalverwerfung. Fast alle Erdbeben südlich der Rhone- Simplonstörung geschehen entlang oder oberhalb der basalen penninischen Verwerfung. Der Normalfault- Süddip kann mit 25- 60 Grad angenommen werden [Mauer H.R. et al. 1997].

Champagnac et al. (2004) zeigen Paleostress in den inneren Westalpen mehrheitlich entlang der alpinen Struktur (NE- SW). Sie kommen zum Schluss, dass es sich bei der Rhone- Simplonstörung um eine Normal- Verwerfung mit einer möglichen Komponente von dextralem Schersinn handelt. Ihre Studien ergeben für die Region um das südliche Oberwallis eine minimale Spannung σ_1 mit Orientierung N70°. Das Untersuchungsgebiet muss sich zumindest heutein einem differentiellen Stressregime befinden, betrachtet man die Spannungsachsen im Mattertal.

Tabelle 1: Spannungsachsen Mattertal Qualität **σ**1 σ2 σ3 Embd 202/81 303/02 033/08 1 210/71 Embd 309/03 040/19 2 250/12 Embd 088/78 341/03 3 St. Niklaus 152/05 034/79 243/10 2 Randa 107/73 287/17 017/00 1 105/59 3 Randa 241/24 340/19

Table 1: Stress tensors, Mattertal

Die synklinal eingequetschten Sedimente der St. Niklausmulde bilden im Bereich des gesamten Untersuchungsgebietes eine wichtige Struktur. Durch die Kartierung dieser Gesteine konnte festgestellt werden, das an ihrem Kontakt zum Augengeis ein Verbruch besteht (Abb.10). Dieser könnte für die Stabilität der Region, vor allem für die der Plattja von Bedeutung sein.



Die Geologische Karte von St. Niklaus und Randa zeigen für das Saaser- und Mattertal 55 kartierte Faltenachsen mit einer durchschnittlichen Orientierung der Faltenachsen: Streichen 251.5, Fallen 19.5 (Abb.11).

Strukturgeologisch sind in Bereichen von Synklinalen und Antiklinalen Längsklüfte zu erwarten, auf den Schenkeln Quer- und Diagonalklüfte (Abb.10). Somit würden im Untersuchungsgebiet strukturgeologisch Längsklüfte mit einem Streichen von No70 erwartet und Querklüfte mit N160 (Abb.12). Von den Spannungsrichtungen im Untersuchungsgebiet sind die Kluftrichtungen nicht eindeutig einzuteilen. Zugklüfte sollten danach steil mit +- N125 einfallen.



Abbildung 12: Faltenachsen (Richtung) Figure 12: Fold axis (strike)



Abbildung 11: Strukturelle Klüfte Figure 11: Structural joints

3.1.2 Morpho- Klimatische Disposition

Das Mattertal wurde während der letzten Eiszeit wiederholt von Gletschern bedeckt. Dabei schnitt sich der Gletscher tief in den Untergrund ein und formte die steilen Felswände der Talseiten. Die östliche Talseite kann als charakteristischer bezeichnet werden, da sie ein In-Dip- Hang ist. Für die maximale Gletscherhöhe während der letzten LGM kann im Bereich St. Niklaus eine Höhe von ~2800m.ü.M angenommen werden. [Meredith et al. 2004]. Damit sind die Bergspitzen um das Seetalhorn als Nunatak zu bezeichnen, wurden also nicht von einem Gletscher überfahren (Abb.13).

Die Plattja hatte eine maximale Eisüberlast von ca. 200- 300 m, was einem maximalen Überlastdruck von 2- 3 MPa entspricht. Die Oberfläche der Plattja ist im Untersuchungsgebiet die einzige Stelle, welche Gletscherschliff zeigt. In den obersten 2-3 m sind Entspannungsklüfte entlang der Foliation zu beobachten (Abb.14). Die Kanten der Grossklüfte auf der Plattja sind zum Grossteil nicht gerundet, was darauf schliessen lässt, dass der Hauptteil der Öffnung nach der LGM stattfand.



Abbildung 13: Eisbedeckung, LGM Figure 13: Ice cover at LGM



Abbildung 14: Entspannungsbrüche, `Plattja` N- Wand Figure 14: Decompression joints, `Plattja` Nface

Zwischen Kalpetran und Stalden kann aber auch Tiefenerosion durch Flussprozesse beobachtet werden, mit typischer V- Form. Unter diesen Gegebenheiten ist die Stabilität dort herabgesetzt, durch den entstanden Spannungsabbau.

3.1.3 Hydrologische Disposition

Das Untersuchungsgebiet liegt in der niederschlagsärmsten Region der Schweiz mit weniger als 550 mm/Jahr Niederschlag. Im Zusammenhang mit Starkniederschlagsereignissen ist zu erwähnen, dass der Rittigrabu als aktiver Murgangzug gilt [Stoffel et al., 2005]. Der Rittigrabu ist aber auch jener, der anfallendes Niederschlagswasser oberhalb der Plattja so abführt, dass die Plattja praktisch kein Einzugsgebiet besitzt.

Die Plattja besitzt grosse Klüfte, die bis zu 15- 20 m tief beobachtet wurden. Gegen unten sind die meisten Klüfte verschüttet und es kann angenommen werden, dass diese noch tiefer reichen. Falls diese Klüfte verstopfen, könnte sich Porenwasserdruck generieren, was sich in der Stabilität des Hanges auswirken würde. Da oberhalb der Plattja ein Blockgletscher liegt und die Region bekannt für Permafrost ist, könnte man sich Eislinsen als `Verstopfer` vorstellen. Diese konnten aber nie nachgewiesen werden. Zumal auch die Temperatur in den Rissen über dem Gefrierpunkt lag und das bei tiefen Aussentemperaturen (In der Nacht bei -3° C). Tiefgreifende Brüche können aber trotzdem eine Auskühlung des Gesteins bewirken und so zu erhöhten thermalen Spannungen im Gestein führen.

Grächen selber ist bekannt, dass es viele Trinkwasserquellen besitzt, welche vor allem in der tiefgreifenden Hanginstabilität aus lehmreichen Schichten entspringen. Die Wasserwege sind nicht klar und es muss mit tiefgreifenden Strukturen gerechnet werden. Tracertest haben gezeigt, dass Wasser unterhalb des Wannenhorns bei Illas (Stalden/ Abb.67, nördlich Kalpetran) wieder auftrat [Schnidrig A.L., 1949]

3.1.4 Gesteinscharakterisierung

Thélin (1987) gibt in seinem Bericht eine ausführliche Beschreibung des Augengneises von Randa. Darin beschreibt er, dass der Randa- Augengneis durch alpine Kataklase und Methamorphose (obere Grünschieferfazies) in der Permzeit intrudierte. Der Lakkolith enthält alle Merkmale für ein Intrusivgestein: diskordanter Primärkontakt, Injektionsaplite und feinkörnige Randfazies. Diese Beobachtungen konnten auch im Feld gemacht werden, im Schalbettugrabu (630450/113520) auf einer Höhe von ~1900 m.ü.M (Abb. 15).

3.1.4.1 Augengneis von Randa

Der Augengneis von Randa ist oberhalb von ca. 1900 m.ü.M. praktisch im ganzen Untersuchungsgebiet anzutreffen. Es handelt sich um einen feldspatreichen (50- 70%) Gneis welcher ca. 20- 30% Quarz und etwa 10% Glimmer enthält [Thélin, 1987]. Die Feldspatklasten haben meist einen Durchmesser von 1- 2cm können aber bis zu 5cm gross sein. Die Schieferungsflächen werden hauptsächlich von Chlorit und Biotit gebildet.

Sind die Aufschlüsse gross genug findet man im Abstand von 10 (- 20) m schieferungsparallele Scherzonen. In diesen Zonen verstärkt sich die Schieferung und die Augen werden gelängt. Das Gestein hat schieferartiges Aussehen mit einer dunkel (Chlorit/ Glimmer) hell (Feldspat/ Quarz) Bänderung. Solche Scherzonen können 10-100 cm mächtig und >50m persistent sein und weisen meist einen graduellen Übergang in den Augengneis (meist wenige Meter) auf.

Auf eine detaillierte geomechanische Gesteinsbeschreibung wurde verzichtet, da eine solche durch Girod (1999), Willenberg (2004) und Züger (2007) bereits vorliegt. Folgende Werte werden für die Modellierungen/Berechnungen übernommen:

intaktes Gestein	Eigenschaft	Wert	Einheit
Augengneis	Dichte	2640	kg m⁻³
	Youngs Modulus E	32	Gpa
	Poisson ratio	0.21	
	USC	120	Мра
	innerer Reibungswinkel	55	0
	Kohäsion	20	MPa
Paragneis	Dichte	2700	kg m ⁻³
	Youngs Modulus E	21	Gpa
	Poisson ratio	0.14	
	USC	80	Mpa
	innerer Reibungswinkel	45	0
	Kohäsion	15.3	MPa

Table 2: Rock parameters Tabelle 2: Gesteinsparameter

3.1.4.2 Sedimente der St. Niklaus Mulde

Diese Gesteine befinden sich im Untersuchungsgebiet direkt unter den Augengneisen und bilden somit ihre Basis. Es handelt sich dabei vor allem und zwei unterschiedliche Lithologien, einen Quarzit und einen karbonatführenden Chlorit- Sericit Schiefer. Im Forschungsgebiet konnten diese Sedimente nur in der Region um Schallbettu anstehend beschrieben werden (Abb.15). Die synklinal eingequetschten Sedimente wurden tektonisch stark beansprucht. Allgemein kann festgehalten werden, dass dieses Gestein das am stärksten geklüftete des Untersuchungsgebietes ist. Es besitzt den tiefsten GSI und kann für die Stabilität als eine kritische Komponente angesehen werden. Da grossmassstäblich die Sedimente der St. Niklausmulde als weiche Gesteine gelten, auf welchem härte Gesteine (Augengneis von Plattja) liegen.



Abbildung 15: Aufschluss von den Sedimenten der St. Niklausmulde Figure 15: Outcrop of the Sediments from St. Niklaus

3.1.4.3 Paragneise

Diese sind in der Region um Kalpetran und im Bereich des Distelhorns aufgeschlossen. Es handelt sich um einen Zweiglimmer Paragneis der Bernhartdecke, welcher chloritoder quarzreich sein kann.

Die Gesteinseigenschaften wurden durch Willenberg (2004) bestimmt und können für diese Arbeit übernommen werden, da sie von untergeordneter Bedeutung sind (Tabelle 2).

3.1.5 Geotechnische Situation: Grossstrukturen

Um einen Überblick über die gesamte Region zu bekommen, wurde mittels Luftbilder auf der Ostseite des Mattertals Lineamente kartiert. Dabei kann die Streichrichtung herausgelesen werden, nicht aber ihr Fallen. Es wurden vorwiegend Nord- Süd streichende Grossstrukturen aufgenommen (Abb.16).

Die kartierten Strukturen bei der Bergkette um das Seetalhorn zeigen dagegen ein andere Orientierung (Abb.17). Grossstrukturen, welche sich im Gebiet des DSGSD befinden, sind mit Vorsicht zu interpretieren, da diese verrutscht sein könnten (Bereich Durlochhorn).

Im Bereich zwischen Wannen- bis Seetalhorn fallen drei Faltenachsen in das Untersuchungsgebiet ein (nicht eigene Feldbeobachtung). Sowohl das nördliche wie auch das südliche Abrissgebiet des DSGSD von Grächen werden durch diese Faltenachsen begrenzt (Abb.10). Zwischen Seetal- und Distelhorn fällt eine Antiklinale ein südlich zwei weitere Faltenachsen mit ~300m Entfernung. Es kann in diesem Gebiet von zylindrisch, stumpfwinklig, offenen Falten mit geringer Amplitude gesprochen werden. Im Feld sind diese kaum zu sehen, da die Schieferung nur geringfügig ändert.



Abbildung 17: Lineamente Figure 16: Lineaments, east- Mattertal



Abbildung 16: Grossstrukturen Figure 17: Lineaments, Seetal- ridge

3.1.6 Gebirgseigenschaften

Felsmassen können nach unterschiedlichen Methoden klassifiziert werden. Um Felsmassen anhand von Feldbeobachtungen zu klassifizieren, ist der Geological Strength Index (GSI) geeignet [Hoek et al., 1996]. Die Charakterisierung beruht auf dem visuellen Eindruck (Persistenz, Spacing,...) sowie auf der Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Diskontinuitäten (Rauigkeit, Verwitterungsgrad,...).

Bei Untersuchungen im Feld wurde das Untersuchungsgebiet in fünf Klassen nach GSI unterteilt (Abb.18). Grossmassstäblich kann das Untersuchungsgebiet mit G2- G4 charakterisiert werden. G1 stellt die kleinmassstäbliche Felsqualität dar. G5 wurde im Bereich des Schalbettugrabu in den Sedimenten der St. Niklausmulde kartiert.



G1 ist eine Abbildung der Plattja N- Seite. Zwischen den Schichtungsabständen stellt die Felsqualität in dieser Region die beste im Untersuchungsgebiet dar.

Ein Grossteil des Gipfelaufbaues des Seetalhorns kann mit der Felsqualität G2 charakterisiert werden.

G3 (hier Südgipfel des Distelhorns) ist die wohl häufigste Gesteinsklasse im Untersuchungsgebiet. Im Unterschied zu G2 ist die Blockgrösse mit durchschnittlich 0.25-1 m³ wesentlich kleiner.

G4 (hier Nordseite Durlochhorn) stellt eine sehr stark geklüftete Felsmasse dar. Im Feld ist zum Teil der Unterschied von anstehendem Gestein und Lockergestein kaum auszumachen. Diese Gesteinsklasse ist sehr anfällig auf zusätzliche Belastung und kann daher für die Stabilität im



Untersuchungsgebiet als kritisch angesehen werden.

G5 wurde `nur` im Schalbettugrabu gefunden. In den Sedimenten der St. Niklausmulde ist diese Gesteinsklasse Teil eines Verbruches. Für die grossräumige Stabilität der Plattja könnte dieser Verbruch an dessen Basis entscheidend sein.

3.1.7 Seismische Disposition

Das Wallis ist die Region mit dem seismisch grössten Potential in der Schweiz, mit einer Magnitude 6 oder grösser, alle 100 Jahre.



Abbildung 19: Erdbeben M6+ im Wallis Figure 19: Earthquake M6+ in Wallis

Montandon und Staub (1949) zeigen in ihren Studien mit der Zusammenstellung von Erdbeben seit 1295 weitere Erdbeben mit Intensitäten >V und geben damit eine Idee über die Erdbebenaktivität des Oberwallis. In der Region um das Epizentrum des Erdbebes von 1855 (Törbel, Mw=6.4) wurden einige Jahre vor dem Hauptbeben Intensitäten von V bis VII wahrgenommen. Die etlichen Nachbeben erreichten ebenfalls Intensitäten bis VIII. Zwischen 1837 bis 1924 wurden beispielsweise neben dem Erdbeben von 1855 mindestens vier weitere Erdbeben der Intensität VIII und höher wahrgenommen (1837, VIII- IX, Brig/ 1874, VIII, Zermatt/ 1880, VIII, Brig/ 1924, VIII- IX, Visp).

Der Winter 2008/ 09 war seismisch gesehen in der Region des Untersuchungsgebietes sehr ruhig. Zudem wurde die Station beim Seetalhorn zu nahe an der Bahn installiert, so dass diese Daten eine starke Störung erfuhren. Daher sind diese Daten zur Bestimmung eines Topographieeffektes nicht verwendbar.

Im Untersuchungsgebiet konnte bis heute kein Starkerdbebenereignis aufgenommen werden. Daher müssen Daten von anderen Ereignissen genommen werden. Folgende Kriterien mussten erfüllt sein:

Erdbebenmechanismus: Normal Verbruch Magnitude: 5.8- 7 Herdtiefe < 20 km Station: Typ A (Hartgestein mit v_s>800 m/s) Folgende Ereignisse entsprechen diesen Anforderungen und wurden für die Untersuchungen bearbeitet:

Irpinia: 1980-11-23/ M_w 6.9/ Station: ALT, 23.8 km vom Epizentrum Val Comino: 1984-05-07/ M_w 5.9/ Station SCF, 63.6 km vom Epizentrum L`Aquila: 2009-04-06/ M_w 6.3/ Station: ANT, 23 km vom Epizentrum Station AQG, 4.4 km vom Epizentrum

Für die Stabilitätsberechnungen sind die maximalen Beschleunigungen eines Erdbebens und die Dauer, vor allem jene oberhalb der kritischen Beschleunigung, von grossem Interesse.

Starkbodenbewegungen (strong motion) werden in drei Komponenten aufgenommen. Nord- Süd, West-Ost und vertikal. Für die Stabilitätsberechnung sind diese Richtungen jedoch nicht massgebend, da ein Hang und die Gleitfläche eine gewisse Orientierung hat. Daher wurde im Fall der Plattja die Komponenten der Bodenbewegungen auf 220 Hangorientierung) umgerechnet. Berücksichtigt Grad (in man bei den Starkbodenbewegungen nicht nur eine Richtung sondern kombiniert man diese, kann der wahre Vektor berechnet werden. Zudem erfährt jedes Erdbeben schon bei seiner Entstehung eine gewisse Polarisierung durch die Art und Intensität des Mechanismus. Da der Ursprungsort und die Verbruchsorientierung eines Erdbebens meist nicht bekannt sind, sollte die Analyse das gesamte Spektrum der Erdbebenwellen enthalten. Für die Stabilität eines Hanges mit einer bestimmten Gleitrichtung kann dies von grosser Bedeutung sein.

3.2 Kalpetran

3.2.1 Geologische Disposition

3.2.1.1 Fels- Charakteristika und Verwitterung

Schon der Name der Ortschaft, welcher aus dem keltischen als `Felsenweg` übersetzt werden kann, deutet auf die Gefahren im Dorf hin. Ebenfalls der Auszug aus der synthetischen Gefahrenkarte zeigt, dass sich etwa die Hälfte des Dorfes im Stein- und Felssturzgebiet befindet. Befragungen im Dorf ergaben, dass im Gebiet um die Kapelle bei welcher der Seismometer aufgestellt war, sich früher ein Murgang ergeben hat. Die Ablagerungsmächtigkeit wird bei der Kapelle auf 10- 15 m geschätzt.



Figure 20: Profile, Kalpetran Abbildung 20: Profil bei Kalpetran

In der Schlucht unterhalb von Kalpetran ist das oft stark angewitterte Basisgestein aufgeschlossen. Es handelt sich um einen Zweiglimmergneis des Mischabel-Kristallins. Dabei ist zu erwähnen, dass nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, ob alles anstehend ist.

3.2.2 Geotechnische Disposition

Auf der östlichen Talseite wurde von lokalen Geologiebüros strukturelle Analysen durchgeführt. Diese und eigene Feldbeobachtungen fliessen hier mit ein. Die Schichtung fällt S- SW mit durchschnittlich 15- 20 Grad ab. Damit ist die östliche Seite der Mattervispa als Out Dip Slope zu bezeichnen. Das Gestein in der Schlucht unterhalb von Kalpetran ist geprägt von Abfolgen mit kompaktem Gestein, welches alle 2- 4 m durch Scherzonen (10- 20 cm Mächtigkeit) entlang der Schichtung abwechseln. Zwischen diesen Scherzonen werden oft grosse keilförmige Ausbrüche beobachtet. Regional ist das Gestein überall durch persistente Klüfte gekennzeichnet, diese können aber eine grosse Streuung aufweisen. Vor allem die westliche Seite, auf welcher sich Kalpetran befindet, zeigt grosse lokale Heterogenität auf. Daher kann nicht mit Bestimmtheit gesagt werden was anstehend ist, zumal die Westseite auch stark verwachsen ist.

K2 mit seinem Untersystem sind das am häufigsten auftretende System, mit einer mittleren, teils hoher Persistenz.

K₃ besitzt eine sehr grosse Persistenz und hat ebene raue Flächen.

K1 tritt häufig auf, besitzt aber eine niedere Persistenz.



Abbildung 21: Klüfte bei Kalpetran Figure 21: Joint sets, Kalpetran

Es konnten mindestens zwei Schieferungen beobachtet werden. Dabei stellt SS wohl die ursprüngliche Schieferung dar, sie ist am häufigsten anzutreffen. SS` stellt eine jüngere Schieferung dar, da sie SS durchschlägt.

3.2.3 Seismische Disposition

Die seismischen Schwingungen von Kalpetran sollten als Basisschwingung ohne Verstärkung gelten. Da sich die Kapelle nicht auf Basisgestein befindet sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Die Kapelle befindet sich auf 10- 15 m feinem Murgangmaterial mit Kies und wenig Blöcken.
- Das Gestein unter Kalpetran ist stark geklüftet und zumindest teilweise nicht anstehend.

Daher ist der Standpunkt der Kapelle nicht als ideal anzusehen. Um eine Basisschwingung der näheren Umgebung zu erhalten, wäre ein anderer Standpunkt (Stalden/ Stägjitschugg) zu bevorzugen, da durch die Geländegegebenheiten eine Verstärkung der Schwingung zu erwarten ist.

3.3 Grächen

3.3.1 Geologische Disposition

3.3.1.1 Fels- Charakteristika und Verwitterung

Grächen liegt auf der tiefgreifenden Hanginstabilität und zeigt daher keine Aufschlüsse. Die Charakterisierung dieser Region ist sehr schwer, da es nur wenig Informationen über deren Untergrund gibt. Baugrunduntersuchungen im Dorf ergaben, dass sich unter den Aufschüttungen Moränenmaterial befindet, welches ab einer Tiefe von 3.5 m nass ist [Bureau d`etudes geologiques SA]. Die Profile welche Noverraz et al. (1998) durch Studien im Gebiet erstellt haben, zeigen eine Tiefe der Rutschfläche von etwa 200 m. Die Studien gehen von einer interglazialen langsamen Rutschung aus, welche durch seismische Impulse für Bergstürze verantwortlich sein kann.



Abbildung 22: Profil Grächnerberg [Noverraz et al. 1998] Figure 22:: Profile Slope of Grächen [Noverraz et al. 1998]

3.3.2 Geotechnische Disposition

In der Region um das Dorf konnten durch die Verbauung keine strukturellen Informationen gewonnen werden. Im Bereich um Grächen sollten Zweiglimmergneise des Mischabel- Kristallins und oberhalb Sedimente der St. Niklausmulde aufgeschlossen sein. Erst ab einer Höhe von etwa 1900 m.ü.M. sind die ersten Aufschlüsse zu finden. Diese Aufschlüsse befinden sich am Kontakt der Sedimente der St. Niklausmulde zum Augengneis. Oberhalb von Gasenried konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- Zum Kontakt hin nimmt die Qualität der Gesteine stark ab. Das Gestein ist stärker geschiefert und geklüftet.
- N-S streichende <30 m persistente praktisch senkrechte Klüftung mit einem Spacing von ~3 m.
- Die lithologische Abfolge am Kontakt lässt auf einen Verbruch in den Sedimenten der St. Niklausmulde schliessen, welcher flach gegen Osten einfällt (Abb.10).

Das Geologiebüro Odilo Schmid und Partner schreibt in ihrem Bericht von zwei Bohrungen bei der Mittelstation der Sesselbahn, das in den 25 m tiefen Bohrungen kein Festgestein vorkam. Sie trafen auf zwei Feuchtstellen und konnten die Auftauschicht auf 8 m Tiefe festlegen, die Permafrostbasis unterhalb 25 m. Inklinometermessungen ergaben, dass die grössten Verschiebungen unterhalb 19 m gefunden wurden und daher die Gleitbasis tiefer anzunehmen ist.

3.3.3 Seismische Disposition

Da Grächen auf einer tiefgreifenden Hanginstabilität liegt und nicht genau bekannt ist, wie der Unterbau aussieht ist diese Region seismisch sehr schwer zu charakterisieren. Es sind momentan keine Angaben zu seismischen Geschwindigkeiten der Region Grächen bekannt. Es müssten weitere Studien durchgeführt werden, welche die DSGSD von Grächen betreffen (SED arbeitet daran). Nur mit einem besserem Wissen über die Tiefe der Sackung und den strukturellen Aufbau der Gesteine, die Teil der Rutschung sind können bessere Erkenntnisse über das Verhalten seismischer Wellen in dieser Region erlangt werden.

Das Erdbeben von 1855 hat gezeigt, dass der Untergrund bei Grächen stark in Mitleidenschaft genommen wurde. Dies spricht für einen DSGSD von beträchtlicher Tiefe.

Um einen topographischen Effekt aus den gesammelten seismischen Daten zu erlangen, sind daher die Standpunkte Kalpetran und Grächen, wie sie ausgewählt wurden, nicht ideal. Beide Standorte zeigen spezielle ortsspezifische Gegebenheiten, um eine Verstärkung der eingehenden Wellen zu ermöglichen. Da aber die Regionen nur unbefriedigend charakterisiert werden können, ist es momentan schwer bis unmöglich den topographischen Effekt herauszulesen.

3.3.4 Deformationsmessungen

Noverraz et al. (1998) haben als erste eine Grössenordnung für die Bewegungen der tiefgreifenden Hanginstabilität gegeben, indem sie neun Vermessungspunkte 52 Jahre nach dem ersten Vermessen neu eingemessen haben. 1930 wurden neun Standorte mit Triangulation eingemessen, welche 1992 durch die EPFL mit GPS (System 200, Leica) neu bestimmt wurden. Die Bewegungen der Sackung bei diesen Standorten zeigen Grössenordnungen von 2.5- 8 mm pro Jahr. Lokal sind aber grössere Bewegungen möglich.

Im Bereich der Seetalhorn- Gondelbahn konnten Mastenbewegungen von bis zu 10 cm pro Jahr ausgemacht werden [Odilo Schmid und Partner]. Dies zeigt die grosse Heterogenität der Bewegungen, aber auch deren Sensibilität auf eine erhöhte Beanspruchung, wie hier durch die Last der Masten.



Abbildung 23: Hangbewegungen des DSGSD (Grächen) [rechts IPTA Messungen um Plattja] Figure 23: Slope movements DSGSD / IPTA measurements on Plattja

Weiter wurden IPTA Messungen im Untersuchungsgebiet gemacht. Diese zeigen verschiedene Regionen mit erhöhter Bewegung. Die grössten Bewegungen sind auf aktive Blockgletscher oder steile Permafrostzonen zurückzuführen und zeigen Bewegungen von einigen Zentimeter bis Dezimeter pro Monat. Der Bereich des Grächnerwaldes zeigt Bewegungen von 0.5- 1 cm pro Jahr, was in etwa den Berechnungen von Noverraz et al. (1998) entspricht und als durchschnittliche Geschwindigkeit der Sackung angenommen werden kann. Die IPTA Messungen sind für den Bereich oberhalb der Waldgrenze als flächendeckende Bewegungsmessungen gut geeignet. Einschränkend sind jedoch kleine Bewegungen in vertikaler Richtung besonders gegen Süden, da InSAR hier die geringste Auflösung hat.

3.4 Seetalhorn

3.4.1 Geologische Disposition

3.4.1.1 Fels- Charakteristika und Verwitterung

Die Bergkette um das Seetalhorn erstreckt sich über 4 km. Der Grossteil besteht aus Augengneis, das Distelhorn allerdings aus Paragneisen und ein Teil des Wannenhorns aus Sedimenten der St. Niklausmulde. Oberhalb von Gasenried (Weiler Schalbettu) sind ebenfalls Sedimente der St. Niklausmulde aufgeschlossen, welche als synklinal eingequetschte Gesteine, die lokale Basis für die Augengneise darstellen. Ein Grossteil der Region um das Seetalhorn ist geprägt durch ausgedehnte Geröllfelder. Oberhalb von ~1800m.ü.M sind nur wenige Aufschlüsse zu finden, zumal ein Grossteil des Gebietes auch Teil der DSGSD ist. Durch diese Geröllfelder ist eine Charakterisierung des Untergrundes erschwert, zeugen sie aber auch von der Aktivität der Region. Geröllfelder ermöglichen eine Auskühlung des Bodens und eine verstärkte Verwitterung des Untergrundes.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Region der Plattja gelegt, da sich diese ausserhalb der DSGSD von Grächen befindet und dieser stark geklüftete Felskopf die grösste zusammenhängende Felsmasse im Gebiet ist (Abb.24).

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass Aufschlüsse von Augengneis in der ganzen Region als nur gering verwittert bezeichnet werden können. Die Gesteine der St. Niklaus Mulde weisen dagegen einen höheren Verwitterungsgrad auf.



Abbildung 24: Luftaufnahme der Plattja Figure 24: Aerial picture, Plattja

3.4.2 Geotechnische Disposition

Die Schichtung besitzt im gesamten Gebiet eine grosse Persistenz. Sowohl im Paragneis wie auch im parallel Augengneis konnten Scherzonen zur Schieferung, mit einem Spacing von 3- 10m ausgemacht werden. Die Hauptkluftsysteme im Untersuchungsgebiet bilden in E-W Richtung eine Art Diamantstruktur, in N- S eine schräge stupfwinklige



Abbildung 25: Übersicht Kluftsysteme 3D (isometrisch) Figure 25: Model of joint sets in 3D

Pyramide. Sowohl N-S wie auch E-W sind diese Klüfte für die Bildung von Bergrücken und Täler verantwortlich (Abb.26).

Wie schon erwähnt wurde der Region um Plattja spezielle Beachtung geschenkt. Dieser Felskopf ist ausserhalb der tiefgreifenden Hanginstabilität und stellt den grössten zusammenhängenden Gesteinskomplex der Region dar. Der ganze Fels ist stark geklüftet mit Diskontinuitäten von mehreren Metern Tiefe, Länge und Öffnungen von 1m und mehr. Da das Gebiet eine Fläche von 30`000 m² verteilt auf mehrere Terrassen mit Höhenunterschieden von mehr als 10 m aufweist, ist es schwer zu kartieren. Daher wurde mittels Nivellement eine Art Koordinatennetz übergelegt. Dieses erlaubt es eine Art Window- mapping durchzuführen, was eine systematische und statistische Auswertung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften von den Kluftsystemen auf der Plattja erlaubt [Harrison und Hudson, 2000; Priest, 2004]. Mit der Software DIPS 5.1 von RocScience [RocScience Inc., 2008] können die Daten anschliessend ausgewertet und falls erwünscht mit den Daten der photogrammetrischen Analyse kombiniert werden.

Geotechnisch kann die Felsqualität im gesamten Untersuchungsgebiet in zwei Grössenordnungen beschrieben werden. Im Kleinen, 5- 15 m und grossmassstäblich. Der Augengneis kann im Kleinen, ebenfalls in zwei Stufen beschrieben werden. Zwischen den einzelnen Schichtungspaketen kann der Fels mit der Gesteinsklasse G1 charakterisiert werden. Die Schichtungsflächen sind die eigentlichen Schwachstellen des Gesteins. Sie weisen einen erhöhten Anteil an Chlorit auf und sind stark geschiefert. In dieser Arbeit wird die Festigkeit dieser Schichten derer eines Chloritschiefers gleichgesetzt.

3.4.2.1 Seetalhorn

Die geotechnische Beschreibung des Seetalhorns beruht auf drei Feldbegehungen und fünf Shape Metrix Modellen.

Der Gipfelaufbau des Seetalhorns reicht von 3037 m.ü.M nördlich hinunter bis 2600m.ü.M.. Die Felsqualität kann in zwei Grössenordnungen unterschieden werden. Im kleinen Massstab wie oben beschrieben. Im Grossen können drei Regionen unterschieden werden. Das obere Drittel des Seetalhorns besitzt mit G2 die beste Felsqualität, der Mittelteil mit G4 die geringste. Die Basis des Seetalhorns kann mit G3 charakterisiert werden.



Abbildung 26: Seetalhorn, Gipfelaufbau (Ost- West, Nord- Süd, Stereoplot) Figure 26: Seetalhorn with main joints

Die geotechnische Charakterisierung des Seetalhorns beruht auf der Auswertung von

187 Messungen:

Table 3: Joint sets, Seetalhorn Tabelle 3: Kluftsystem, Seetalhorn

	Orientierung	Beschreibung		
		Persistenz: 20- 50m		
	237/ 23	Spacing: 5- 7m		
		rauh, ebenmässig		
	205/ 24	Persistenz: 5- 15m		
К1	(116/00)	Spacing: 5m		
	(116/88)	Harnische, ebenmässig		
		Persistenz: 10- 15m		
К2	091/79	Spacing: 10m		
		rauh, ebenmässig		
		Persistenz: 5-10m		
КЗ	009/53	Spacing: 3- 7m		
		rauh, ebenmässig		
		Persistenz: 5- 10m		
K4	029/82	Spacing: 15m		
		rauh, ebenmässig		

Figure 27: Joint sets, Seetalhorn Abbildung 27: Kluftsysteme, Seetalhorn



Die Kluftsets K1 und K4 sind die bestimmenden Diskontinuitäten im Bereich des Seetalhorns. Die Auswirkungen und das Verhalten der Gesteinsmassen mit diesen Voraussetzungen werden später unter dem Kapitel 3.4.3 Geomechanische Disposition behandelt.

Im Bereich des Seetalhorns konnten zudem einige Grossstrukturen kartiert werden: (341/41), (315/40), (005/51), (017/44) und (213/31)

3.4.2.2 Distelhorn

Die Aufschlüsse beim Distelhorn sind nur erschwert zugänglich. Die strukturelle Charakterisierung beruht daher auf einem Shape Metrix Modell, bei welchem die Fotos aus ca. 300 m Distanz gemacht wurden.



Abbildung 28: Distelhorn, Stereoplot Figure 28: Distelhorn with main joints

Die Strukturelle Analyse beruht im Bereich des Distelhorns vor allem auf die Bestimmung der Hauptkluftsysteme (28 Messungen):

Table 4: Joint sets, Distelhorn Tabelle 4: Kluftsystem, Distelhorn

	Orientierung	Beschreibung
VII	249/46	Persistenz: 10- 30m
КП	248/ 40	Spacing: 10m
1/1	303/ 87	Persistenz: 5- 10m
KI	(123/87)	Spacing: 5m
	(093/80)	Persistenz: 10- 15m
κz	273/85	Spacing: 10m
142	002/52	Persistenz: 5-10m
K3	003/ 52	Spacing: 3- 5m
К4	024/72	Persistenz: 10m
	024/73	Spacing: 15m

Figure 29: Joint sets, Distelhorn Abbildung 29: Kluftsysteme, Distelhorn



Das Gestein hat untypisch für die gesamte Region einen hohen Verwitterungsgrad. Die gesamte Westwand ist stark Steinschlaggefährdet. Die Schieferung und KH besitzen den höchsten Durchdringungsgrad im Gebiet und dominieren somit die Eigenschaften des Gesteins. Die Hauptkluftsets sind auch im Paragneis des Distelhorns ähnlich wie im Augengneis des übrigen Untersuchungsgebietes. Generell ist der Fels blockig, teilweise zerstört und wird grossmassstäblich mit der Gesteinsklasse G3 charakterisiert.

E

3.4.2.3 Durlochhorn

Im Bereich des Durlochhorns wurden 5 Feldbegehungen gemacht und vier Shape Metrix Modelle. Ein Grossteil des Durlochhorns ist nur bedingt zugänglich da die Region sehr brüchig und steil ist (40 Messungen).

Grossstrukturen: (340/60), (040/60)

Table 5: Joint sets, Durlochhorn Tabelle 5: Kluftsystem, Durlochhorn Figure 30: Joint sets, Durlochhorn Abbildung 30: Kluftsysteme, Durlochhorn



Abbildung 31: Durlochhorn Nord Seite, Stereoplot Figure 31: Durlochhorn N- face, main joints

Vom Durlochhorn geht die optisch grösste Gefahr für die Gemeinde Grächen aus. Der Sockel des Durlochorns besitzt mit G2 die beste Felsqualität. Der Mittelteil ist stark geklüftet und wird mit der Felsklasse G4 charakterisiert. Der Gipfelaufbau ist gekennzeichnet durch persistente tiefgreifende Klüfte und kann als blockig mit einer Felsklasse von G3 klassiert werden. Das Kluftsystem K2 ist am Durlochhorn besonders stark vertreten und bestimmt mit der Schichtung das Verhalten des Felskopfes.

3.4.2.4 Plattja

Zur geotechnischen Bestimmung der Situation bei der Plattja wurden 207 Messungen ausgewertet. Um die Klüfte auf der Plattja zu bestimmen und zu charakterisieren wurde Mittels Nivellement die Klüfte aufgenommen und beschrieben. Die Nordwand wurde anhand mehrerer Shape Metrix Modellen charakterisiert.



Abbildung 32: Kluftsets Plattja N- Wand

Figure 33: Joint sets N- face of Plattja



Abbildung 33: Kluftaufnahme mit Nivellement und Hangneigung durch 3D Modell Figure 32: Joint traces with precision leveling and slop dip form 3D Model

Im Kleinen kann die Felsklasse G1 angenommen werden, nur in den Scherzonen parallel zur Schichtung (Spacing 7- 10 m) ist die Felsqualität lokal geringer (G3).

Folgende Kluftsysteme konnten unterschieden werden:

Mittels Nivellement konnten 109 Messungen zur Charakterisierung der Plattja

beigetragen werden.

Grossstrukturen: (040/80), (155/80), (240/80),

Table 6: Joint sets, Plattja Tabelle 6: Kluftsystem, Plattja

	Orientierung	Beschreibung]	
		Persistenz: 20- 50m	1	
SS	217/ 18	Spacing: 5- 10m		
		rauh, ebenmässig		
	100/96	Persistenz: 5- 15m		
К1	(200/05)	Spacing: 5m		
	(205/ 05)	Harnische, ebenmässig		
		Persistenz: 10- 15m	, I	
К2	086/80	Spacing: 10m		
		rauh, ebenmässig		
		Persistenz: 5-10m		
Кб	063/72	Spacing: 3- 7m		
		rauh, ebenmässig		
		Persistenz: 5- 10m		
К4	035/77	Spacing: 15m		
		Chlortit, gestuft		

Figure 34: Joint sets, Plattja, [Nivellement] Abbildung 34: Kluftsysteme, Plattja, [Nivellement]



Die Shape Metrix- Modelle der Nordwand der Plattja ergaben eine leicht veränderte Verteilung. Dies ist auf die Aufnahmerichtung zurückzuführen. Durch das Shape Metrix modell ist eine detaillierte Aufnahme der steil stehenden Kluftsysteme von K1 möglich. Die Kluftsysteme K3, K4 und K2 sind jedoch untervertreten, da sie den Aufbau der Wand bilden. Eine Kombination beider Aufnahmen zeigt daher die wirkliche Verteilung der Kluftsets am besten.









Geländecharakterisierung

3.4.3 Geomechanische Disposition

Das gesamte Untersuchungsgebiet ist gezeichnet durch das häufige Versagen des Gebirges. Es wurde versucht, je nach Hangorientierung und Neigung die Versagensmechanismen anhand der vorhanden Klüftungen zu bestimmen.

DeFreitas und Watters (1973) geben eine einfache Möglichkeit geometrisch Gleiten und Blockkippen für eine Region zu bestimmen.

3.4.3.1 Gleiten

Gleiten auf Schichtung:

Im gesamten Untersuchungsgebiet konnten Gleitbewegungen auf der Schichtung beobachtet werden. Die Auswertung von 448 Messungen zeigen, dass das Einfallen der Schichtung zu gering ist um Gleiten statisch zu ermöglichen. Daher müssen weitere Faktoren welche zu einer Stabilitätsabnahme führen gefunden werden.

Simmons und Cruden (1980) beschrieben eine Art Fels- Labyrinth mit gleichmässiger Anordnung von durch grosse Klüfte getrennten Blöcken. Ähnlich wie in Grächen fällt die Schichtung durchschnittlich mit 22° ein. Sie glauben, dass eine solche Situation durch den Aufbau einer grossen Eislinse zustande gekommen ist. Nach Simmons und Cruden (1980) könnten Labyrinth Anordnungen typisch sein für sanft einfallende kohäsive Felshänge unter periglazialem Einfluss.

Erdbeben könnten ebenfalls für die Instabilität der Plattja verantwortlich sein. In einem ersten Schritt ist es v mit Hilfe einer Limit Equilibrium Berechnung möglich, den Effekt eines Erdbebens zu zeigen. Dabei wirkt eine zusätzlich angreifende horizontale Kraft.



Abbildung 37: Gleiten/ Blockkippen im Untersuchungsgebiet

Figure 37: Sliding/ Toppling in the research area



Abbildung 38: Gleiten, Geometrische Auswertung Figure 38: Sliding, geometrically

Gleiten an steilen Klüften:

Steil stehend, ausfallende, zu einander kongruente Kluftsysteme können je nach Disposition Blockkippen oder aber Gleiten an ihren Trennflächen erlauben. Dabei entscheidet der Durchdringungsgrad eines Kluftsystems ob ein Prozess ablaufen kann.



Abbildung 39: Modell steil stehender Klüfte Figure 39: Model, siding on steep joints

Die Kluftsysteme K1 und ihre Konjugierten bilden im gesamten Untersuchungsgebiet steil stehende persistente Diskontinuitäten. Es könnte sich dabei auch nur um ein Kluftsystem handeln, welches in seinem Aufbau die Orientierung wechselt(109/85) (289/85). So könnten sich je nach Aufbau der Klüfte und der Geländegegebenheiten lokal unterschiedliche Versagensmechanismen ausbilden.

Durch die Kluftsysteme K3 und K4 können in NW- SE streichende Wände maximal eine Höhe von ca. 50 m erreichen, danach können sich stumpfwinklige Keile durch

ihre Intersektion (Einfallen 102°, Fallen65°) lösen. Da jedoch



Abbildung 40: K3/K4 Keil Figure 40: K3/ K4 wedge

die Schichtung eine grössere Persistenz als die beiden Kluftsysteme aufweist, sind grössere Keile eher unwahrscheinlich. Solche Ebenfalls ist durch die schräge Intersektonslinie Rotationsgleiten (slumping) möglich, falls es die Hangorientierung erlaubt. Keile, welcher Grösse auch immer, werden da sie im Ungleichgewicht sind, Kräfte an ihre Umgebung abgeben und wirken somit auf potentielle Instabilitäten.

3.4.3.2 Blockkippen

Auf Grund der Tatsache, dass im gesamten Untersuchungsgebiet der Hangwinkel kleiner ist als der Basale Reibungswinkel der Gleitfläche, ist Blockkippen nur dann möglich, wenn (b/h)<tan ϕ (Abb.37). (b und h werden nach Tabelle 6 definiert)

Die basale Trennfläche welche Blockkippen erlauben würde stellt die Schichtungsfläche dar. Bei einer durchschnittlichen Richtung von N220 erlauben nur K3 (010/84) K4 (033/78) / (061/73) blockkippen.

Geländecharakterisierung

Lokal kann die Schichtungsrichtung bis etwa N250 ändern. An solchen Hängen wäre Blockkippen auch durch K1 möglich. Generell kann gesagt werden, dass je westlicher die Schichtung einfällt, desto wahrscheinlicher ist Blockkippen. Natürlich unter der Voraussetzung, dass es die Hangorientierung erlaubt.

Ein Schnitt in NE-SW Richtung zeigt die Geländegegebenheiten (Abb.42). Falls die Kluftsysteme über mehrere Schichtungspakete persistent sind , wird ab einer Höhe von ca. 20- 25 m der separierte Block instabil und kann überkippen.

Eine Möglichkeit, der Separierung der Schichtung kann mit Zugkräften erklärt werden. Zugversagen wurde im Untersuchungsgebiet mehrheitlich mit chloritreichen Schichten oder Adern beobachtet. Chloritreiche Bänder können das Verhalten der gesamten Felsmasse bestimmen. Die Zugkraft eines Chloritschiefers, entlang der Schieferung ist nach Singh et al. (2001) 10 MPa, Chloritadern können aber lediglich ~3-5 MPa Zugkraft aufnehmen. Durch die Eisüberlast, erfährt das Gebiet der Plattja eine Entlastungspannung von 2-3 MPa. Zusätzlich kann durch Blockkippen bis zu 0.175MPa Zugspannung entstehen (Abb.43).

$$\sigma_{1} = \lambda h \cos \beta_{d} (1 + 3 t a n \omega t a n \beta_{d}) = 0.74 M P a$$

$$\sigma_{2} = \lambda h \cos \beta_{d} (1 - 3 t a n \omega t a n \beta_{d}) = 0.47 M P a$$

$$\sigma_{t} = 0.17 M P a$$



Abbildung 41: Blockkippen, Figure 41: Toppling, geometrically



Abbildung 42: Blockkippen auf Schichtung Figure 42: Toppling on foliation



Abbildung 43: Spannnung durch Blockkippen Figure 43: Block toppling stess

Steil stehende Chloritadern können durch die bei der Plattja auftretenden Kräfte versagen. Die Separierung der Schichtung auf der Plattja kann rein mechanisch aber nur mit sehr persistenten steilstehenden Kluftsystemen entstehen. Seismische Kräfte könnten allerdings ebenfalls an der Schichtungsfläche ansetzen (Kap.5.1 Schaukeln)

3.4.4 Seismische Disposition

Ashford et al. (1997) zeigten, dass die grösste Verstärkung von Bewegungswellen an Bergkämmen bei H/ λ = 0.2 vorkommen. Dabei kann die natürliche Frequenz einer Region, gegenüber dem topographischen Effekt dominieren.

Für die Plattja würde eine nach Ashford maximale Verstärkung bei Wellenlängen von: $\lambda_{Seetal horn} = \frac{2200m}{0.2} = 11000 m$ vorkommen. Berücksichtigt man allerdings nur die Erhebung der Plattja selber würden Wellenlängen von: $\lambda_{plattja} = \frac{600m}{.2} = 3000 m$. Als kritische angesehen.

Um die Frequenz, bei welcher ein Erdbeben auf der Plattja den maximalen topographischen Effekt hätte, auszurechnen, muss die Wellengeschwindigkeit bekannt sein. Auf Grund des stark geklüfteten Gesteins, hat Randa eine Scherwellengeschwindigkeit von <500 m/s, gegenüber intaktem Gestein, welches mit Geschwindigkeiten von .3000 m/s charakterisiert werden könnte. Eine Analyse für die Plattja würde somit Frequenzen von $f_{Seetal horn} = \frac{v}{\lambda} = 0.046 bis 0.273 Hz$, $f_{Plattja} =$ 0.167 bis 1 Hz ergeben, bei der maximale Verstärkungen der Bewegungswellen erwartet werden könnte.

Nach Geli et al. (1988) und Lawrence et al. (1973) würde allerdings eine maximale Verstärkung bei Wellenlängen welche im Bereich der Halbwertsbreite des Berges sind erwartet. $\lambda_{Seetal\ horn} = 3500\ m\ und\ \lambda_{Plattja} = 1000\ m$. Im Untersuchungsgebiet ist das Verhältnis Halbwertsbreite zur Höhe des Berges für Seetalhorn $\frac{3500\ m}{2200\ m} = 1.59$ mit und für die Plattja mit $\frac{1000\ m}{600\ m} = 1.67$ klein, da grosse topographische Erhebungen vorhanden sind. Bei diesen Voraussetzungen würden die grössten Verstärkungen bei $f_{Seetal\ horn} = 0.143\ bis\ 0.857\ Hz\ und\ f_{Plattja} = 0.5\ bis\ 3\ Hz\ erwartet\ werden$.

Wird die natürliche Frequenz einer Region bei einem Erdbeben stimuliert, ist dies der kritischste Fall für dessen Stabilität. Fällt diese mit der oben berechneten Frequenz der maximalen Verstärkung durch den Topographieeffekt zusammen, würden die Wellen in Resonanz stehen, was man als Wrost- case Szenario annehmen könnte.

4. Stabilitäts- Analysen

4.1 Gebirgseigenschaften

Mit RocLab (2007) konnten den einzelnen Gebirgseigenschaften durch GSI Anpassung, von den Laborwerten von Willenberg (2004), die Felseingenschaften errechnet werden.

Gesteinsklasse	Lithologie	UCS [MPa]	c [MPa]	phi [⁰]	Zugfestigkeit [MPa]	Verformungsmodul [MPa]
G1 (GSI 88)	Augengneis	61.6	15.1	51.9	1.43	30313
	Augengneis	26.7	11.7	47.8	0.46	25129
G2 (GSI 73)	Paragneis	17.8	6.4	39.5	0.8	16491
G3 (GSI 58)	Augengneis	11.5	9.6	43.5	0.15	15190
	Paragneis	7.6	4.9	35.1	0.26	9968
	Augengneis	4.8	7.8	39	0.05	6264
G4 (GSI 43)	Paragneis	3.1	3.9	30.7	0.08	4111
G5 (GSI 28)	Paragneis	1.2	3	26.1	0.03	1506

Tabelle 7: Gesteinsparameter mit GSI- Anpassung, Mittelwerte Table 7: GSI scaling of rock properties (mean values)

4.2 Historische Untersuchungen

Eingehende Literaturrecherchen sind wichtig, um die Relevanz einer Problemstellung zu unterstreichen. In Bezug auf erdbebensensitive Regionen kann dies besonders wichtig sein, da Grossereignisse `nur` selten eintreten.

Noverraz F. et al. (1998) haben bei ihrer Kartierung der Sackung von Grächen ebenfalls den Bergsturzkegel, welcher 1755 während des Erbebens entstanden ist, kartiert. Folgende Daten konnten gewonnen werden:



Scheidegger (1973), Li (1983) und Davis (1982) geben Parameter an, um vom Auslauf oder Fläche eines Bergsturzes auf sein Volumen zu schliessen. Dabei werden folgende Formeln verwendet:

$$Log\left(\frac{H}{L}\right) = A + B \ Log(V)$$
$$L^{\circ} = 9.98 * V^{2/3}$$

Tabelle 8: Runout- Berechnungen (vereinfacht) Table 8: Runout Analysis (simplified)

	А	В	Volumen	
Scheidegger (1973)	0.62419	-0.15666	1.0449	Mio m ³
Li Tianchi (1983)	0.664	-0.1529	2.6758	Mio m ³
Hunger (1981)	Verlager	$ung = 29^{0}$	1.5	Mio m ³
Davis (1982)	L`=	1300m	1.4867	Mio m ³
	Frictio	n Angle	32.8	Degree
Rickenmann (1999)	-0.012	-1.05	1.9595	Mio m ³

Feldbegehungen des Durlochhorns haben ergeben, dass es sich beim Ereignis von 1755 wahrscheinlichsten um ein Keilversagen gehandelt hat. Grossstrukturen wie auch die Klüftung können zur Bildung eines Keils führen. Mit dem Programm *Swedge* von RocSciense konnte ein vergleichbarer Keil wie er beim Durlochhorn hätte sein können, nachgestellt werden.



Abbildung 45: Modell des `Durloch- Keils` Figure 45: Model of `Durloch- wedge`

Die Nachbildung dieses Keiles ergab ein Volumen von **1.47 Mio.m**³. Da dieser Wert und die Rückrechnungen für Gegebenheiten des Bergsturzkegels in etwa das Gleiche ergeben, kann von diesem Volumen ausgegangen werden.

4.2.1 Runout `Durloch- Keil` mit DAN-W

Zur Kontrolle, ob ein Bergsturz am Durlochhorn dieselben Ausmasse wie sie durch Noverraz (1998) kartiert wurden erreichen würde, wurde die Situation mit dem Programm *DAN-W* berechnet. *DAN-W* ist ein Programm, welches nummerische Bewegungsgleichungen als Kern hat und speziell zur dynamischen Rückanalyse von Bergstürzen durch Hungr (1995) erstellt wurde.

Tabelle 9: Runout Eingabeparameter und Resultate für Modellierungen Table 9: Runout for different model input parameter and results

	Eingabeparameter		Beschreibung	Fahrböschungswinkel	Verlagerungswinkel	horizontale Verlagerung
frictional	frictional $\phi=30$ $\gamma=20$ [t/m3] $\phi=27$ $\gamma=20$		kleine trockene Bergstürze (Strouth et al 2005)	30.02	31.79	1641m
metional			Eigene Werte	27.62	28.99	2078m
	<i>}</i> =0.1	<i>ξ</i> =500 [m/s2]	Typischer Bergsturz (Hungr and Evans 1996)	ausserhalb Gegebenheiten		
Voellmy	<i>∱</i> =0.13	<i>ξ=</i> 450	Typischer Bergsturz (Hungr and Mc Dougall 2009)	26.73	26.26	2529m
<i>f</i> =0.05 ξ		ξ=1000	Bergstürze mit Eis	ausserhalb Gegebenheiten		

Das 3D Modell mit *DAN-W* hat ein Volumen von 1.36 Mio.m³. Für das Transitgebiet wurde eine vereinfachte Geometrie der Region unterhalb des Durlochhorns erstellt. Besonders ist die Region bei Niedergrächen, welche ein kleines Plateau im Transitgebiet darstellt, bei welchem der Bergsturz zu stehen kam.

Die Modellierungen zeigen die beste Übereinstimmung mit einem Reibungskoeffizient $\oint = 0.13$ und dem Turbulenzparameter von $\xi = 450$ m/s². Diese Werte wurden von Hungr und Mc Dougall (2009) als typische Bergsturzparameter angegeben, und gut zu den Resultaten von Hungr und Evans (1996) passen. Auch das reine Reibungsmodell mit den selbst ermittelten Parametern ergibt eine gute Annäherung an die Kartierung von Noverraz et al. (1998). Die Voellmy Modellierung zeigt 2.5 min nach der Auslösung ihren Stillstand mit einer horizontalen Verschiebung von 2.52 km. Dabei können Geschwindigkeiten bis zu 64 m/s (230 km/h) erwartet werden. Der Bergsturzkegel hat an seiner Front eine Ablagerungsmächtigkeit von bis zu 6 m, welche aber hangaufwärts rasch abnimmt. Die gesamte Ablagerungsfläche wurde mit 0.9 Mio.m² berechnet (Abb.46).

Das Ablagerungsgebiet wird mit dem Reibungsmodell am besten wiedergegeben. Eine durchschnittliche Ablagerungsmächtigkeit von ~2 m im Ablagerungsgebiet scheint eine bessere Modellierung zu sein, als eine konzentrierte Ablagerung von über 6m am Ende des Ablagerungsgebiet, wie es die Voellmy Modellierung wiedergibt (Anhang, Abb.72+73)



Abbildung 46: Runout Reibungsmodell Figure 46: Runout model, frictional

4.2.2 Stabilität `Durloch- Keil` mit Swedge

Um die Stabilität des Bergsturzes, des angenommen Keiles, zu prüfen, wurden die äquivalenten Gesteinsparameter Kohäsion und innere Reibung nach Jenning (1970) bestimmt. Für die Stabilität der Gleitfläche zu bestimmen, wurde für Felsbrücken bei der Gleitfläche 10- 25% angenommen.

Durchgängigkeit $K = \frac{\sum Kluftsegmente}{\sum KS + \sum Felssegmente} = 0.75 to 0.9$

Äquivalente Kohäsion: $C_a = (1 - K)C_r + KC_j = 4 \text{ to } 1.6$

Äquivalente Reibung: $tan\phi_a = (1 - K)\phi_r + KC_j = 36.5 to 31$

$$C_r = 16 \quad C_j = 0$$

$$\phi_r = 55^0 \quad \phi_i = 27^0$$

Mit diesen Voraussetzungen würde die Stabilität des Keiles am Durlochhorn folgende Dimensionen haben (Abb.71 im Anhang):

К	FOS	k _h
0.75	1.5375	0.222
0.9	1.3141	0.138

Die Berechnungen mit Swedge geben eine minimale horizontale Beschleunigung von 1.35- 2.17 m/s², damit ein Bergsturz, wie er 1755 stattgefunden hat, unter den angenommen Umständen ausgelöst werden könnte.

Diese und grössere Beschleunigungen sind für ein Erdbeben in der Region des Wallis sehr gut möglich. Die seismischen Untersuchungen (Kap. 4.2.3) zeigen, dass für ein Magnitude 6+ Erdbeben noch höhere Beschleunigungen erreicht werden.

Die Berechnungen zeigen, dass die Stabilität stark von der Persistenz der Klüfte abhängt. Schon eine Änderung von 15% mehr Gesteinsbrücken resultiert in einem 60% höheren Erdbebenkoeffizient k_{h} .

Die Berechnungen wurden unter trockenen Bedingungen durchgeführt. Eine Beteiligung von Wasser würde die Stabilität am Durlochhorn weiter mindern und ein Versagen bei geringeren Beschleunigungen erlauben.

4.3 Seismische Untersuchungen

Zur Bestimmung der seismischen Stabilität, vor allem aber zur Bestimmung der Verschiebung nach Newmark bei einem Erdbeben, ist die Eingangsschwingung (Input Motion) und die Zeitgeschichte (Time history) von grosser Bedeutung.

Einige der Erdbeben sind unterhalb der minimalen Geländebeschleunigung und sollen die Sensitivität der Bewegungen auf die Topographie zeigen.

Event	Station	Mw	Herdtiefe	Distanz Epizentrum	NS	WE	Min. Dip	Max. in Dip	up
		6.0	15km	22.01	-49.555907	-38.461517	-54.874	-56.558	-29.46206
Irpinia 1980	ALI	6.9		23.8KM	54.874782	56.399112	49.556	73.0631	33.80806
Val Comino 1984	SCF	5.9	20km	63.6km	-124.996637 130.482106	-105.211791 123.746979	-130.482 105.345	-120.407 161.271	-71.61447 53.48644
L`Aquila 2009	ANT	6.3	8.8km	23km	-25.970691 22.225007	-19.744123 16.554197	-13.7616 13.111	-22.795 27.602	-10.66373 11.47395
L`Aquila 2009	AQG	6.3	8.8km	4.4km	-479.26687 363.866891	-437.4277 299.40891	-407.244 249.133	-350.474 481.125	-181.5687 234.6166

Tabelle 10: Erdbeben- Parameter der verschiedenen Events [cm/s²]	
Table 10: Earthquake parameters from the different events [cm/s ²]	

Ingels et al. (2006) beschreiben in ihren Studien den Einfluss der vertikalen Erdbebenkomponente auf die Stabilität eines Hanges. Mit der Berechnung nach Newmark werden horizontale Beschleunigungen parallel zum Hang angenommen. Die berechneten Verschiebungen vernachlässigen die vertikale Erdbeben-



Abbildung 47: K_{D} als Funktion von K_{ac} und Figure 47: K_{D} as function of K_{ac} and a_{shc}
komponente und überschätzten die kritische horizontale Beschleunigung. Daher ergeben sich zu kleine Verschiebungen bei steilen Hangneigungen und kleinen Bodenbeschleunigungen. Ingels et al. (2006) geben für die Berechnung der Verschiebung unter Berücksichtigung der vertikalen Komponente folgende Formel an: $logK_D = 6.642 * a_{Shc}(K_{ac} - 1)$

Daraus ergibt sich dass, im Bereich der Plattja für das Gleiten auf der Schichtung eine 1.12 mal grössere Verschiebung zu erwarten ist, als durch Newark berechnet.

Wird die vertikale Erdbebenkomponente der horizontalen dazu addiert, kann dies einen Einfluss auf die Stabilität haben, sowohl stabilisierend als auch destabilisierend. Bei den ausgewählten Erdbeben konnten erhöhte maximale Schwingungen (PGA) von bis zu 33.4% errechnet werden, unter Berücksichtigung der vertikalen Beschleunigungen. Würde man allerdings die vertikale Komponente mit einberechnen, würde eine Analyse um ein Vielfaches komplizierter, was allerdings dem Sinn einer Newmarkberechnung widersprechen würde.

4.4 Stabilitätsanalyse der Versagensmechanismen

Um das Hauptziel dieser Masterarbeit zu erreichen, ist eine Stabilitätsanalyse der Hanginstabilitäten in der Region von Grächen unabdingbar. Dabei ist der Vergleich von statischen Analysen und Analysemethoden die Erdbebenfaktoren enthaltenen notwendig. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Versagensmechanismen kurz erläutert.

4.4.1 Planares Gleiten

Die kinematischen Voraussetzungen um planares Gleiten zu ermöglichen wurden im Kapitel 2.2.2.1 aufgeführt. Sind diese gegeben können mit einem Stereoplot die Diskontinuitäten eingegeben und so Kluftsysteme gefunden werden [Harrison und Hudson, 2000].

Im Untersuchungsgebiet sind vielfach Blöcke zu erkennen, die sich isoliert haben. Zudem gibt es Hinweise durch die Feldaufnahmen, dass Blöcke auf der Schichtung gleiten. Um dies zu prüfen wurde in einem ersten Schritt eine statische Berechnung durchgeführt:



Figure 48: Planar sliding on Plattja Abbildung 48: Planares Gleiten: Plattja

Die Gegebenheiten der Plattja erlauben eine Analyse mit einem einfachen Modell von planarem Gleiten. Für die statische Berechnung wurden sowohl trockene Bedingungen als auch eine bereits existierende durchgehende Gleitfläche entlang der Schieferung angenommen.

Für ein Einfallen der Gleitfläche von 20° und einem Basalen Reibungswinkel von **27**°, konnten folgende Berechnungen gemacht werden. Dabei wurde der Basale Reibungswinkel von der Formel: $\phi_{peak} = JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_{residual}$ abgeleitet.

$$\begin{split} \phi_p &= 55^{0} \bullet \\ JRC &= 10 - 11 \bullet \\ JCS &= 120 \ MPa \bullet \\ \sigma_n &= 0.2689 \ MPa \end{split}$$

Tabelle 11: Statische und Pseudostatische Berechnung Table 11: Static and pseudostatic analysis

Slope angle	ψ _f	86	o
Dip of failure surface	Ψ_{p}	20	o
Cohesion	с		Ра
Slope height	н	13	m
Depth of tension crack	z	10	m
Basal friction angle	φ	27	o
max horizonal earthquake acceleration	a _h		m/s²
	k _h		
Height of water (in tension crack)	Zw		m
Bulk density of water	λ_w	9810	N/m ³
Bulk density of rock	λ	25900	N/m ³





Der statische FOS ist stark vom Einfallen der Gleitfläche und deren inneren Reibung abhängig.

Abbildung 49: $f(\alpha, \phi)$ Figure 49: FOS: $f(\alpha, \phi)$

Die Analysen zeigen, dass unter statischen Bedingungen, planares Gleiten auf der Schichtung nicht möglich ist. Daher wurde die minimale horizontale Beschleunigung, welche durch ein Erdbeben benötigt wird, ausgerechnet um eine pseudostatische Sicherheit von 1 zu erlangen. Wie Abb. 50. zeigt, wird auch die horizontale Erbebenbeschleunigung, um einen pseudostatischen FOS=1 zu erreichen, stark vom α und ϕ abhängig sein.



Die Grundlage für eine seismische Stabilitätsberechnung nach Newmark, ist mit der Errechnung des horizontalen Erdbebenkoeffizient gegeben.

Kluftöffnungsmessungen 4.5

Auf der Plattja wurden 28 Nullmessungen in verschiedene Table 12: Extensometer, Richtungen gemacht. Der genaue Versuchsaufbau mit der Temperaturkorrektion kann im Anhang (Tabelle 17) nachgesehen werden. Tabelle 12 gibt eine Zusammenfassung der ermittelten Werte. Eine zweite Messung nach einem Jahr könnte weitere Aufschlüsse über die Bewegungsraten auf dem Felskopf der Plattja liefern und ist erstrebenswert, um die kinematischen Verhältnisse besser verstehen zu können.

Durch die Aufnahme der Plattja mit Nivellement besteht ebenfalls die Möglichkeit Bewegungen in der Zukunft besser zu bestimmen. Zur Verbesserung der Genauigkeit, wird die Aufnahme mit einem Tachymeter empfohlen.

Da von der Plattja ebenfalls 3D Modelle mittels digitaler Photogrammmetrie aus dem Helikopter gemacht wurden, besteht die Möglichkeit grössere Bewegungen oder Volumenänderungen zu erkennen.

Tabelle 12:	Extensometer,
Überblick	

overview

PN1.1	1.20720079	m
PN1.2	1.84906328	m
PN1.3	1.81451031	m
PN1.4	2.13779056	m
PN2	5.05231547	m
PN3	1.74033034	m
PO4	0.615616	m
PO5	0.54283474	m
PO6	0.54641689	m
PO7	0.48215555	m
PO8	0.9122576	m
PO9	0.54480301	m
PO10.1	0.86774466	m
PO10.2	7.24228235	m
PO11	2.97430358	m
PO12.1	2.14230967	m
PO12.2	5.03622514	m
PO13	0.56166849	m
PO14	3.54744183	m
PU15.1	1.09851077	m
PU15.2	1.31058275	m
PU15.3	2.5838808	m
PU16	0.80455822	m
PU17	0.73762057	m
PU18	0.68495421	m
PU19	0.84696511	m
PU20	0.77680242	m
PU21	0.30208524	m



Figure 51: Scaled 3d Model of Plattja Abbildung 51: Korrigiertes 3D Modell der Plattja

5. Resultate

5.1 Schaukeln

In seismisch aktiven Regionen können Blöcke mit einer gewissen Geometrie (precariously balanced rock) verwendet werden, um Rückschlüsse auf Stark-Bodenbewegungen zu machen. Im Gebiet der Plattja konnten einige Blöcke erfasst werden, welche überkippt sind. Durch die Aufnahme ihrer näheren Umgebung kann festgestellt werden, dass diese Blöcke nicht durch seismisches Überkippen, sondern am Ende einer Schichtungsstörung (an einer Stufe) gekippt sind. Eine Analyse des Rocking könnte daher eine maximale Geländebeschleunigung bei der Plattja geben, welche bis jetzt noch nicht erreicht wurde.

Shi et al. (1996) zeigen einen Weg, um die minimale seismische Überkipp-Beschleunigung zu errechnen. Ihre Lösung berücksichtigt, dass bei höheren Frequenzen die Housner- Gleichung (1963) die minimale Toppling- Beschleunigung überbewertet. Daher wurde die Housner- Gleichung modifiziert:

$$A_{x} = g\alpha \sqrt{1 + \gamma^{2} \left(\frac{\omega}{p}\right)^{2}} = (0.85 \ to \ 0.4)g$$
$$p (Block) = \sqrt{\frac{3g}{4R}} = 1.308 \ to \ 1.147$$
$$\gamma = \sim 0.6 \ [Shi \ et \ al. \ 1996]$$



2b=5m 2h=7m/10m R= 4.3m/5.59m α= 15.54/6.565 μ= 0.5095

Abbildung 52: Modell, Blockschaukeln Figure 52: Model of Rocking

Die Berechnungen, um Rocking bei der Plattja zu erlauben, beruhen auf der Annahme einer sinuidalen Eingangswelle [Zhang et al., 2001]. Die Geometrie des Blockes, aber auch die Steilheit der Basis sind als bestimmende Parameter zu erwähnen. Zudem beruhen die Berechnungen darauf, dass kein Gleiten an der Basis vorkommt. Damit wird eine minimale Beschleunigung um Überkippen zu erlauben errechnet.

Beide hier errechneten Werte sind sehr hoch und können von der seismischen Disposition der Region kaum, oder nur unter besonders widrigen Umständen (evtl. starker Topographieeffekt) erreicht werden.

5.2 Planares Gleiten

Unter diesem Kapitel soll der Effekt von wirklichen Erdbeben auf die Plattja gezeigt werden. Newmark- Berechnungen bauen auf der pseudostatischen Analyse auf und zeigen die Verschiebungen, die bei gegebener Eingangsschwingung zu erwarten sind. In einem ersten Schritt wurden die horizontalen Nord- Süd und die West- Ost Schwingungen vektoriell addiert, um die wahre horizontale Beschleunigung zu erhalten. Mit den daraus gewonnen Daten konnten in Excel vier vereinfachte Analysen durchgeführt werden:

Kramer (1996) für einen rechteckigen Impuls:

Permanente Verschiebung =
$$\frac{v_{max}^2}{2 * a_c} \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)$$

Max. Permanente Verschiebung = $\frac{v_{max}^2}{2 * a_c} \frac{a_{max}}{a_c}$

Ambraseys und Menu (1988):

$$log D_N = 0.9 + \log \left[\left(\frac{1 - a_c}{a_{max}} \right)^{2.53} \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-1.09} \right]$$

Jibson and Others (1998, 2000):

$$log D_n = 1.521 log I_a - 1.993 log a_c - 1.546$$

Die `wahren` Verschiebungen wurden im Anschluss mit einem Matlab- Code berechnet und mit einem Programm (Slope Performance during an Earthquake, Java Programm, Jibson) von USGS für jede Richtung kontrolliert. Der Matlab- Code wurde von Dr. Moore geschrieben und ermöglicht die unterschiedlichen Aspekte eines Erdbebens zu visualisieren.

Bei den Newmark- Berechnungen wurde `nur` die Hangabwärtskomponente berücksichtigt. Da eine Verschiebung hangaufwärts mit Beschleunigungen von über: $k_{h,up} = \frac{tan\phi + tan\beta}{1 + tan\phi * tan\beta} = 0.7368 * g [Kramer (1996)]$ zu hoch oder sehr unwahrscheinlich für die regionalen Gegebenheiten ist.

Im Anhang (S.99 und folgende) sind zu den einzelnen Erdbeben zusätzliche Informationen ersichtlich.

Für die durchgeführten Berechnungen wurde ein Block mit H: 10 m * L: 10 m * B: 5 m angenommen.

5.2.1 Irpinia 1980

Erdbebenwellen mit der Intensität wie sie bei dieser Station aufgenommen wurden, wären bei der Plattja zu schwach, um Verschiebungen zu bewirken, selbst wenn ein topographischer Effekt von +50% hinzugefügt würde.

Die Bedingungen zum Zeitpunkt eines Versagens sind für die Stabilität massgebend. Geländegegebenheiten können für die Stabilität einer Region kritischer sein als Erdbebenbeschleunigungen. Ist zum Beispiel die Gleitfläche nass, kann sich der Basale Reibungswinkel eines Gneises um bis zu 3° reduzieren [Barton and Choubey, 1976]. Auf der Plattja könnten, durch die Abnahme des Basalen Reibungswinkel auf 24°, bei Erdbebenwellen wie sie für Irpinia 1980 aufgenommen wurden, Verschiebungen stattfinden. Eine Abnahme des Basalen Reibungswinkel der Gleitfläche kann sich ebenfalls durch Verwitterung und damit Glimmer-/ Chloritanreicherung vorgestellt werden.

Mit der Berücksichtigung eines topographischen Effektes von +50% kann unter diesen Bedingungen gezeigt werden, welcher Effekt rein topographisch sein könnte.

5.2.1.1 Vereinfachte Analyse

Die statisch- und pseudostatische Berechnung wurde mit den oben erwähnten Änderungen vorgenommen:

Tabelle 13: Statisch- und Pseudostatische Berechnung, ϕ =24Table 13: Static and pseudo static analysis, ϕ =24



Die vereinfachte Analyse zeigt eine erste Grössenordnung für mögliche Verschiebung durch Erdbebenbeschleunigungen auf einer planaren Gleitfläche.



Abbildung 53: Irpinia 1980: Vereinfachte Analyse nach Kramer Figure 53: Irpinia 1980: Simplified displacement analysis by Kramer



Abbildung 54: Irpinia 1980: Vereinfachte Analyse nach Ambraseys, Menue, Jibson et al. Figure 54: Irpinia 1980: Simplified displacement analysis by Ambraseys, Menue, Jibson et al.

Die Tabellen zur Berechnung dieser Graphiken können im Anhang (Tabelle.18) eingesehen werden.

Die vereinfachte Analyse soll eine erste Grössenordnung der zu erwartenden Verschiebungen geben. Für genauere Analysen muss eine vollständige Newmarkberechnung durchgeführt werden. Keine der vereinfachten Analysen enthält Informationen über die Dauer bei welcher die kritische Beschleunigung überschritten wird. Da dies jedoch eine der wichtigsten Parameter zur Bestimmung der endgültigen Verschiebung ist, sind die vereinfachten Analysen nur bedingt anwendbar. Zudem zeigen nicht alle vereinfachten Analysemethoden eine Sensitivität gegenüber der kritischen Geländebeschleunigung, was eine Verallgemeinerung der Situation bedeutet. Eine Verbesserung dieser Situation wird im Kapitel 5.3 diskutiert.

5.2.1.2 Newmark Analyse

Die Resultate (Abb.55) zeigen, dass bei Eingangsschwingungen wie sie in Irpinia 1980 vorgekommen sind, eine starke Polarisierung vorkommen kann. Dies führt dazu, dass die Stabilität eines Hanges unter diesen Bedingungen stark von seiner Orientierung abhängt (directionality effect). Durch den Topographieeffekt werden in der Regel zusätzliche Orientierungen instabil werden und grössere Verschiebungen zeigen. Die Verschiebungen in eine Richtung geschehen in der Regel in mehreren Schritten, bei jedem Überschreiten der kritischen Beschleunigung. Die Verteilung der grössten Erdbebenbeschleunigungen (PGA) wiederspiegelt die Verschiebungsrichtungen nur bedingt (Abb.74 im Anhang), da sie die Zeit der Beschleunigung oberhalb der kritischen Beschleunigung nicht berücksichtigt. Das Spektrum der Frequenzen, welche bei einem Erdbeben Vorkommen zeigt, dass in der Zeit der grössten Verschiebungen auch die kleinsten Frequenzen vorkommen (Abb. 74).

Die berechneten Verschiebungen wären im Feld praktisch nicht erfassbar, zeigen aber das grosse Scherkräfte auf der Basalen Gleitfläche vorkommen und diese destabilisieren.



Abbildung 56: Newmark Verschiebungen, Zusammenstellung Figure 56: Newmark displacement, time history



Abbildung 55: Orientierungsabhängige Verschiebungen durch Topographieeffekt Figure 55: Directionality effect, partly caused by topographic amplification

5.2.2 Val Comino 1984

Newmark berechnet Verschiebungen auf der Tatsache, dass die Beschleunigungen parallel zum Hang sind. Für die kritische Beschleunigung sollte jedoch die horizontale Komponente errechnet werden, da Newmark- Verschiebungen ein Resultat aus der doppelten Integration aus den horizontalen Erdbebenbeschleunigungen sind [Ingles et al., 2006].

 $a_{cNh} = a_{cN} * cos_{\alpha} = 0.122 * cos_{20}$ $a_{cNh} = 0.115$

Bei einer nassen Gleitfläche:

$$a_{cNh} = a_{cN} * cos_{\alpha} = 0.069 * cos_{20}$$

 $a_{cNh} = 0.065$

Wie in Kapitel 4.3 gezeigt, können somit in etwa 1.12 mal grössere Beschleunigungen als durch Newmark berechnet wurden, erwartet werden. Bei steileren Gleitflächen könnte sich aber die Verschiebung vervielfachen. Zudem können durch die Herabsetzung der kritischen Beschleunigung ebenfalls Richtungsund Amplitudenänderungen stattfinden.

Fügt man den horizontalen Beschleunigungen die vertikale Komponente hinzu, ergibt sich eine Auslenkung zur Horizontalen. Dieser Auslenkungswinkel ist normalerweise nicht gross, da die vertikale Komponente meist deutlich kleiner als die Horizontale ist. Für das Erdbeben von Val Comino 1984 konnte eine mittlere Auslenkung von 6.14° ermittelt werden. Für Beschleunigungen oberhalb der kritischen Beschleunigung (0.069g) ergab sich eine mittlere Auslenkung von 11° (und eine maximale von 30.4°).



Abbildung 57: Effekt der vertikalen Beschleunigung bei trockenen und nassen Bedingungen

Figure 57: Effect of the vertical earthquake component by dry and moist conditions





Figure 58: Histogram, Angle of excursion (Val Comino 1984)

Mit einer Eingangsschwingung wie sie für Val Comino (1984) aufgenommen wurde, würden auf der Plattja 88% der kritischen hangabwärts Komponenten aus dem Hang zeigen.

Seed und Goodman (1964) haben gezeigt, dass die Geländebeschleunigung folgendermassen ausgedrückt werden kann: $k_y = \frac{\sin_{\phi-\beta}}{\cos_{\phi-\beta-\beta}}$



Abbildung 59: Geländebeschleunigung für β =20°, ϕ =24° Figure 59:Yield acceleration for β =20°, ϕ =24°

Die Auslenkung der Geländebeschleunigung bewirkt eine pseudostatische Stabilisierung.

Bei einem durchschnittlichen Auslenkungswinkel von 11°, ist die kritische Geländebeschleunigung bei $k_y = 0.689g$. Dieser Effekt kann bei den vorliegenden Gegebenheiten mit dem Ändern des Basalen Reibungswinkel um +0.02° verglichen werden. Um bei der Berücksichtigung der vertikalen Komponente die gleiche Verschiebung zu erlangen, muss diese unter den gegebenen Voraussetzungen eine vertikale Beschleunigung von $a_y = tan_{11} * (0.0035 + a_{h1}) \sim a_{ymin} = 0.134g$ erreichen. Dies ergibt sich aus der Auflösung der Formel $u = \frac{v_{max}^2}{2a_h} \left(1 - \frac{a_h}{A}\right)$ [Newmark, 1965], unter der Annahme, dass die Geschwindigkeit sich nicht ändert. $A_2 = \frac{a_{h1}}{\frac{a_{h1} + a_{h1}}{A_1} + \frac{a_{h1}}{A_1} = \frac{1}{a_{h1}}$

$$A_1 + a_{h2} - a_{h1}$$

Die vertikalen Beschleunigungen, wie sie beim Erdbeben von Val Comino (1984) aufgenommen wurden und oberhalb der kritischen horizontalen Beschleunigung liegen, sind im Mittel 18.58 cm/s². Somit kann vermutet werden, dass falls die vertikale Erdbebenkomponente berücksichtigt würde, die Verschiebungen (ein wenig) grösser wären als mit Newmark berechnet.

L`Aquila 2009: ANT 5.2.3

Die Station ANT ist lediglich 23 km vom Erdbebenzentrum, des L'Aqulila Erdbebens 2009 mit der Magnitude M, 6.3, entfernt. Sie liegt auf vergleichbarem Festgestein wie die Station AQG (Kalkgestein), am Fusse einer NE- Wand. Die Station befindet sich im Hangenden der Paganica- Verwerfung, welche für das Erdbeben in 8.8 km Tiefe verantwortlich gemacht wird (Abb.60). Die gemessenen maximalen Beschleunigungen (PGA) bei der Station ANT sind etwa 20 mal kleiner als bei der Station AQG (Abb. 76). Mit einem normalen Dämpfungsfaktor ist eine solche Abnahme nicht zu erklären



Abbildung 60: Visualisierung der Paganica Verwerfung [GEER-016, 2009]

Die aufgenommenen Eingangswellen bei der Station ANT besitzen eine starke Polarisation in SW-NE Richtung, was in etwa rechtwinklig auf die Verwerfungsrichtung ist.

Die Grundschwingung bei der Station ANT sind gar 5 mal schwächer als beim Erdbeben von Val Comino bei der Station SCF, (M_w 5.9, 63 km vom Epizentrum). Dieses Beispiel soll zeigen, dass lokale Gegebenheiten sehr wichtig sind und sowohl dämpfend wie auch verstärkend auf die Eingangswellen wirken können. Auch wenn auf den ersten Blick die Gegebenheiten ähnlich erscheinen.

5.2.4 L`Aquila 2009: AQG

5.2.4.1 Newmark Analyse

Mit einer Magnitude von M_w6.3 und der Distanz von 4.4 km vom Epizentrum können die bei der Station AQG aufgenommen Erdbebenwellen von L`Aquila als im Wallis maximal zu erwartende Beschleunigungen angenommen werden. Mit den Rohdaten soll der Effekt der Geländegegebenheiten bei der Plattja gezeigt werden.

Bei solchen Eingangsschwinkungen können, unabhängig aus welcher Richtung die Welle eintrifft, Verschiebungen erwartet werden. Wobei der Betrag grossen Variationen unterliegt (Abb. 61).

Die Auswirkung von trockenen zu nassen Bedingungen kann bei den Gegebenheiten auf der Plattja, in etwa mit dem Topographieeffekt von +50% verglichen werden.

Die Verteilung der grössten Erdbebenbeschleunigungen stimmt nicht mit der maximalen Verschiebungsrichtung überein (Abb.77) was, wie bereits festgestellt, auf die Zeit oberhalb der kritischen Beschleunigung zurückzuführen ist.

Der Worst Case zeigt Verschiebungen von bis zu 2.66m, für nasse Bedingungen unter vertikaler Korrektur und topographischem Effekt.



L`Aquila AQG)

5.2.4.2 Vereinfachte Analyse

Die vereinfachte Analyse wurde für trockene Bedingungen mit einer kritischen Beschleunigung von 0.122g durchgeführt und für nasse Bedingungen mit einer kritischen Beschleunigung von 0.069g.



Abbildung 63: Vereinfachte Analyse, trockene Bedingungen Figure 63: Simplified analysis, dry conditions Abbildung 62: Vereinfachte Analyse, nasse Bedingungen Figure 62: Simplified analysis, wet conditions

Tabelle 14: Verschiebungsberechnungen für L`Aquila AQG [cm] Table 14: Displacement calculations for L`Aquila AQG [cm]

			Simplified Newmark an	alysis		Rigorous Nemark
Conditions		critical acceleration	Kramer (1996)	Ambrases and Menu (1988)	Jibson and others (1998, 2000)	analysis
dry		0.122g	4.68 (max.: 24.49)	17.34	3.57	8.25
	with vertical correction	0.115g	4.97 (max.: 26.84)	18.92	3.91	9.78
	with topografic effect	0.115g	12.41 (max. 90.57)	37.87		33.74
wet		0.069g	9.44 (max.: 75.51)	44.98	10.97	30.29
	with vertical correction	0.065g	10.02 (max.: 83.69)	48.59	12.16	37.7
	with topografic effect	0.065g	22.45 (max.: 254.84)	80.22		266.36

Kramers vereinfachte Analysemethode ergibt bei trockenen Bedingungen (wenn a_{max} nur wenig über a_c liegt) die beste Annäherung. Bei nassen Bedingungen (a_{max} >> a_c) gibt Ambraseys und Menu `s Formel die bessere Annäherung.

Distal zum Erdbebenzentrum sind durch Streuung und Dämpfung gewöhnlich nur kleine Unterschiede zwischen den orthogonalen Erdbebenkomponenten. Die Korrelation der vertikalen Komponente mit den Horizontalen nimmt mit epizentraler Distanz ab. Proximal zum Epizentrum hat die vertikale Erdbebenkomponente im Festgestein eine gute Korrelation mit der Horizontalen. Im Lockergestein sind vertikale Beschleunigungen meist phasenverschoben zu den maximalen horizontalen Beschleunigungen [Kramer S. and Lindwall N., 2004]. Dies kann in den aufgenommen Daten für das L`Aquila Erdbeben 2009 bei der Station AQG gezeigt werden.

Resultate

Der Auslenkungswinkel des L'Aquila Erdbebens bei der Station AQG ist mit 31.75° deutlich höher als der des Val Comino Erdbebens 1984 (6.14° Abb.58). Da die Station mit 4.4 km nahe am Epizentrum auf Festgestein liegt, kann vermutet werden, dass die vertikale mit der horizontalen Komponente in Phase weiter gegeben werden.



Auslenkungswinkel für L`Aquila AQG Figure 64: Histogram, Angle of excursion (L`Aquila AQG)

Für Beschleunigungen oberhalb der kritischen Beschleunigung beträgt der Auslenkungswinkel im Mittel 19.37° (mit einem Maximum von 81.97°). Bei starken vertikalen Auslenkungen dieser Art kann das Eigengewicht und damit der Reibungswinkel auf der Gleitfläche eines Blockes reduziert werden. Zeigt jedoch der Auslenkungswinkel in den Hang wird das Gegenteil geschehen. Im Allgemeinen kann aber eine grössere Verschiebung erwartet werden, da die Gleitfläche Gefälle hat.

Bei einer durchschnittlichen Auslenkung von 19°, steigt die kritische horizontale Beschleunigung bei trockenen Bedingungen von 1.2045g auf 1.2222g, was mit einem Anstieg des Reibungswinkel von +0.1° verglichen werden kann. Bei nassen Bedingungen steigt die kritische horizontale Beschleunigung von 0.6859g auf 0.7084g, was einem Anstieg des Reibungswinkels von +0.13° entspricht. Änderungen des Basalen Reibungswinkels um nur wenige zehntel Grad sind unterhalb der Fehlergenauigkeit für dessen Bestimmung.

Die vertikale Komponente muss (wie in Kap.5.2.2 berechnet) bei trockenen Bedingungen 0.421g, bei nassen Bedingungen 0.244g erreichen, um unter Berücksichtigung der vertikale Komponente die gleichen Verschiebungen zu erreichen. Im Mittel wurden beim L`Aquila Erdbeben 2009 bei der Station AQG bei nassen Bedingungen 34.5 cm/s², bei trockenen Bedingungen 39.78 cm/s² für die vertikale Beschleunigung oberhalb der horizontalen kritischen Beschleunigung gemessen.

Auch beim L'Aquila Erdbeben sind unter Berücksichtigung vertikaler Beschleunigungen keine signifikante Erhöhung der Verschiebungen zu erwarten und daher kann auf eine komplizierte Integration verzichtet werden.

5.3 Neue vereinfachte Newmark Methode

Vereinfachte Analysemethoden zur Berechnung von Verschiebungen berücksichtigen die Zeit oberhalb der kritischen Geländebeschleunigung nicht. Daher zeigen sie vielfach keine gute Korrelation mit der rigorosen Newmarkberechnung. Die hier neu eingeführte vereinfachte Analysemethode soll dem Rechnung tragen. Dabei wird ein Erdbebenimpuls als dreiecksförmig angenommen und dieser mit einem rechteckigen Impuls ausgedrückt (Abb.80). Δt = Zeit oberhalb der kritischer Beschleunigung.

$$a_{rel}(t) = 0.5(a_{max} - a_c)$$

$$v_{rel}(t) = 0.25(a_{max} - a_c)\Delta t$$

$$d_{rel}(t) = 0.125(a_{max} - a_c)\Delta t^2$$

Diese Berechnung ist lediglich für Erdbeben mit nur einem Impuls oberhalb der kritischen Beschleunigung gültig. Kramer (1996) gibt eine Schätzung für die Anzahl der Impulse eines Erdbebens mit $\frac{a_{max}}{a_c}$ an. Wird dies berücksichtigt, ändert sich die Gleichung zu:

$$d_{rel}(t) = 0.125 * (a_{max} - a_c) * \left(\frac{a_{max}}{a_c} \left(\frac{\Delta t}{\frac{a_{max}}{a_c}}\right)^2\right)$$

Mit $\frac{a_{max}}{a_c} = N_I$ kann die Formel vereinfacht dargestellt werden:

$$d_{rel}(t) = (a_{max} - a_c) * \frac{\Delta t^2}{8N_I}$$

Für die Eingangsbeschleunigungen von L`Aquila 2009 bei der Station AQG wurde die neu eingeführte vereinfachte Analysemethode mit der rigorosen Newmarkanalyse verglichen (Abb. 65, 66, 78 + 79).

Tabelle 15: Vergleich der vereinfachten Newmark AnalysemethodenTable 15: Comparison from the simplified Newmark analysis methods

			Simplified Newmark an	Rigorous Nemark	New simplified		
Conditions		critical acceleration	Kramer (1996)	Ambrases and Menu (1988)	Jibson and others (1998, 2000)	analysis	analysis
dry		0.122g	4.68 (max.: 24.49)	17.34	3.57	8.25	8.465
	with vertical correction	0.115g	4.97 (max.: 26.84)	18.92	3.91	9.78	9.469
	with topografic effect	0.115g	12.41 (max. 90.57)	37.87		33.74	
wet		0.069g	9.44 (max.: 75.51)	44.98	10.97	30.29	27.685
	with vertical correction	0.065g	10.02 (max.: 83.69)	48.59	12.16	37.7	31.239
	with topografic effect	0.065g	22.45 (max.: 254.84)	80.22		266.36	

Die Vergleiche zeigen, dass die neue Methode meist die beste Übereinstimmung mit der rigorosen Newmarkanalyse zeigt. Einzig bei kleinen Verschiebungen war Kramers permanente Verschiebung ähnlich genau. Jedoch zeigt diese keine klaren Maxima wie sie auch bei der rigorosen Berechnung vorkommen. Auch bei der neu eingeführten Analyse müssen die Maxima Verschiebungen nicht mit der der rigorosen Übereinstimmen, da mit einer mittleren Zeit pro Impuls gerechnet wird.



Abbildung 65: Vergleich der vereinfachten Newmarkmethoden, für trockene Bedingungen Figure 65: Comparison from simplified Newmark analysis, dry conditions

Abbildung 66: Vergleich der vereinfachten Newmarkmethoden, für nasse Bedingungen Figure 66: Comparison from simplified Newmark analysis, wet conditions



6.Ergebnisse

In dieser Arbeit wurde versucht den Einfluss eines Erdbebens auf Hanginstabilitäten zu zeigen. Am Beispiel der `Plattja` konnte ein relativ einfaches Modell erstellt werden, welches die Einwirkung verschiedener Effekte widergibt. Die vorgefundenen Verschiebungen auf der `Plattja`, von mehreren Metern, können durch die in dieser Arbeit berechneten seismisch induzierten Verschiebungen zum Grossteil erklärt werden. Es wird aber angenommen, dass weitere Effekte zu der vorgefundenen Situation geführt haben; Blockkippen an tiefgreifenden Diskontinuitäten, differentielle Bewegungen aufgrund von Eislinsen im Kluftsystem oder auch erhöhte Verschiebungen während die Front verstopft war und sich damit Porenwasserdruck aufbauen konnte, um nur einige weitere Möglichkeiten zu nennen, wären denkbar. Eine endgültige Klärung war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Die Geländecharakterisierung zeigt, dass praktisch im gesamten Untersuchungsgebiet die Schichtungsfläche, sowie die Kluftsysteme K1 und K2 für die Stabilität der Felsmassen verantwortlich sind. Diese drei Diskontinuitäten bilden bei der Gebirgsklasse G1 Blöcke von 10*10*7 m (Breite* Länge* Höhe). Die Gebirgsklasse ändert sich lokal in grossstrukturellen Bändern von mind. 10 m Mächtigkeit(meist erheblich grösser). Die Stabilität im Forschungsgebiet hängt stark von der Persistenz der Kluftsysteme und der Hangorientierung zusammen, welche zum Teil schwer abzuschätzen ist. Allgemein können folgende Fehlermechanismen beobachtet werden. In N- NE Wänden kann Keilgleiten an steilen Klüften erwartet werden (K₃/K₄). An E- SE Wänden kann mehrheitlich planares Gleiten an steilen Klüften und evtl. Rotationskippen durch K1 auf der Schichtung vorkommen. Bei S- SW- Wänden kann Blockkippen vorkommen, falls der Durchdringungsgrad von K3/K4 grösser 25 m. Zudem kann die damit verbundene Öffnung der Schichtungsparallelen Scherzonen vorkommen. Zusätzlich können bei dieser Orientierung Zugversagen an Chloritandern vorkommen. An W- NW Wänden kann ebenfalls planares Gleiten erwartet werden. Die geomechanische Disposition ergab, dass planares Gleiten auf der Schichtung kinematisch (statisch) nicht möglich ist. Auf der östlichen Talseite des Mattertals, sind grossstrukturell SSW-NNE streichende Lineamente über grosse Distanzen kartierbar. Die Stabilität der gesamten Region scheint durch solche Verbrüche bestimmt zu sein, doch sind sie im Untersuchungsgebiet durch die ausgedehnten Blockfelder nicht gut sichtbar. Daher wird empfohlen diese genauer zu untersuchen.

Die seismischen Untersuchungen ergaben, dass die seismisch induzierten Verschiebungen stark von der Polarisierung eines Erdbebens und damit ebenfalls von der Hangorientierung abhängt. Übersteigen die seismischen Beschleunigungen nur kapp die kritische Geländebeschleunigung, ist `nur` ein kleines Spektrum an sensitiven Hangorientierungen zu erwarten. Da die Verstärkung von eingehenden Erdbebenwellen aber stark mit der (Eigen-) Frequenz und dem Topographieeffekt zusammen hängen, werden zu deren Bestimmungen weitere seismische Messkampagnen, an geeigneten Standpunkten, empfohlen. Die vertikale Korrektur nach Ingles et al. (2006) ist ein einfaches Tool, welches die rigorose Newmarkanalyse verbessert. Eine Einbeziehung der vertikalen Beschleunigungskomponente erschwert dagegen die Berechnung von seismisch induzierten Verschiebungen und macht für ein zu erwartendes Erdbeben, mit den Gegebenheiten bei der `Plattja`, keinen Sinn.

Die neu eingeführte vereinfachte Newmark- Methode gibt die Möglichkeit, relativ schnell und genau erste vermutete Verschiebungen abzuschätzen, da sie die Zeit oberhalb der kritischen Geländebeschleunigung mit einbezieht. Um eventuelle Schwachstellen zu finden, werden weitere Vergleiche empfohlen.

7. Danksagung

Die Durchführung dieser interessanten und lehrreichen Masterarbeit war nur mit der Unterstützung zahlreicher Personen möglich. Aus diesem Grund möchte ich speziell folgenden Personen meinen aufrichtigen Dank aussprechen:

- Dr. Edward A. Button, Hauptbetreuer meiner Masterarbeit, der mich zur Durchführung dieser Arbeit motivierte und mir im Feld wie auch bei der Auswertung der Daten mit Rat und Tat zur Seite stand.
- Dr. Jeffrey R. Moore, Co- Betreuer der Arbeit, für die tolle Unterstützung und die Einbringung aufschlussreicher zusätzlicher Impulse, welche massgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.
- Herrn Kerry Leith für die Einbringung neuer Ideen durch Feldbeobachtungen.
- Herrn Valentin Gischig für seine schnelle und unkomplizierte Hilfe bei verschiedenen kleineren Problemen.
- Meinem Vater Beat und meiner Freundin Sigrid f
 ür ihre Unterst
 ützung bei den Feldarbeiten.
- Herrn Fredy Williner und Herrn Georges Schnydrig (Ingenieurbüro Fredy Williner
 AG) zur Verfügungsstellung der Nivellement Ausrüstung.
- Herrn Patrick Amoos und Herrn Michael Ruppen (Geologiebüro Odilo Schmid und Partner, Brig) für die Einsicht in verschiedene geologische Berichte.
- Herrn Mike Williner für seinen spektakulären Flug mit der Robinson zur Erstellung des 3D- Modelles.
- Herrn Claudio Ruff für die tollen Bilder aus der Gleitschirmperspektive.
- Meinen Studienkollegen Alexandra, Andreas (S), Christian, Dominik, Franziska (D), Kristian (N), Kenneth (N), Pål (N), Peter und Thomas für die vielen unterhaltsamen Stunden, wertvollen Diskussionen und die gemeinsam erlebte Studienzeit an der ETH.

Einen speziellen Dank gilt meiner Freundin Sigi und meiner ganzen Familie für die Unterstützung und die Geduld, welche sie für mich während der Erstellung dieser Arbeit aufgebracht haben.

8. Referenzen

- Baise L.G., M. A. S. D. G., M.ASCE; and Douglas Dreger (2003). "Site Response at Treasure and Yerba Buena Islands, California." JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING 415.
- Barton N. and Choubey V. (1976). "The Shear Strength of rock Joints in Theory and Practice." Rock Mechanics by Springer- Verlag 1977.
- Bieniawski, E. H. a. Z. T. (1965). "Brittle Rock Fracture Propagation In Rock Under Compression." International Journal of Fracture Mechanics 1: 137- 155.
- Bray, J. D. (2001). "DEVELOPING MITIGATION MEASURES FOR THE HAZARDS ASSOCIATED WITH EARTHQUAKE SURFACE FAULT RUPTURE." Seismic Fault Induced Failures 1.
- Brideau, M. Y., Doug Stead (2009). "The role of tectonic damage and brittle rock fracture in the development of large rock slope failures." Geomorphology 103(30- 49).
- Cook, N. (1992). "Natural Joints in Rock: Mechanical, Hydraulic and Seismic Behaviour and Properties under Normal Stress." Rock Mech. Mm. Sci. & Geomech 29(3): 198-223.
- D.K., K. (2002). "INVESTIGATING LANDSLIDES CAUSED BY EARTHQUAKES A HISTORICAL REVIEW." U.S. Geological Survey 23: 473- 510.
- Davis L., W. L. (1973). "OBSERVED EFFECTS OF TOPOGRAPHY ON GROUND MOTION." Bulletin of the Seismological Society of America 63(1): 283-398.
- Delacou B., C. S., Jean-Daniel Champagnac and Martin Burkhard (2004). "Present-day geodynamics in the bend of the western and central Alps as constrained by earthquake analysis." Geophys. J. Int. 158: 753- 774.
- Di Luzioa E., M. S., C. Espositob, G. Bianchi-Fasanib, G.P. Cavinatoa, G. Scarascia-Mugnozzab (2004). "Influence of structural framework on mountain slope deformation in the Maiella anticline (Central Apennines, Italy)." Geomorphology 60(417- 432).
- Eberhart-Phillips D., P. J. H., Jeffrey T. Freymueller, Arthur D. Frankel, Charles M. Rubin, Patricia Craw, Natalia A. Ratchkovski, Greg Anderson, Gary A. Carver, Anthony J. Crone, Timothy E. Dawson, Hilary Fletcher, Roger Hansen, Edwin L. Harp, Ruth A. Harris, David P. Hill, Sigru´n Hreinsdo´ttir, Randall W. Jibson, Lucile M. Jones, Robert Kayen, David K. Keefer, Christopher F. Larsen, Seth C. Moran, Stephen F. Personius, George Plafker, Brian Sherrod, Kerry Sieh, Nicholas Sitar, Wesley K. Wallace (2003). "The 2002 Denali Fault Earthquake, Alaska: A Large Magnitude, Slip-Partitioned Event." Schience 300(1113).
- EINSTEIN H.H., D. V., G. B. BAECHER, K. J. O'REILLY (1983). "The Effect of Discontinuity Persistence on Rock Slope Stability." J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 20(5): 227-236.

- Fritsche S, F. D., Gisler M. and Giardini D (2006). "Reconstructing the damage field of the 1855 earthquake in Switzerland: historical investigations on a well-documented event." Geophys. J. Int. 166: 719-731.
- GEER Association Report No. GEER-016, September 2009: "Preliminary Report on the Seimological and Geotechnical Aspect of the April 6 2009 L`Aquila Earthquake in Central Italy (Version 2.0)
- Gipprich, R. K. S., R. W. Jibson and W. Kimman (2008). "The role of shear and tensile failure in dynamically triggered landslides." Geophys. J. Int. 172: 770-778.
- Harp, J. A. C. a. E. L. (2007). "Influence of tectonic folding on rockfall susceptibility, American Fork Canyon, Utah, USA." Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 7: 1- 14.
- Harrison J., J. H. (2001). ENGINEERING ROCK MECHANICS.
- Havenith H.-B., M. V., D. Jongmans & E. Faccioli (2003). "Initiation of earthquake-induced slope failure: influence of topographical and other site specific amplification effects." Journal of Seismology 7: 397- 412.
- Herz T., L. K. H. G. (2003). Thermal regime within coarse debris of talus slopes in the alpine periglacial belt and its effect on permafrost. J. L. U. Institute for Geography, Giessen.
- Heuze F., R. A., F. Bonilla, S. Day, M. Doroudian, A. Elgamal, S. Gonzales, M. Hoehler, T. Lai, D. Lavallee, B. Lawrence, P.-C. Liu, A. Martin, L. Matesic, B. Minster, R. Mellors, D. Oglesby, S. Park, M. Riemer, J. Steidl, F. Vernon, M. Vuceticd, J. Wagoner, Z. Yang (2004). "Estimating site-specific strong earthquake motio." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24: 199-223.
- Hoek, E. (1964). "Fracture of Anisotropic Rock." Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy 64(10): 501- 518.
- Hoek E., J. R., Antonio Karzulovic and Zu Yu Chen (2000). "Rock slopes in Civil and Mining Engineering." International Conference on Geotechnical and Geological Engineering(19- 24).
- Hoek E., M. P. G., Marinos V.P. (2005). "Characterisation and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses." International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 42: 277- 285.
- Hoek E., P. M., M. Benissi (1998). "Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation." Bull Eng Geol Env 57: 151-160.
- Hoek, P. M. a. E. "GSI: A GEOLOGICALLY FRIENDLY TOOL FOR ROCK MASS STRENGTH ESTIMATION."
- Hoek, P. M. a. E. (2001). "Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch." Bull. Engg. Geol. Env. 60: 85- 92.

- Ingles, D., Soula (2006). "Effects of the vertical component of ground shaking on earthquake-induced landslide displacements using generalized Newmark analysis." Engineering Geology 86: 134- 147.
- John (Jack) F. Shroder, L. C., Kimberlee L. Mulhern (2005). "Slope-failure analysis and classification: Review of a century of effort." Physical Geography 26(3).
- Joyner, D. M. B. a. W. B. (1997). "Site Amplifications for Generic Rock Sites." Bulletin of the Seismological Society of America 87(2): 327-341.
- K., B. N. B. S. B. (1985). "Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract 22(3): 121- 140.
- KANTH, R. N. I. a. S. T. G. R. (2006). "Strong Ground Motion Estimation During the Kutch, India Earthquake." Pure appl. geop 163: 153- §173.
- Kastrup U., Z. M. L., Deichmann N., Evans K.F., Giardini D, and Michael A.J. (2004). "Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions." JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 109(B01402).
- Keefer, D. K. (1984). "Rock Avalanches Caused by Earthquakes: Source Characterist." Science, New Series 223(4642): 1288- 1290.
- Kieffer, B. R. E. G. a. D. S. (2000). "BEHAVIOR OF ROCK IN SLOPES." JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING(675).
- King L., T. H., Rüdiger HOF & Simone PHILIPPI (2003). Permafrost Degradation and Natural Hazard Management in the Matter Valley, Swiss Alps, Justus Liebig University Giessen, Department of Geography.
- Kramer S.L. (1996): "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice- Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics. Chapter 10, Pages 423-463
- Kumsar H., O. A., and R. Ulusay (2000). "Dynamic and Static Stability Assessment of Rock Slopes Against Wedge Failures." Rock Mech. Rock Engng. 33(1): 31- 51.
- Leshchinsky D., M., ASCE, and Ka-Ching (1994). "PSEUDOSTATIC SEISMIC STABILITY OF SLOPES: DESIGN CHARTS." Journal of Geotechnical Engineering 120(9).
- Lawrence et al. (1973). "Observed Effects of Topography on Ground Motion." Bulletin of the Seimological of America. Vol. 63, No. 1, pp. 283- 298
- Lindwall, S. L. K. a. N. W. (2004). "Dimensionality and Directionality Effects in Newmark Sliding Block Analyses." JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING 303.

- Ling H.I., Y. M., T. Kawabata (1999). "Seismic analysis of sliding wedge: extended Francais–Culmann's analysis." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 18: 387- 393.
- LOUKIDIS D., P. B. a. R. S. (2003). "Stability of seismically loaded slopes using limit analysis." Geotechnique 53(5): 463- 479.
- Maurer H.R., M. B., N. Deichmann and A. G. Green (1997). "Active tectonism in the central Alps: contrasting stress regimes north and south of the Rhone Valley." Terra Nova 9: 91- 94.
- Meunier P., N. H., John Allan Haines (2008). "Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides." Earth and Planetary Science Letters 275: 221- 232.
- Meunier Patrick, N. H., and A. John Haines (2007). "Regional patterns of earthquake-triggered landslides and their relation to ground motion." GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 34(L20408).
- Nichol S.L., O. H., and S.G. Evan (2002). "Large-scale brittle and ductile toppling of rock slopes." Can. Geotech. J 39: 773- 788.
- Popescu, M. E. "LANDSLIDE CAUSAL FACTORS AND LANDSLIDE REMEDIATIAL OPTIONS."
- Rickenmann, D. (1999). "Empirical relationships for debris flows." Natural Hazards 19: 47.77.
- Rodrigueza C.E., J. J. B., R.J. Chandler (1999). "Earthquake-induced landslides: 1980–1997." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 18: 325- 346.
- Schlatter A., S. D., Geiger A., Kahle H-G. (2005). "Recent vertical movements from precise levelling in the vicinity of the city of Basel, Switzerland." Int J Earth Sci 94: 507- 514.
- Seryi, A. (2000). Recent Ground Motion Studies at SLAC. 7th European Particle Accelerator Conferences. E. 2000. Vienna.
- Shi B., A. A., Yuehua Zeng, and James N. Brune (1996). "Rocking and Overturning of Precariously Balanced Rocks by Earthquakes." Bulletin of the Seismological Society of America 86(5): 1364-1371.
- Sitar N. and Clough G. (1983). "Seismic response of steep slopes in cemented soils." J. Geotech. Eng. ASCE, 109, 210- 227
- Sitar N., M. A., MacLaughlin M. M., and Doolin D. M. (2005). "Influence of Kinematics on Landslide Mobility and Failure Mode." JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING 716.
- Stoffel, H. G. a. M. (2002). DETAILED MAPPING AND DENDROGEOMORPHOLOGICAL ANALYSIS OF A DEBRIS FLOW TORRENT IN SWITZERLAND. INTERPRAEVENT. Pacific Rim Matsumoto / Japan. 1: 199-207.

- Stoffel, M. (2003). Leben mit Naturgefahren: Gefahrenbeurteilung, Massnahmenplanung und Katastrophenbewältigung. 54. Deutscher Geographentag. G. BERNENSIA. Bern.
- Stoffel M., Lièvre I., Conus D., Grichting M.A., Raetzo H. Gärtner H.W. and Monbaron M. (2005): "400 Years of Debris- Flow Activity and Triggering Weather Conditions: Rittigraben, Valais, Switzerland" Arctic, Antarctic, and Alpine Research, Vol. 37, No.3, pp.387-395
- Tien-Chien Chena, M.-L. L., Ju-Jiang Hung (2003). "Pseudostatic analysis of Tsao-Ling rockslide caused by Chi-Chi earthquake." Engineering Geology 71(31- 47).
- Wen-Fei Peng, C.-L. W., Shih-Tsu Chen, Shing-Tsz Le (2008). "A seismic landslide hazard analysis with topographic effect, a case study in the 99 Peaks region, Central Taiwan." Springer-Verlag.
- Wen-Fei Peng, C.-L. W., Shih-Tsu Chen, Shing-Tsz Lee (2009).
 "Incorporatingtheeffectsoftopographicamplificationandsliding areasinthemodelingofearthquakeinducedlandslidehazards, using thecumulativedisplacementmethod." Computers & Geosciences 35: 946- 966.
- Yang, X.-L. (2007). "Seismic displacement of rock slopes with nonlinear Hoek–Brown failure criterion." International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 44: 948- 953.
- Yossef H. Hatzor, M. A. (2003). "Keyblock Stability in Seismically Active Rock Slopes—Snake Path Cliff, Masada." JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING 697.
- Zürich, E. (2002). Earthquake Catalogue of Switzerland. S. S. Service. Zürich, ETH.

9.Anhang

9.1 Geländecharakterisierung

Tabelle 16: Nivellement, Vermessung

Table 16: Nivellement, all measurement points

					Höhe ge	gen Punkt 11						
	Azimut	Höhe	Distanz	Horiz.		Höhe Stativ	Höhe genormt	Auf Punkt 11	Koordinaten von 1	1 aus A	Iplot winkel	Höhe
1			-10.84	-51.7	-14.79	1.47			191.84	52.82		
1.11	130	1.89	27.53	27.526796			-1.81	-15.13			-40	-0.34
1.12	188	4.005	6.92	6.4389576			-3.925	-17.245			-98	-2.455
1.13	255	5.05	7.88	7.01982906			-4.97	-18.29			-165	-3.5
1.14	300	3.69	16.48	16.3297887			-3.61	-16.93			-210	-2.14
1.15	302	5.13	22.1	21.7948251			-5.05	-18.37			-212	-3.58
1.16	308	4.32	27.1	26.9497217			-4.24	-17.56			-218	-2.77
1.17	309	3.07	22.37	22.3127071			-2.99	-16.31			-219	-1.52
1.18	316	1.55	25.68	25.6798754			-1.47	-14.79			-226	0
1.19	321	1.62	19.7	19.6994289			-1.54	-14.86			-231	-0.07
12	327	1.83	4.66	4 64607361			-1.75	-15.07			-237	-0.28
1 21	329	1.05	14 55	14 5442222			-0.98	-14 3			-239	0.20
1 22	72	0.08	1	3 75071993			0.50	-13 32			18	1.47
1.22	72	0.00		3.73071333			0	15.52			10	1.47
2			25 72	20.65	10.02	1 17			220	40.01		
2 11	450	4.03	-25.72	-50.05	-10.05	1.1/	4.40	12.22	220	40.01	(2)	2.20
2.11	153	4.83	26.36	26.1046739			-4.46	-13.32			-63	-3.29
2.12	1/6	3.37	6.96	6.60315076			-3	-11.86			-86	-1.83
2.13	201	3.75	7.04	6.5502061			-3.38	-12.24			-111	-2.21
2.14	230	3.23	5.6	5.20734097			-2.86	-11.72			-140	-1.69
2.15	285	1.93	4.1	4.02894527			-1.56	-10.42			-195	-0.39
2.16	287	3.085	12.15	11.9981363			-2.715	-11.575			-197	-1.545
2.17	298	1.805	3.56	3.5029095			-1.435	-10.295			-208	-0.265
2.18	306	2.205	21.2	21.1747202			-1.835	-10.695			-216	-0.665
2.19	316	1.325	7.63	7.62842546			-0.955	-9.815			- 226	0.215
2.2	340	0.37	6.64	6.59163106			0	-8.86			-250	1.17
2.21	127	1.23	3.94	3.93954312			-0.86	-9.72			-37	0.31
2.22	136	1.74	15.12	15.1092521			-1.37	-10.23			-46	-0.2
2.23	140	3.51	35.48	35.4027513			-3.14	-12			-50	-1.97
2.25	1/1	<u>4</u> /7	30.10	38.8643474			-4 05	-12 01			_51	-7.89
2.24	1/17	2 705	25 /6	25.402029			-7 /75	-11 795			_51	-1 255
2.25	142	2.795	20.40	20.7000000			-2.423	-11.203			-32	.1.200
-			20.42	40.77	F 45	4 4 4			227	27.52		
3	25.5		-20.13	-18.77	-5.45	1.18		0	227	21.52		
3.11	234	4.86	10.36	9.68437917			-4.59	-8.86			- 144	-3.41
3.12	234	3.05	5.73	5.41627178			-2.78	-7.05			-144	-1.6
3.13	275	4.79	11.66	11.0870871			-4.52	-8.79			-185	-3.34
3.14	275	5.75	14.91	14.1923641			-5.48	-9.75			-185	-4.3
3.15	308	3.38	11.29	11.0735767			-3.11	-7.38			-218	-1.93
3.16	308	4.38	12.39	11.9696324			-4.11	-8.38			-218	-2.93
3.17	308	4.8	17.55	17.1725974			-4.53	-8.8			-218	-3.35
3.18	310	3.76	19.12	18.9451313			-3.49	-7.76			-220	-2.31
3.19	322	2.03	14.85	14.8256534			-1.76	-6.03			-232	-0.58
3.2	1.5	0.27	11.07	11.0325337			0	-4.27			88.5	1.18
3.21	162	4.57	18.73	18.4206623			-4.3	-8.57			-72	-3.12
3 22	180	4 15	11 94	11 5647179			-3.88	-8 15			-90	-2.7
3.22	206	1 635	0.26	0 37339657		Punkt 12	-1 365	-5 635			-116	-0 185
5.25	200	1.000	0.20	0.37333037		1 01180 12	1.505	5.055			110	0.105
				22.27		1.4			100	22.27		
4	270	5.75	20.50	-22.27	-1.4	1.4	5.45	5.45	180	22.27	100	1.05
4.11	2/0	5.75	20.58	20.1150168			-5.45	-5.45			-180	-4.05
4.12	301.5	4.57	23.25	23.0328808			-4.27	-4.27			-211.5	-2.87
4.13	304	2.57	13.49	13.4391666			-2.27	-2.27			-214	-0.87
4.14	0	0.3	22.3	22.2728534		Punkt 11	0	0			90	1.4
4.15	37	0.13	7.6	7.49313686			0.17	0.17			53	1.57
4.16	90	0.04	9.11	9.00791319			0.26	0.26			0	1.66
4.17	130.5	0.94	14.73	14.7228156			-0.64	-0.64			-40.5	0.76
4.18	130.5	0.43	26.36	26.3421468			-0.13	-0.13			-40.5	1.27
4.19	145	2.61	17.67	17.6285223			-2.31	-2.31			-55	-0.91
4.2	145	3.51	26.37	26.2854484			-3.21	-3.21			-55	-1.81
4.21	180	4.76	14.3	13.8996547			-4.46	-4.46			-90	-3.06
4.22	198	5.75	15.3	14.6685889			-5.45	-5.45			-108	-4.05
							2.15					
5			17 /6	-6.88	-0.72	0 72			111 5	18.77		
5 11	291 5	0.6	18 77	18.7696164	0.72	Punkt 11	0	0			-201 5	0.72
5.11	16	2 7/10	£ 07	6 112/2701			-3 1/6	-3 1/5			74	-2 12
5.12	10	3.745	11.07	10 0020000			-3.143	-3.145			74	·2.423 1 31
5.13		2.03	11.0/	14.9774505			-2.03	-2.03			25	-1.31
5.14	/9	1.9/5	14.93	14.0//1595			-1.3/5	-1.3/5			11	-0.055
5.15	/3.5	3.46	29.09	28.9006/16	L		-2.86	-2.86			16.5	-2.14
-			10.00			4 0000			72.45	44.47		
6			13.85	4.19	-4.54	1.395			73.15	14.4/		
6.11	134.5	0.145	7.53	7.42552355			0	-3.145			-44.5	1.395
6.12	91	1.825	3.72	3.69506428			-1.68	-4.825			-1	-0.285
6.13	91	0.39	27.73	27.7117822			-0.245	-3.39			-1	1.15
6.14	92	1.55	17.26	17.259304			-1.405	-4.55			-2	-0.01
6.15	80	2.465	10.06	10.0029346			-2.32	-5.465			10	-0.925
6.16	65.5	2.8	7.33	7.19408611			-2.655	-5.8			24.5	-1.26
6.17	26	4.36	6.86	6.18614379			-4.215	-7.36			64	-2.82
7			9,48	13.91	-8.47	1.11			34.28	16.84		
7.11	120 5	0.35	8.74	8,2048766			0	-7.36		- T	-30 5	1.11
7.11	110	0.33	6.04	6 04251602			0.0	7.30			20.5	1.11 A 01
7.12	110	0.05	0.06	3 02720004			-0.3	-7.00			-20	0.01
7.13	128	1.305	5.03	5.02/20994			-0.03	-7.99			-38	0.46
7.14	151	1.395	5.97	2.20219330			-1.045	-8.405			-01	0.005
/.15	236	1.995	5.97	5.90403887			-1.645	-9.005			-146	-0.535
7.16	257	1.8	2.83	2.74459469			-1.45	-8.81			-167	-0.34
7.17	295	2.16	7.66	7.58769398			-1.81	-9.17			-205	-0.7
7.18	295	2.73	11.77	11.6579801			-2.38	-9.74			-205	-1.27
7.19	266.5	2.725	13.02	12.9194495			-2.375	-9.735			-176.5	-1.265
7.2	279.5	3.99	12.9	12.5744026			-3.64	-11			-189.5	-2.53
7 21	273	4.83	22.28	21.9672483			-4.48	-11.84			-183	-3.37

8	3		-30.79	17.97	-13.2	1.36	Î		300.27	35.65		
8.11	99	0.25	18.6	18.5668495	-0		0	-11.84				9 1.36
8.12	165	2 435	16.77	16 7355094			-2 185	-14 025			-7	5 -0.825
8.13	177	1.84	19.82	19 8141868			-1 59	-13.43			-8	7 -0.23
8 14	208	4 27	12.81	12 4750952			-4.02	-15.86			-11	8 -2.66
9.15	200	4.27	12.01	12 8526010			-4 205	-16.045			-12	2.00
8.15	222	2 63	7 31	7 19883324			-4.203	-10.043			-13	5 -1.02
8.10	223.5	5.12	7.51	0.26212258			-2.38	-14.22			-133.	5 -1.02
0.17	200	2 705	5.1	9.20213236 A 01044865			-4.00	-10.72			-1/	7 -1.095
0.10	20/	2.703	5.1	4.91944603			-2.435	-14.295			-19	-1.095
8.19	1	4.945	0.8	5.77821555			-4.095	-10.535			8	-3.335
8.2	82	0.665	6.67	6.63369241			-0.415	-12.255				6 0.945
8.21	. 4	3.84	5.15	4.51354628			-3.59	-15.43			8	-2.23
			45.00	10.50	17.64				005.04	17.61		
9	,		-45.96	12.52	-17.61	1.565	-		285.24	47.64		
9.11	. 122	0.04	7.9	7.75141116			0	-16.045			-3.	2 1.565
9.12	160	1.905	16.98	16.9765957			-1.865	-17.91			-7	0 -0.3
9.13	187	3.8	12.28	12.0748986			-3.76	-19.805			-9	7 -2.195
9.14	201	4.31	10.75	10.3936267			-4.27	-20.315			-11	1 -2.705
9.15	212.5	4.58	9.32	8.81885338			-4.54	-20.585			-122.	5 -2.975
9.16	255.5	3.445	7.26	7.01236052			-3.405	-19.45			-165.	5 -1.84
9.17	299.3	0.62		#ZAHL!				-18.23			-209.3	-0.62
9.18	3 287	3.8	10.47	10.2286693			-3.76	-19.805			-19	7 -2.195
9.19	326.5	3.7	13.14	12.9653914			-3.66	-19.705			-236.	5 -2.095
9.2	349	2.905	8.3	8.19111714			-2.865	-18.91			-25	9 -1.3
9.21	22.5	3.17	11.4	11.2864509			-3.13	-19.175			67.5	5 -1.565
9.22	36	3.75	15.3	15.1431759			-3.71	-19.755			54	4 -2.145
5.22		5.75	10.0				3.71	_5., 55				2.115
10			-58 01	1/ 60	-20 44	0.635	1		284	60 71		1
10 11	75	0 507	- 30.31	3 2607702	20.44	0.035	^	-10 205	204	00.71	11	5 0.625
10.11	154	2.557	0.27	9 16720001			U _1 710	-12.005				1 _1 097
10.12	154	2.315	9.32	1/ 967/704			-1./18	-21.523			-04	-1.083
10.13	154	2	14.93	16.0020205			-1.403	-21.208			-0	+ -0.768
10.14	1/9.5	4.94	16.65	10.0838265			-4.343	-24.148			-89.	-3./08
10.15	180	3.89	10.48	9.96169539			-3.293	-23.098			-9	-2.658
10.16	213.5	4.49	7.77	b./4624896			-3.893	-23.698			-123.	-3.258
10.17	277	4.345	8.04	7.13284656			-3.748	-23.553			-18	7 -3.113
10.18	312.5	4.235	9.64	8.94257234			-3.638	-23.443			-222.	5 -3.003
10.19	344	4.73	13.96	13.3458823			-4.133	-23.938			-254	4 -3.498
10.2	358	3.935	7.75	7.0123106			-3.338	-23.143			-26	8 -2.703
11			-72.53	16.32	-25.24	1.687			282.68	74.34		
11.11	. 98	0	6.8	6.58741459			0	-23.553			-4	8 1.687
11.12	133	1.42	9.9	9.89639889			-1.42	-24.973			-43	3 0.267
11.13	150	3.58	14.24	14.1136158			-3.58	-27.133			-6	-1.893
11.14	154	3.27	27.85	27.8049746			-3.27	-26.823			-6	4 -1.583
11.15	193.5	5.45	11.8	11.1839095			-5.45	-29.003			-103.	5 -3.763
11.16	241	3.56	6.3	6.01513682			-3.56	-27.113			-15	1 -1.873
11 17	249 5	2 954	4.85	4 6815821			-2 954	-26 507			-159	5 -1 267
11.17	2 15:5	2.501	6.79	6 5217121			-2 505	- 27.058			-18	7 -1 919
11.10	294	5.505	12 38	12 0790741			-4.4	-27.050			-20	4 _2 713
11.19	254	4.4	12.30	7 70471120			-4.4	-27.955			-20	-2.713
11.2	356.5	1.4	7.79	7.78471136			-1.4	-24.953			-266.	5 0.287
11.21	29.5	1.86	8.82	8.81830318			-1.86	-25.413			60.	-0.1/3
11.22	49	1.29	6.14	6.12/15195			-1.29	-24.843			4	1 0.397
			00.04	44.65	00.45	1 107			070.45	00.00		
12			-88.01	14.65	-29.15	1.197	-		279.45	89.22		
12.11	. 34	0.487	7.98	7.94835203			0	-27.953			5	5 1.197
12.12	148	4.42	32.65	32.4905336			-3.933	-31.886			-5	8 -2.736
12.13	153.5	2.215	5.23	5.12996842			-1.728	-29.681			-63.	5 -0.531
12.14	160	3.6	15.18	14.9885954			-3.113	-31.066			-70	-1.916
12.15	166.5	2.595	8.78	8.66798685			-2.108	-30.061			-76.	5 -0.911
12.16	5 173	5.31	20.04	19.613384			-4.823	-32.776			-8	-3.626
12.17	187	4.37	14.57	14.2203014			-3.883	-31.836			-9	-2.686
12.18	202.5	4.61	12.7	12.2328014			-4.123	-32.076			-112.	-2.926
12.19	204.5	4.725	14.91	14.4865909			-4.238	-32.191			-114.	-3.041
12.2	204.5	5.21	17.79	17.3314723			-4.723	-32.676			-114.	-3.526
12.21	227.5	5.105	12.6	11.9786283			-4.618	-32.571			-137.	-3.421
12.22	268	3.765	9.88	9.5404285			-3.278	-31.231			-17	-2.081
12.23	284.5	3.555	8.8	8.47819769			-3.068	-31.021			-194.	-1.871
12.24	318.5	1.945	3.83	3.7562476			-1.458	-29.411			-228.	-0.261
13	1		-90.61	-7.07	-33,64	1.44			265.54	90.89		
13 11	350	በ በጽร	8 44	8,33052069			n	-32 101		11.55	-26) 1 4/19
12 17	150 5	2.005	Δ.44	4.39782901			-7 155	-34 346				5_0706
12 12	150.5	2.24	4.4/ Q C	8 507022			-2.1.05	_2/ 201			-00.	1 161
12.13	120.5	2.035	0.0 2 75	3 65300335			-2.01 _2 202	-34.001			-00.:	-1.101
13.14	109	2.28/	3.75	9 01740004			-2.202	-54.593			-9	-0.753
13.15	189	3.80	9.24	0.91/40001			-3.7/5	-35.500			-9	-2.320
13.16	189	4.843	12.68	12.214820/			-4.758	-30.949			-9	-3.309
13.1/	238.5	2.435	4.4	4.20002088			-2.35	-34.541			-148.	-0.901
13.18	238.5	2.99	6.33	0.13/29582			-2.905	-35.096			-148.	-1.456
13.19	238.5	3.414	7.7	7.44266914			-3.329	-35.52			-148.	-1.88
13.2	238.5	3.88	10.17	9.87295802			-3.795	-35.986			-148.	-2.346
13.21	260	5.24	18.24	17.8397758			-5.155	-37.346			-170	-3.706
13.22	272.5	3.035	9.78	9.64906084			-2.95	-35.141			-182.	5 -1.501
13 23		3.395	12.37	12.2145354			-3.31	-35.501			-182.	5 -1.861
15.25	272.5			C 0			2 105	-34.376			-20	7 -0.736
13.24	272.5 297	2.27	6.31	6.2551/386			-2.185					
13.24 13.25	272.5 297 303.5	2.27 2.87	6.31 12.95	6.25517386 12.8708042			-2.185	-34.976			-213.	5 -1.336
13.24 13.25 13.26	272.5 297 303.5 303.5	2.27 2.87 3.38	6.31 12.95 19.18	6.25517386 12.8708042 19.0816352			-2.185 -2.785 -3.295	-34.976 -35.486			-213. -213.	5 -1.336 5 -1.846
13.25 13.25 13.26 13.27	272.5 297 303.5 303.5 303.5 326	2.27 2.87 3.38 1.6	6.31 12.95 19.18 18.2	6.25517386 12.8708042 19.0816352 18.1992967			-2.185 -2.785 -3.295 -1.515	-34.976 -35.486 -33.706			-213. -213. 23	5 -1.336 5 -1.846 5 -0.066
13.24 13.24 13.25 13.26 13.27 13.27	272.5 297 303.5 303.5 303.5 303.5 326 326	2.27 2.87 3.38 1.6 1.52	6.31 12.95 19.18 18.2 22.74	6.2551/386 12.8708042 19.0816352 18.1992967 22.7398593			-2.185 -2.785 -3.295 -1.515 	-34.976 -35.486 -33.706 -33.626			-213. -213. -23 -23	5 -1.336 5 -1.846 5 -0.066 50.014
13.24 13.24 13.25 13.26 13.27 13.28 13.29	272.5 297 303.5 303.5 326 326 334.5	2.27 2.87 3.38 1.6 1.52 0.52	6.31 12.95 19.18 18.2 22.74 17.63	6.2551/386 12.8708042 19.0816352 18.1992967 22.7398593 17.6059791			-2.183 -2.785 -3.295 -1.515 -1.435 -0.435	-34.976 -35.486 -33.706 -33.626 -32.626			-213. -213. -23. -23. -23. -24.	5 -1.336 5 -1.846 5 -0.066 5 0.014 5 1.014
13.24 13.24 13.25 13.26 13.27 13.28 13.29 13.29	272.5 297 303.5 303.5 326 326 334.5 338.5	2.27 2.87 3.38 1.6 1.52 0.52 0.46	6.31 12.95 19.18 18.2 22.74 17.63 22.87	6.25517386 12.8708042 19.0816352 18.1992967 22.7398593 17.6059791 22.8489934			-2.183 -2.785 -3.295 -1.515 -1.435 -0.435 -0.375	-34.976 -35.486 -33.706 -33.626 -32.626 -32.566			-213. -213. -23. -23. -23. -24. -244. -248.	5 -1.336 5 -1.846 5 -0.066 5 0.014 5 1.014 5 1.074

14			-101 95	-16 57	-37 54	1 55			260 77	103 29		
14 11	34	0 115	5.42	5 22658349	57.54	1.55	0	-35 986	200.77	105.25	56	1 554
14.11	120	1 745	1 91	1 90001974			-1 63	-37 616			-30	-0.076
14.13	120	1.734	8.1	8.09790985			-1.619	-37.605			-30	-0.065
14.14	120	1.89	19.52	19.5170387			-1.775	-37.761			-30	-0.221
14.15	129	3.44	14.85	14.7292362			-3.325	-39.311			-39	-1.771
14.16	138	5.02	23.42	23.161509			-4.905	-40.891			-48	-3.351
14.17	142	4.76	18	17.7114624			-4.645	-40.631			-52	-3.091
14.18	157	4.45	12.86	12.5287509			-4.335	-40.321			-67	-2.781
14.19	161	3.805	8.97	8.68192807			-3.69	-39.676			-71	-2.136
14.2	172	4.65	11.7	11.2818438			-4.535	-40.521			-82	-2.981
14.21	180	2.565	4.08	3.95173063			-2.45	-38.436			-90	-0.896
14.22	275	2.325	4.58	4.51395337			-2.21	-38.196			-185	-0.656
15			-75.68	-47.57	-42.3	1.409			237.85	89.39		
15.11	322	0.145	17.54	17.4943964			0	-40.891			-232	1.409
15.12	308	1.54	20.5	20.4995814			-1.395	-42.286			-218	0.014
15.13	309	1.825	16.78	16.7748426			-1.68	-42.571			-219	-0.271
15.14	262	6.2	23.52	23.0268695			-6.055	-46.946			-172	-4.646
15.15	260	5.27	19.59	19.2057486			-5.125	-46.016			-170	-3.716
15.16	258	4.74	12.72	12.2761085			-4.595	-45.486			-168	-3.186
15.17	201.5	3.09	4.56	4.23884878			-2.945	-43.836			-111.5	-1.536
15.18	201.5	4.33	9.45	8.98722755			-4.185	-45.076			-111.5	-2.776
16			-106.1	13.1	-36.89	0			277.04	106.91		
16.11	32	0.42	5.23	5.13563813				-36.43		7.5m von P.152 (Ze	eile 18 58	0.46
16.12	243	4.84	5.4	3.67129405				-40.85		3.96	-153	-3.96
				0.00	10.15					440.70		
17		0.25	-112.41	8.29	-42.15	1.3	0	40.05	2/4.22	112.72	40	1.2
17.11	44	0.25	4.5	4.3/5/8564			0	-40.85			46	1.3
17.12	354	4.685	10.15	9.50892235			4.435	-45.285			-264	-3.135
17.13	357.5 202 E	Z.4 4 01E	4.3	4.30346463			2.15	-43			-207.5	-0.65
17.14	152	4.515	2.45	2 27199275			4.005	-45.515			-155.5	-3.303
17.15	135	2.05	5.45	5.57100575			1.78	-42.03			-03	-0.40
18			-122 72	-0.94	-46 595	1 08			269 56	122 73		
18 11	22	0 59	11 52	11.5095743	+0.555	1.00	0	-45,515	205.50	122.75	68	1 08
18.12	201.5	4.81	12.8	12.2444722			4.22	-49.735			-111.5	-3.14
18.13	239.5	4.4	10.85	10.329574			3.81	-49,325			-149.5	-2.73
18.14	282	4.6	7.45	6.56598051			4.01	-49.525			-192	-2.93
18.15	325.5	3.535	8.15	7.77145257			2.945	-48.46			-235.5	-1.865
18.16	352	3.635	10.2	9.87481519			3.045	-48.56			-262	-1.965













Legende

	Deckengrenzen
	Verbrüche
	Lineamente
	DSGSD_Grächen
	Doppelrücken
	Scarp
	Moräne
<u> Sex Se</u>	Gefahrenherd
	Blocksturzgebiet



9.2 Kluftöffnungsmessungen



Figure 69: Extensometer setup: PN +PO Abbildung 69: Versuchsaufbau Extensometer PN + PO



Figure 70: Extensometer setup: PU Abbildung 70: Versuchsaufbau Extensometer PU

Tabelle 17: Kluftöffnungsmessungen

Table 17: Extensometer measurements

Extensometermessstrecke PN1.1

Extensometer: Nullstellung bei eingef	Temperaturkoeffizient	11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C						
Datum: 29.09.2009			Streichrichtung der Messs	trecke: N011				
	Temperatu	r [°C]	Korrekturwert					
Eingehängt [m]	1.2							
Messungen [mm] 1	6.86	31	1.207293987					
2	6.85	18.4	1.20710759					
3								
4								
Endwert [m]			1.207200788					
Extensometermessstrecke	PN1.2							
Extensometer: Nullstellung bei eingef	ahrenem Instrument		Temperaturkoeffizient	11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C				
Datum: 29.09.2009			Streichrichtung der Messs	trecke:				
	Temperatu	r [°C]	Korrekturwert					
Eingehängt [m]	1.8	. [0]						
Messungen [mm] 1	48.68	19.8	1.849104605					
2	48.61	19	1.849017434					
3	48.79	11.6	1.849038773					
4	48.88	9.9	1.849092325					
Endwert [m]			1.849063284					
Extensometermessstrecke	PN1.3							
Extensometer: Nullstellung bei eingef	ahrenem Instrument		Temperaturkoeffizient	11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C				
Datum: 29.09.2009			Streichrichtung der Messs	trecke: N011				
	Temperatu	r [°C]	Korrekturwert					
Eingehängt [m]	1.8	. ,						
Messungen [mm] 1	14.1	20.4	1.814529289					
2	14.03	25.6	1.814568694					
3	14	24.4	1.814513435					
4	14.03	19	1.814429812					
Endwert [m]			1.814510307					
Extensometermessstrecke	PN1.4							
Extensometer: Nullstellung bei eingef	ahrenem Instrument		Temperaturkoeffizient	11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C				
Datum: 29.09.2009			Streichrichtung der Messs	trecke:				
	Temperatu	r [°C]	Korrekturwert					
Eingehängt [m]	2.1							
Messungen [mm] 1	37.78	32	2.138573544					
2	37.15	15	2.137521864					
3	36.9	12.6	2.137212329					
4	37.2	26.4	2.137854496					
Extensometermessstrecke	PN2	2						
--	--	--	---	---	----------------------------	--	--	--
Extensometer: Nullstellung be	ei eingefahre	nem Instrume	nt	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/	′°C			
Datum: 29.09.2009				Streichrichtung der Messstrecke: N022				
		Temperatur Korrekturwert						
Eingehängt [m]		5						
Messungen [mm]	1	52.55	-2.4	5.05240934				
	2	52.55	-1.4	5.05246795				
	3 4	52.4 52.43	-3.8 -3.8	5.05220729				
Endwert [m]				5.05231547				
Extensometermessstrecke	PN3	3						
Extensometer: Nullstellung be	ei eingefahre	nem Instrume	nt	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/	′°C			
Datum: 29.09.2009				Streichrichtung der Messstrecke: N	010			
		Tem	peratur	Korrekturwert				
Eingehängt [m]		1.7						
Messungen [mm]	1	40.22	2.2	1.74026441				
	2	40.29	5.2	1.74039497				
	4	40.16	3.7	1.74023469				
Endwert [m]				1.74033034				
Extensometermessstrecke	PO4	L						
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be	PO4 ei eingefahre	i nem Instrume	ent	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/	′°C			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009	PO4 2i eingefahre	l nem Instrume	ent	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N	′°C 055			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009	PO4 ei eingefahre	nem Instrume Temj	ent	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N <u>Korrekturwe</u> rt	′°C 055			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m]	PO4 ei eingefahre	nem Instrume Temj 0.6	ent peratur	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N <u>Korrekturwe</u> rt	′°C 055			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PO4 ei eingefahre	nem Instrume Temj 0.6 15.58	ont peratur 22.4	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N <u>Korrekturwe</u> rt 0.61573995	′°C 055			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PO4 2i eingefahre 1 2	Temj 0.6 15.58 15.4	ent peratur 22.4 19.6	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N <u>Korrekturwe</u> rt 0.61573995 0.61553992	′°C 055			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PO4 ei eingefahre	Temj 0.6 15.58 15.4 15.49 15.4	ent peratur 22.4 19.6 19 22.2	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.61573995 0.61553992 0.61555848	′°C 055			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PO4 ei eingefahre	Temj 0.6 15.58 15.4 15.49 15.4	ent <u>peratur</u> 22.4 19.6 19 22.2	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N <u>Korrekturwe</u> rt 0.61573995 0.61562565 0.61555848 0.61551616	″℃ 055			
Extensometermessstrecke	PO4 ei eingefahre 1 2 3 4 PO5	Temj 0.6 15.58 15.4 15.49 15.4	ent peratur 22.4 19.6 19 22.2	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.61573995 0.61553992 0.61555848 0.61555848	"°C			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Extensometer: Nullstellung be	PO4 2i eingefahre 1 2 3 4 PO5 2i eingefahre	rem <u>Tem</u> 0.6 15.58 15.4 15.49 15.4 15.4 15.49 15.4	ent 22.4 19.6 19 22.2	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N <u>Korrekturwe</u> rt 0.61573995 0.61553992 0.61562565 0.61555848 0.6155616 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/	″℃ 055			
Extensometermessstrecke	PO4 ei eingefahre 1 2 3 4 PO5 ei eingefahre	nem Instrume Temj 0.6 15.58 15.4 15.49 15.4 15.4 15.4 15.4 15.4 15.4	ent <u>peratur</u> 22.4 19.6 19 22.2	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.61573995 0.61553992 0.61562565 0.61555848 0.615616 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N	/°C 0555 /°C 0555			
Extensometermessstrecke	PO4 2i eingefahre 1 2 3 4 PO5 2i eingefahre	rem 15.58 15.4 15.49 15.4 15.4 15.4 15.4 Tem	ent 22.4 19.6 19 22.2 ent	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.61573995 0.61553992 0.61562565 0.61555848 0.6155616 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert	/°C 0555 /°C 0555			
Extensometermessstrecke	PO4 2i eingefahre 1 2 3 4 PO5 2i eingefahre	rem Instrume 0.6 15.58 15.4 15.49 15.4 15.	ent 22.4 19.6 19 22.2 ent	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.61573995 0.61553992 0.61562565 0.61555848 0.615616 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert	<pre>/°C //°C 0555</pre>			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PO4 ei eingefahre 1 2 3 4 PO5 ei eingefahre	rem Instrume 0.6 15.58 15.4 15.49 15.4 15.	ent <u>peratur</u> 22.4 19.6 19 22.2 ent ent <u>peratur</u> 18.4	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.61573995 0.61553992 0.61562565 0.61555848 0.615616 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.54293586	<pre>(°C</pre>			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PO4	nem Instrume Tem 0.6 15.58 15.4 15.49 15.4 15.4 15.4 15.4 2.42 15.4 Tem 0.5 42.82 42.74	ent 22.4 19.6 19 22.2 ent peratur 18.4 20.6	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.61573995 0.61553992 0.61562565 0.61555848 0.615616 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.54293586 0.54289586	/°C 055 /°C 055			
Extensometermessstrecke	PO4	nem Instrume Tem 0.6 15.58 15.4 15.49 15.4 15.4 15.4 2.42 15.4	ent 22.4 19.6 19 22.2 ent nt 18.4 20.6 11.6	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.61573995 0.61553992 0.61562665 0.61555848 0.6155616 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.54293586 0.54228303	/°C 055 ′°C 055			
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Extensometer: Nullstellung be Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PO4	rem Instrume 0.6 15.58 15.4 15.49 15.4 15.4 15.4 2.4 15.4	ent 22.4 19.6 19 22.2 ent ent 18.4 20.6 11.6 8	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.61573995 0.61573995 0.61553992 0.61562565 0.61555848 0.615616 0.615616 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/ Streichrichtung der Messstrecke: N Korrekturwert 0.54293586 0.54293586 0.54278303 0.54275036 0.54275036	<pre>'°C ''℃ 055</pre>			

Extensometermessstreck	e PO6	
Extensometer: Nullstellur	ng bei eingefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C
Datum: 29.09.2009		Streichrichtung der Messstrecke: No55
Eingehängt [m] Messungen [mm]	Temperat 0.5 1 46.33 2 46.3 3 46.38	ur Korrekturwert 8.6 0.54644788 9.8 0.54642547 1.6 0.54645352
Endwert [m]	4 46.29	8 0.5463407 0.54641689
Extensometermessstreck	e PO7	
Extensometer: Nullstellur	ng bei eingefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C
Datum: 29.09.2009		Streichrichtung der Messstrecke: No55
Eingehängt [m] Messungen [mm]	Temperat 0.45 1 32 2 2 32.04 3 3 32.07 2 4 32 2	ur Korrekturwert 2.6 0.48212636 23 0.48216861 2.8 0.4821975 3.2 0.48212972
Endwert [m]		0.48215555
Extensometermessstrecke	e PO8	
Extensometermessstrecke	e PO8 ng bei eingefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C
Extensometer: Nullstellur Datum: 29.09.2009	e PO8 ng bei eingefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055
Extensometermessstrecka Extensometer: Nullstellur Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	e PO8 ng bei eingefahrenem Instrument <u>Temperat</u> 1 11.99 2 2 12.03 2 3 12.02 2 4 12.07 1	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 ur Korrekturwert 4.6 0.91225025 2.6 0.9122691 3.4 0.91226756 6.4 0.91224351
Extensometer: Nullstellur Extensometer: Nullstellur Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	e PO8 ng bei eingefahrenem Instrument 0.9 1 11.99 2 2 12.03 2 3 12.02 2 4 12.07 1	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 ur Korrekturwert 4.6 0.91225025 2.6 0.9122691 3.4 0.91226756 6.4 0.91224351
Extensometermessstrecker Extensometer: Nullstellur Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] Extensometermessstrecker	e PO8 ng bei eingefahrenem Instrument Temperat 0.9 1 11.99 2 2 12.03 2 3 12.02 2 4 12.07 1 e PO9	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 ur Korrekturwert 4.6 0.91225025 2.6 0.9122691 3.4 0.91226756 5.4 0.91224351
Extensometermessstrecka Extensometer: Nullstellur Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] Extensometermessstrecka	e PO8 ng bei eingefahrenem Instrument 1 1 1 2 3 12.02 2 12.07 1 12.07	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 ur Korrekturwert 4.6 0.91225025 2.6 0.9122691 3.4 0.91226756 6.4 0.91224351 O.9122576 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C
Extensometermessstrecka Extensometer: Nullstellur Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Extensometer: Nullstellur Extensometer: Nullstellur	e PO8 Ing bei eingefahrenem Instrument Temperat 1 1 11.99 2 2 12.03 2 3 12.02 2 4 12.07 1 e PO9 Ing bei eingefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 ur Korrekturwert 4.6 0.91225025 2.6 0.9122691 3.4 0.91226756 5.4 0.9122576 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055
Extensometermessstrecker Extensometer: Nullstellur Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Extensometer: Nullstellur Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	e PO8 ng bei eingefahrenem Instrument Temperat 0.9 1 1 11.99 2 2 12.03 2 3 12.02 2 4 12.07 1 e PO9 Temperat ng bei eingefahrenem Instrument Temperat 1 44.77 1 3 44.77 1 3 44.71 1 4 44.68 1	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 <u>ur Korrekturwert</u> 4.6 0.91225025 2.6 0.9122691 3.4 0.91226756 5.4 0.91224351 * 0.9122576 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 <u>ur Korrekturwert</u> 14 0.54485847 2.6 0.54485847 2.6 0.54485847 2.6 0.54485847 2.6 0.54476055 3.2 0.5447634

	PO10.1					
Extensometer: Nullstellung bei	eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C				
Datum: 29.09.2009	Streichrichtung der Messstreck	ke: N055				
	Temperatur Korrekturwert					
Eingehängt [m] Messungen [mm]	0.85					
	2 17.53 17.2 0.86770309					
	3 17.54 24.2 0.86778354					
	4 17.53 21.6 0.86774737					
Endwert [m]	0.86774466					
Extensometermessstrecke	PO10.2					
Extensometer: Nullstellung bei	eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6	*10 ⁻⁶ ppm/°C				
Datum: 29.09.2009	Streichrichtung der Messstrech	ke: N055				
	Temperatur Korrekturwert					
Eingenangt [m] Messungen [mm]	1 40.8 21.8 7.24263105					
	2 40.71 16.4 7.24208747					
	3 40.69 17.6 7.24216826 4 40.63 19.2 7.24224263					
	4 40.03 13.2 7.24224203					
Endwert [m]	7.24228235					
Extensometermessstrecke						
	P011					
Extensometer: Nullstellung bei	PO11 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6	*10 ⁻⁶ ppm/°C				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009	PO11 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009	PO11 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PO11 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck Temperatur Korrekturwert 2.95 1 23.63 23.4 2.97443716	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PO11 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck Temperatur Korrekturwert 2.95 1 23.63 23.4 2.97443716 2 23.68 20 2.97436989	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	P011 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck <u>Temperatur Korrekturwert</u> 2.95 1 23.63 23.4 2.97443716 2 23.68 20 2.97436989 3 23.61 20.4 2.97431368 4 23.59 14 6 2.97409361	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	P011 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck <u>Temperatur</u> Korrekturwert <u>2.95</u> 1 23.63 23.4 2.97443716 2 23.68 20 2.97436989 3 23.61 20.4 2.97431368 4 23.59 14.6 2.97409361 <u>2.97430358</u>	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] Extensometermessstrecke	P011 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck <u>Temperatur Korrekturwert</u> <u>2.95</u> 1 23.63 23.4 2.97443716 2 23.68 20 2.97436989 3 23.61 20.4 2.97431368 4 23.59 14.6 2.97409361 <u>2.97430358</u> P012.1	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei	P011 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck Temperatur Korrekturwert 2.95 1 23.63 23.4 2.97443716 2 23.68 20 2.97436989 3 23.61 20.4 2.97431368 4 23.59 14.6 2.97409361 2.97430358 P012.1 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055 *10 ⁻⁶ ppm/°C				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.10.2009	P011 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck Temperatur Korrekturwert 2.95 1 23.63 23.4 2.97443716 2 23.68 20 2.97436989 3 23.61 20.4 2.97431368 4 23.59 14.6 2.97409361 2.97430358 P012.1 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055 *10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.10.2009	P011 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck Temperatur Korrekturwert 2.95 1 23.63 23.4 2.97443716 2 23.68 20 2.97436989 3 23.61 20.4 2.97431368 4 23.59 14.6 2.97409361 E.2.97430358 P012.1 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck Temperatur Korrekturwert	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055 *10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.10.2009 Eingehängt [m]	P011 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck Temperatur Korrekturwert 2.95 1 23.63 23.4 2.97443716 2 23.68 20 2.97436989 3 23.61 20.4 2.97430358 4 23.59 14.6 2.97430358 P012.1 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck Temperatur Korrekturwert 2.1	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055 *10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	P011 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck 1 23.63 23.4 2.97443716 2 23.68 20 2.97436989 3 23.61 20.4 2.97431368 4 23.59 14.6 2.97430358 P012.1 2.97430358 2.97430358 eingefahrenem Instrument Temperatur Korrekturwert 11,6 Streichrichtung der Messstreck 14.7 23.6 2.14228631 1 41.7 23.6 2.14228631 2 2 41.64 26.2 2.14228631 2	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055 *10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	P011 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck 1 2.95 1 23.63 23.4 2.97443716 2 23.68 20 2.97436989 3 23.61 20.4 2.97430358 4 23.59 14.6 2.97430358 P012.1 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck Temperatur Korrekturwert 2.1 1 41.7 23.6 2.14228631 2 41.64 26.2 2.14229089 3 3 41.64 24 2.14223623 2.97423623	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055 *10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				
Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei Datum: 29.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	P011 eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6 Streichrichtung der Messstreck Image: Construct Constru	*10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055 *10 ⁻⁶ ppm/°C ke: N055				

	PO12.2						
Extensometer: Nullstellung bei eingef	ahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C					
Datum: 29.09.2009		Streichrichtung der Messstrecke: N011					
	Temperatur Korrekturwert						
Eingehangt [m]	5 24 72 24 2	5 02612225					
2	34.72 24.2	5.03609998					
3	34.69 30	5.03644207					
4	34.66 26.8	5.03622518					
Endwert [m]		5 03622514					
Extensometermessstrecke	PO13	5105022514					
Extensometer: Nullstellung bei einget	ahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C					
Datum: 29.09.2009		Streichrichtung der Messstrecke: N055					
	Temperatur	Korrekturwert					
Eingehängt [m]	0.55	0 56164921					
2	11.57 7.4	0.56161821					
3	11.59 19	0.56171377					
4	11.57 19	0.56169377					
Endwert [m]		0.56166849					
Extensometermessstrecke	PO14						
Extensometer: Nullstellung bei eingef	ahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C					
Extensometer: Nullstellung bei eingel Datum: 29.09.2009	ährenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009	ahrenem Instrument Temperatur	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 <u>Korrekturwe</u> rt					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m]	Temperatur	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 <u>Korrekturwe</u> rt					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2	Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3	Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5 46.31 25.8	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473 3.54737134					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3 4	Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5 46.31 25.8 46.46 22.6	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473 3.54737134 3.54738974					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3 4 Endwert [m]	Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5 46.31 25.8 46.46 22.6	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473 3.54737134 3.54738974 3.54744183					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3 4 Endwert [m] Extensometermessstrecke	Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5 46.31 25.8 46.46 22.6 PU15.1	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473 3.54737134 3.54738974 3.54744183					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3 4 Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei eingef	Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5 46.31 25.8 46.46 22.6 PU15.1 Fahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473 3.54737134 3.54738974 3.54744183 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3 4 Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 02.10.2009	Fahrenem Instrument Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5 46.31 25.8 46.46 22.6 PU15.1 Fahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473 3.54737134 3.54738974 3.54744183 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N062					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3 4 Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 02.10.2009	Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5 46.31 25.8 46.46 22.6 PU15.1 Temperatur	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473 3.54737134 3.54738974 3.54744183 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N062 Korrekturwert					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m]	Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5 46.31 25.8 46.46 22.6 PU15.1 Temperatur Temperatur 1.05 49.47	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473 3.54768473 3.54737134 3.54738974 3.54744183 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N062 Korrekturwert					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3 4 Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1	Fahrenem Instrument Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5 46.31 25.8 46.46 22.6 PU15.1 Fahrenem Instrument Temperatur 1.05 48.47 5.6 48.41 7.4	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473 3.54737134 3.54738974 3.54744183 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N062 Korrekturwert 1.09854136 1.09854136					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3 4 Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1	Temperatur 3.5 46.4 22.4 46.43 30.5 46.31 25.8 46.46 22.6 PU15.1 Temperatur 1.05 48.47 5.6 48.41 7.4 48.46 4.6	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.54768473 3.54737134 3.54738974 3.54744183 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N062 Korrekturwert 1.09854136 1.09850429 1.09851861					
Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 29.09.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3 4 Endwert [m] Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei eingef Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] 1 2 3 4	Fahrenem Instrument Temperatur 3.5 46.4 46.43 30.5 46.31 25.8 46.46 22.6 PU15.1 Fahrenem Instrument 1.05 48.47 5.6 48.41 7.4 48.46 4.6 48.41 5.4	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N055 Korrekturwert 3.5473215 3.5473215 3.54768473 3.54737134 3.54738974 3.54738974 3.54744183 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N062 Korrekturwert 1.09854136 1.09851861 1.0984788					

Extensionetermessstretke	PU15.2					
Extensometer: Nullstellung bei eir	gefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C				
Datum: 02.10.2009		Streichrichtung der Messstrecke: N062				
	Temperatur	Korrekturwert				
Eingehängt [m]	1.3	1 240(2)(12)				
Messungen [mm]	1 10.46 10.6 2 10.44 10.4	1.31062113				
	3 10.38 13.4	1.31058369				
	4 10.37 10.4	1.31052808				
Endwert [m]		1.31058275				
Extensometermessstrecke	PU15.3					
Extensometer: Nullstellung bei eir	gefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C				
Datum: 02.10.2009		Streichrichtung der Messstrecke: N062				
	Temperatur	<u>Korrekturwe</u> rt				
Eingehängt [m] Messungen [mm]	2.55 1 33.63 7.8	2 58386377				
	2 33.67 7.2	2.58388579				
	3 33.68 6.2	2.58386582				
	4 33.71 6.6	2.58390781				
Endwert [m]	I	2.5838808				
Extensometermessstrecke	PU16					
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei eir	PU16 gefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009	PU16 gefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009	PU16 gefahrenem Instrument Temperatur	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 <u>Korrekturwe</u> rt				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009	PU16 gefahrenem Instrument Temperatur	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PU16 gefahrenem Instrument Temperatur 0.8 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PU16 gefahrenem Instrument Temperatur 0.8 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4 3 4.45 9.4	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772 0.80453772				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PU16 gefahrenem Instrument 0.8 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4 3 4.45 9.4 4 4.48 9.4	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772 0.80453772 0.80456772				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PU16 gefahrenem Instrument Temperatur 0.8 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4 3 4.45 9.4 4 4.48 9.4	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772 0.80455772 0.80456772 0.80455772 0.80455772 0.80455772				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m]	PU16 gefahrenem Instrument Temperatur 0.8 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4 3 4.45 9.4 4 4.48 9.4 PU17	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772 0.80455772 0.80455772				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Fndwert [m] P17 Extensometer: Nullstellung bei ein	PU16 gefahrenem Instrument Temperatur 0.8 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4 3 4.45 9.4 4 4.48 9.4 PU17 gefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert . 0.80456973 . 0.80455772 . 0.80455772 . 0.80455772 . 0.80455772 . 0.80455772 . 0.80455822 . Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] P17 Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009	PU16 gefahrenem Instrument Temperatur 0.8 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4 3 4.45 9.4 4 4.48 9.4 PU17 gefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772 0.80455772 0.80455772 0.80455822 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N015				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Fndwert [m] P17 Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009	PU16 gefahrenem Instrument Temperatur 0.8 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4 3 4.45 9.4 4 4.48 9.4 PU17 gefahrenem Instrument Temperatur	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772 0.80455772 0.80455772 0.80455772 0.80455822 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N015 Korrekturwert				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] P17 Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PU16 gefahrenem Instrument	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772 0.80455772 0.80455772 0.80455822 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N015 Korrekturwert				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] P17 Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PU16 gefahrenem Instrument 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4 3 4.45 9.4 4 4.48 9.4 PU17 gefahrenem Instrument 1 37.6 5.6 2 37.57 4 2	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772 0.80455772 0.80455772 0.80455822 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N015 Korrekturwert 0.73764791 0.73760593				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] P17 Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PU16 gefahrenem Instrument 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4 3 4.45 9.4 4 4.48 9.4 PU17 gefahrenem Instrument 1 37.6 5.6 2 37.57 4.2 3 37.56 4.4	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772 0.80455772 0.80455772 0.80455772 0.80455772 0.80455822 0.80455822 0.80455822 0.80455822 0.73764791 0.73764791 0.73760593 0.73759765				
Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm] Endwert [m] P17 Extensometer: Nullstellung bei ein Datum: 02.10.2009 Eingehängt [m] Messungen [mm]	PU16 gefahrenem Instrument 1 4.51 6.4 2 4.47 9.4 3 4.45 9.4 4 4.48 9.4 PU17 gefahrenem Instrument 1 37.6 5.6 2 37.57 4.2 3 37.56 4.4 4 37.6 3.6	Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N066 Korrekturwert 0.80456973 0.80455772 0.80455772 0.80455772 0.80456772 0.80455822 0.80455822 Temperaturkoeffizient 11,6*10 ⁻⁶ ppm/°C Streichrichtung der Messstrecke: N015 Korrekturwert 0.73764791 0.73759765 0.7376308				

Extensometermessstrecke PU18 Temperaturkoeffizient 11,6*10⁻⁶ ppm/°C Extensometer: Nullstellung bei eingefahrenem Instrument Datum: 02.10.2009 Streichrichtung der Messstrecke: N015 Temperatur Korrekturwert Eingehängt [m] Messungen [mm] 34.91 5 0.68494972 1 2 34.9 4.6 0.68493655 3 34.95 0.68499449 5.6 4 34.89 0.68493608 5.8 Endwert [m] 0.68495421 PU19 Extensometermessstrecke Extensometer: Nullstellung bei eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6*10⁻⁶ ppm/°C Datum: 02.10.2009 Streichrichtung der Messstrecke: N070 Temperatur Korrekturwert Eingehängt [m] 17.6 0.84698288 Messungen [mm] 46.81 1 2 46.8 17.6 0.84697288 3 46.81 15.6 0.84696324 46.8 14.4 0.84694145 4 0.84696511 Endwert [m] Extensometermessstrecke PU20 Extensometer: Nullstellung bei eingefahrenem Instrument Temperaturkoeffizient 11,6*10⁻⁶ ppm/°C Datum: 02.10.2009 Streichrichtung der Messstrecke: N080 Temperatur Korrekturwert 0.75 Eingehängt [m] 26.77 6.8 0.77683127 Messungen [mm] 1 2 26.77 5.6 0.77682046 3 6.8 0.77676127 26.7 7.4 0.77679667 26.73 0.77680242 Endwert [m] Extensometermessstrecke PU21 Temperaturkoeffizient 11,6*10⁻⁶ ppm/°C Extensometer: Nullstellung bei eingefahrenem Instrument Datum: 02.10.2009 Streichrichtung der Messstrecke: N015 Temperatur Korrekturwert Eingehängt [m] 10 0.30211504 Messungen [mm] 2.08 1 2 2.02 18.4 0.30208446 3 2.01 11.6 0.30205064 2.06 0.30209083 4 8.8 Endwert [m] 0.30208524

9.3 Historische Untersuchungen



Abbildung 71: `Durlochkeil` Berechnungen mit Swedge Figure 71: `Durlochwedge`, analysis with Swedge

9.3.1 Rounout- Analyse



Figure 72: Runout Voellmy model



Abbildung 73: Runout, Geschwindigkeit und Ablagerungsmächtigkeit für Voellmy Modell Figure 73: Runout velocity and debris thickness, Voellmy model

9.4 Erdbebenanalyse

9.4.1 Irpinia 1980

Tabelle 18: Vereinfachte Newmark Analyse: Irpinia Erdbeben 1980 Table 18: Simplified Newmark Analysis, Irpinia earthquake 1980

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90			
Max. acceleration [cm/s ²]	72.19	69.13	64.36	57.64	49.56	54.78	71.19	68.20	63.14	56.40			
Max. velocity [cm/s]	5.47	5.06	5.21	5.21	5.06	4.77	4.35	3.97	4.03	3.96			
Sum of time above ah	0.02	0.01	0	0	0	0	0.015	0	0	0			
k _h /a _{max}	0.95	0.99	1.07	1.19	1.38	1.25	0.96	1.01	1.09	1.22			
a _{max} /k _h (Number of impulses)	1.05	1.01	0.94	0.84	0.72	0.80	1.04	0.99	0.92	0.82			
Simplified Analyses								I					
Permanent displacement (Kramer)	0.0108	0.0014	0	0	0	0	0.0050	0	0	0			
Max. permanent displacement (Kramer)	0.2292	0.1883	0.1855	0.1659	0.1348	0.1326	0.1433	0.1140	0.1088	0.0939			
Ambraseys and Menu (1988)	0.0042	3.566E-05	0	0	0	0	0.0019	0	0	0			
Jibson and others (1998, 2000)	0.0040	0.0042	0.0043	0.0043	0.0042	0.0040	0.0037	0.0035	0.0032	0.0030			
100 110 120 130	140 150) 160	170	180	190 2	00 210	220	230	240 2	250 260			
71.19 68.20 63.14 72.12	72.19 69.13	64.36	72.12	72.19	69.13 64	36 57.64	49.56	54.78	61.97 67	.27 70.64			
0.01 0.32 0.33 5.99	0.02 0.01	0.55	0.01	0.02	4.78 4.	0 0	5.06	4.77	4.35 5	0 0.015			
0.96 1.01 1.09 0.95	0.95 0.99	1.07	0.95	0.95	0.99 1.	07 1.19	1.38	1.25	1.11 1	.02 0.97			
1.04 0.99 0.92 1.05	1.05 1.01	0.94	1.05	1.05	1.01 0.	94 0.84	0.72	0.80	0.90 0	98 1.03			
0.0096 0 0 0.0128	0.0131 0.0024	0 2755	0.0128	0.0108 0	.0013	0 0 0	0 1249	0 1226	0 1247 0 11	0 0.0028			
0.0019 0 0 0.0040	0.0042 3.566E-05	0.2755	0.0040	0.0042 3.56	6E-05	0 0	0.1340	0.1320	0.1247 0.11	0 0.0011			
0.0028 0.0027 0.0028 0.0028	0.0030 0.0032	0.0035	0.0038	0.0040 0	.0042 0.00	43 0.0043	0.0042	0.0040	0.0037 0.00	0.0032			
270 280 290	300	310	320	33	30	340	350						
72.01 71.19 68.20	63.14	56.40	62.59	68.1	19 71	.71	73.06 Max.						
3.88 4.64 5.33	5.89	6.28	6.49	6.5	52 6	5.35	5.99 Max.						
0.015 0.015 0	0	0	0		0 0).02	0.025 Sum o						
0.95 0.96 1.01	1.09	1.22	1.10	1.0	01 (.96	0.94 k _h /a _m						
1.05 1.04 0.99	0.92	0.82	0.91	0.9	99 1	.05	1.07 a _{max} /H						
		Į				ł	Simpl	ified Analys	es				
0.0052 0.0057 0	0	0	0		0 0.0	128 0	.0160 Perm	anent dis <u>pla</u>	acement (Kr	amer)			
0.1154 0.1632 0.2059	0.2327	0.2366	0.2804	0.307	78 0.3	070 0	2790 Max.	permane <u>nt</u>		nt (Kram <u>er)</u>			
0.0037 0.0019 0	0	0	0		0 0.0	030 0	.0072 Ambr	aseys and N	1enu (198 <u>8)</u>				
0.0030 0.0028 0.0027	0.0028	0.0028	0.0030	0.003	32 0.0	035 0	.0038 Jibsor	n and others	(1998, 2000)			



Abbildung 74: Irpinia Erdbeben 1980: Eingangswelle Figure 74: Irpinia earthquake 1980: Input motion



9.4.2 Val Comino 1984

Abbildung 75: Val Comino Erdbeben 1984: Eingangsschwingungng

Figure 75: Val Comino earthquake 1984: Input motion



9.4.3 L`Aquila Erdbeben 2009, ANT

Abbildung 76: L`Aquila Erdbeben 2009, ANT: Eingangsschwingungen Figure 76: L`Aquila earthquake 2009, ANT: Input motion



9.4.4 L`Aquila Erdbeben 2009: AQG

Tabelle 19: Vereinfachte Newmark Analyse, L`Aquila Erdbeben 2009, AQG, trockene Bedingungen Table 19: Simplified Newmark analysis: L `Aquila earthquake 2009, AQG, dry conditions

					0	10	20		30	40	50	60		70	80	90
Max. acce	leration [c	m/s²]		346	5.45	388.74	432.36	462.	85	479.27	481.12	468.36	441	.37	400.97	357.08
Max. velo	/lax. velocity [cm/s]		20	0.36	23.26	28.30	32.	52	35.76	37.92	38.95	38	8.90	37.97	36.14	
Sum of tin				0.	815	0.805	0.85	0.	81	0.8	0.71	0.7	0.	785	0.74	0.655
k _h /a _{max}	<₀/a _{max}			0.35	0.31	0.28	0.	26	0.25	0.25	0.26	C).27	0.30	0.34	
a _{max} /k _h (N	k _h (Number of impulses) 2.88		2.88	3.23	3.59	3.	84	3.98	3.99	3.89	з	8.66	3.33	2.96		
Simplified	Analysis															
Permaner	nt displace	ment (Kran	ner)	1.	122	1.550	2.399	3.2	48	3.975	4.475	4.679	4.	567	4.187	3.593
Max. pern				4.	949	7.249	11.935	16.8	69	21.125	23.842	24.490	23.	015	19.921	16.075
Ambrasey			8.	526	11.147	14.002	16.0	71	17.207	17.336	16.451	14.	608	11.934	9.169	
Jibson and	d others (1	998, 2000)		0.	036	0.035	0.034	0.0	32	0.036	0.028	0.026	0.	025	0.025	0.025
100	110	120	130	140	150	160) 170	180	190	. :	200 21	.0 220	230	240	250	260
305.62	249.13	328.98	350.09	341.52	323.35	350.86	350.09	341.52	481.12	468	8.36 441.3	400.97	481.12	468.36	441.37	400.97
33.58	32.11	30.18	27.33	24.87	22.37	21.28	3 21.13	20.36	23.26	28	3.30 38.9	0 37.97	36.14	33.58	38.90	37.97
0.62	0.64	0.71	0.745	0.77	0.835	0.88	0.845	0.8	0.80		0.87 0.8	2 0.78	0.73	0.685	0.72	0.68
0.59	0.46	0.57	0.54	0.55	0.57	0.54	0.54	0.55	0.25		0.20 0.2	.7 0.50	0.25	0.20	0.27	0.50
2.54	2.07	2.73	2.91	2.84	2.68	2.91	2.91	2.84	3.95	3	i.89 3.6	b 3.33	3.99	3.89	3.66	3.33
2.835	2.210	2.396	2.034	1.662	1.304	1.235	1.215	1.114	1.684	2.4	470 4.56	7 4.187	4.065	3.476	4.567	4.187
11.873	8.851	10.326	9.014	7.279	5.578	5.477	5.385	4.879	8.972	12.9	928 23.01	5 19.921	21.658	18.195	23.015	19.921
6.169	3.297	7.493	8.744	8.231	7.168	8.791	8.744	8.231	17.336	16.4	451 14.60	8 11.934	17.336	16.451	14.608	11.934
0.025	0.026	0.028	0.025	0.033	0.033	0.034	0.025	0.035	0.034	0.0	034 0.03	2 0.036	0.028	0.026	0.025	0.025
	270	280	200)	300	310	3	20	330		340	350				

270	280	290	300	310	320	330	340	350	
357.08	305.62	264.22	265.31	299.41	327.47	345.59	353.21	350.09	Max. acceleration [cm/s ²]
36.14	33.58	32.11	30.18	27.33	24.87	22.37	21.36	21.13	Max. velocity [cm/s]
0.635	0.635	0.625	0.69	0.72	0.765	0.83	0.87	0.885	Sum of time above ah
0.34	0.39	0.46	0.45	0.40	0.37	0.35	0.34	0.34	k _h /a _{max}
2.96	2.54	2.19	2.20	2.49	2.72	2.87	2.93	2.91	a _{max} /k _h (Number of impulses)
									Simplified Analysis
3.593	2.835	2.329	2.064	1.854	1.623	1.354	1.248	1.215	Permanent displacement (Kramer)
16.075	11.873	9.387	8.327	7.709	6.980	5.962	5.552	5.385	Max. permanent displacement (Kramer)
9.169	6.169	4.010	4.063	5.828	7.406	8.474	8.933	8.744	Ambraseys and Menu (1988)
0.025	0.026	0.027	0.028	0.025	0.032	0.033	0.034	0.035	Jibson and others (1998, 2000)



Abbildung 77: L`Aquila Erdbeben 2009, AQG, Eingangsschwingung Figure 77: L`Aquila earthquake 2009, AQG, input motion



9.4.5 Neue vereinfachte Newmark Analyse

Abbildung 78: Neue vereinfachte Newmark Analyse, L`Aquila Erdbeben 2009, AQG, trockene Bedingungen Figure 78: New simplified Newmark analysis; L`Aquila earthquake 2009. AQG, dry conditions



Abbildung 79: Neue vereinfachte Newmark Analyse, L`Aquila Erdbeben 2009, AQG, nasse Bedingungen Figure 79:New simplified Newmark analysis; L`Aquila earthquake 2009. AQG, wet conditions

